

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри
 /Дмитро БОСИЙ/

« 20 » 12 20 21 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

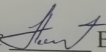
Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів**

Theme Improving the method of monitoring the state of installation of high-voltage cables

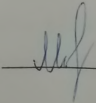
Керівник дипломної роботи

доцент  Віталій ЛЯШУК

Нормоконтролер

доцент  Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2026

 Вадим МИХАЙЛОВ

Student

Mykhailov Vadym

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

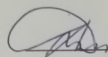
Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри



Дмитро БОСИЙ

{підпис}

« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи ЕС2026 Михайлова Вадима Олександровича

1 Тема дипломної роботи: Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів.

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 31ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: дослідження ефективності ізоляція кабелів високої напруги.

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}: діагностування ізоляції кабельних ліній методом вимірювання рівня часткових розрядів

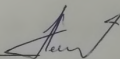
5 Перелік креслень {демонстраційного матеріалу}: ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
	ВСТУП	17.09	5
1.	1 СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.10	25
2.	2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЗОЛЯЦІЯ КАБЕЛІВ ВИСОКОЇ НАПРУТИ	11.11	20
3.	3 ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ	01.12	40
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдань «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи


{підпис}

Ляшук В.М.
{ПІБ}

Завдання прийняв до виконання


{підпис}

Михайлов В.О
{ПІБ}

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИБОРІВ ДІАГНОСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	9
1.1 Вплив дефектів обладнання на його працездатність.....	9
1.2 Технічна діагностика електрообладнання у процесі експлуатації.....	11
1.3 Сучасні засоби та методи контролю стану обладнання.....	13
1.3 Аналіз пристроїв діагностування електрообладнання.....	16
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЗОЛЯЦІЯ КАБЕЛІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ.....	22
2.1 Сучасна полімерна ізоляція для кабельних виробів	22
2.2 Поліетилен	26
2.2.1. Властивості поліетилену з низькою молекулярною масою.....	26
2.2.2 Сополімери етилену	28
2.2.3 Надвисокомолекулярний поліетилен	28
2.2.4 Технології одержання зшитого поліетилену.....	30
2.2.5 Кабелі силові, з ізоляцією із силаносшитого поліетилену	32
2.3 Полівінілхлорид	33
2.4 Основні дефекти в ізоляції кабелів при виробництві та експлуатації.....	34
3. ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ.....	39
3.1 Методи оцінки часткових розрядів	39
3.2 Вдосконалений комплексний метод визначення стану ізоляції	45
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

					02.15.EC2026.РД.2021–ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів			
Розробник	Михайлов В.О							
Керівник	Ляшук В.М.			20.12	ДНУЗТ, ІСЕ, гр. EC2026			
Н. контр.	Перцевий В.О							
					Літ.	Арк.	Аркушів	
						5	57	

Український державний університет науки і технологій

Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

_____ /Дмитро БОСИЙ/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів**

Theme **Improving the method of monitoring the state of installation of high-voltage cables**

Керівник дипломної роботи доцент _____ Віталій ЛЯШУК

Нормоконтролер доцент _____ Віталій ПЕРЦЕВИЙ

Студент групи ЕС2026 _____ Вадим МИХАЙЛОВ

Student _____ Mykhailov Vadym

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту

імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри

_____ Дмитро БОСІЙ
(підпис)

« 25 » січня 2021р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи ЕС2026 Михайлова Вадима Олександровича

1 Тема дипломного роботи: Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів.

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021 р. № 31ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи:

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
	ВСТУП	17.09	5
1.	1 СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.10	25
2.	2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЗОЛЯЦІЯ КАБЕЛІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ	11.11	20
3.	3 ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ	01.12	40
4.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	13.12	5
5.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	15.12	5

Дата видачі завдань «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи

(підпис)

Ляшук В.М.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Михайлов В.О

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 57 сторінок, складається із 3 розділів та містить 14 ілюстрації, 3 таблиці, 23 використаних джерела.

Метою роботи являється вдосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів.

В роботі проведено дослідження ефективності ізоляції кабелів високої напруги, розкрито характеристики сучасної полімерної ізоляції для кабельних виробів та визначено основні дефекти в ізоляції кабелів які виникають при виробництві, що приводить до випадків браку продукції.

В даний час при виробництві кабельних виробів використовують два методи контролю: контроль погонної електричної ємності і електроіскровий метод контролю. Окремо дані методи не дозволяють виявляти деякі види дефектів, і, тим самим, знижують достовірність проведеного контролю.

Для підвищення достовірності запропоновано об'єднати два існуючі методи контролю в один комплексний метод.

Запропонований комплексний метод контролю полягає у вимірюванні погонної електричної ємності при електроіскрових випробуваннях.

Запропонована методика нового способу діагностування ізоляції кабелю дає можливість забезпечити точність діагнозу та інформативність контролю результатів вимірювання на досить високому рівні, що підтверджено відповідними розрахунками.

Ключові слова: ДІАГНОСТИКА, ДІЕЛЕКТРИК, ІЗОЛЯЦІЯ, КАБЕЛЬ, ЧАСТКОВІ РОЗРЯДИ, ЄМНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	9
1.1 Вплив дефектів обладнання на його працездатність.....	9
1.2 Технічна діагностика електрообладнання у процесі експлуатації.....	11
1.3 Сучасні засоби та методи контролю стану обладнання.....	13
1.3 Аналіз пристроїв діагностування електрообладнання.....	16
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЗОЛЯЦІЯ КАБЕЛІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ.....	22
2.1 Сучасна полімерна ізоляція для кабельних виробів	22
2.2 Поліетилен	26
2.2.1. Властивості поліетилену з низькою молекулярною масою.....	26
2.2.2 Сополімери етилену	28
2.2.3 Надвисокомолекулярний поліетилен	28
2.2.4 Технології одержання зшитого поліетилену.....	30
2.2.5 Кабелі силові, з ізоляцією із силаносшитого поліетилену	32
2.3 Полівінілхлорид	33
2.4 Основні дефекти в ізоляції кабелів при виробництві та експлуатації.....	34
3. ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ.....	39
3.1 Методи оцінки часткових розрядів	39
3.2 Вдосконалений комплексний метод визначення стану ізоляції	45
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробник		Михайлов В.О			Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів			Літ.	Арк.	Аркушів		
										5	57	
Керівник		Ляшук В.М.						ДНУЗТ, ІСЕ, гр. ЕС2026				
Н. контр.		Перцевий В.О										

ВСТУП

Актуальність роботи. На сьогоднішній день нормальна безперебійна робота систем електропостачання залізничного транспорту, неможлива без надійної роботи силових кабельних ліній різних класів напруги.

Останнім часом відзначається збільшення промислової активності. Це призводить до зростання навантаження на кабельні лінії, а отже, і до збільшення кількості негативних зовнішніх впливів (перевантаження, перенапруг, коротких замикань і т.д.), що в сукупності з старінням ізоляції в результаті довготривалої експлуатації сприятиме певному зростанню аварійних відмов. Тимчасовий вихід силових кабельних ліній з ладу неодмінно тягне за собою перерви в енергопостачанні споживачів і, отже, економічні втрати для енергопостачальної організації.

Пошкодження або відхилення від нормального режиму роботи, що виникають у високовольтних кабелях, можуть бути викликані недопрацюванням конструкції, прихованими дефектами, порушеннями правил перевезення, технології монтажу або експлуатації. Своєчасне виявлення дефекту дозволяє вжити заходів щодо запобігання його розвитку і збереження працездатного стану кабелю.

Одним з параметрів, що роблять значний вплив на експлуатаційні характеристики кабельного виробу, є стан ізоляції. Об'єктивні дані про технічний стан ізоляції силових кабелів і сполучної арматури можна отримати сучасними діагностичними методами. Одним з перспективних напрямків в даній роботі є діагностика методом вимірювання рівня часткових розрядів.

Часткові розряди з часом руйнують ізоляцію, приводячи до її пробою і несправності кабелю. Ізоляція руйнується не відразу, це досить тривалий процес який відбувається протягом багатьох місяців, років. Своєчасне виявлення часткових розрядів, за допомогою сучасних діагностичних методів, оцінка їх потужності і повторюваності, дозволяє виявити, пошкодження що розвиваються в ізоляції і вжити заходи для їх усунення.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Удосконалення даної методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів необхідне для більш ефективного виявлення прихованих пошкоджень.

За сукупністю отриманих діагностичних параметрів може бути зроблено обґрунтований висновок про технічний стан і проблемні місця діагностуемого кабеля та дозволить виключити пошкодження в кабельних системах при мінімальних фінансових витратах.

Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри. Обране дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Мета та задачі дослідження. Особлива увага була загострена на вдосконаленні діагностування кабельних ліній методом вимірювання рівня часткових розрядів.

Об'єкт дослідження – ізоляція високовольтних кабелів.

Предмет дослідження – метод отримання характеристик стану ізоляції високовольтного кабелю.

Методи дослідження – отримання інформації про стан ізоляції високовольтного кабелю, застосовуючи вдосконалений метод вимірювання рівня часткових розрядів.

Наукова новизна одержаних результатів. Використовується вдосконалена методика визначення дефектів ізоляції силового кабелю.

Реалізація наявних технічних рішень дозволить істотно підвищити точність визначення дефектів та поліпшити якість оцінки стану ізоляції силових кабелів.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, та формулювання висновків отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів роботи.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на науково-практичній конференції.

Публікації за тематикою роботи.

Михайлов В. О., Удосконалення методики контролю стану ізоляції високовольтних кабелів / Енергетика та електромеханіка [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 42 с.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 СТАН І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЮВАННЯ Й РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ДІАГНОСТУВАННЯ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Основним призначенням системи тягового електропостачання є надійне та безперебійне забезпечення тягових та нетягових споживачів електроенергією належної якості. Тому одним з важливих завдань господарства електропостачання є підтримка обладнання в працездатному стані.

Основною причиною пошкодження пристроїв системи тягового електропостачання є старіння основних фондів та наявність в експлуатації обладнання, арматури та інших пристроїв недостатньої надійності.

Експлуатація пристроїв недостатньої надійності, або застарілих установок пов'язана з підвищеним ризиком, високою аварійністю, виникненням екологічних та інших проблем [1]. За наявності залишкового терміну служби таке обладнання слід залишати в роботі лише в тому випадку, якщо вигода від цього рішення помітно перевершує всі можливі неприємні наслідки. Тому розробка методів визначення залишкового терміну служби, визначення стану обладнання за допомогою сучасних методів і пристроїв діагностування та визначення доцільності подальшої експлуатації пристроїв в даний час актуальним завданням.

1.1 Вплив дефектів обладнання на його працездатність

Електрообладнання в кожний момент часу може бути в одному з двох станів - справному або несправному. Справне електроустаткування відповідає всім вимогам, встановленим документацією. Несправним електрообладнання вважається у тому випадку, якщо воно не відповідає хоча б одній з цих вимог, тобто коли в ньому є один або декілька дефектів. Кожну невідповідність електроустаткування встановленим вимогам називають дефектом.

Якщо в електрообладнанні є кілька дефектів, то часто найяскравіше проявляється один, а всі інші на його тлі не спостерігаються. Якщо в електроустаткуванні існує більше одного дефекту, то до їх пошуку переходять

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

після усунення першого та отримання інформації про існування іншого (інших) дефекту.

Дефекти прийнято поділяти на явні та приховані. Явні дефекти можуть бути виявлені передбаченими документацією правилами, методами та засобами контролю. Інші дефекти вважаються прихованими і виявити їх можна у тому випадку, якщо застосовувати засоби контролю, які не передбачені документацією.

Якщо наявність того чи іншого дефекту унеможлиблює використання електроустаткування за призначенням, такий дефект (або дефекти) називають критичним. Наявність значних дефектів обмежує використання електроустаткування за призначенням чи впливає його довговічність.

Електроустаткування з малозначними дефектами може без обмежень використовуватись за призначенням. Таким чином, наявність або відсутність дефектів не завжди впливає на здатність електроустаткування виконувати свої функції [1]. Тому, як зазначалося вище, на додаток до відомих двох станів електрообладнання (справне чи несправне) вводяться ще два – працездатне та непрацездатне. Працездатним називають такий стан електроустаткування, перебуваючи в якому воно здатне виконувати задані функції, при цьому значення контрольованих параметрів залишаються у встановлених заздалегідь межах. Про працездатне електрообладнання не завжди можна сказати, що воно справне, але справне, воно завжди працездатне. Зі справного стану в несправне електроустаткування переходить в результаті події, що називається пошкодженням. При цьому несуттєве ушкодження впливає на його працездатність, а суттєві призводять до відмови – порушення працездатності.

Таким чином, відмова електроустаткування може бути наслідком появи в ньому дефектів, але не завжди наявність дефектів призводить до відмови [2]. Залежно від наслідків та причин відповідно розрізняють часткові та повні, систематичні та випадкові відмови. Часткова відмова не перешкоджає використанню електроустаткування за призначенням, але обмежує ефективність використання. Після повної відмови використання електроустаткування за

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

призначенням стає неможливим. Систематичні відмови електроустаткування можуть виникати при порушенні технологічних процесів його виготовлення, монтажу, налаштування, експлуатації та ремонту. Причини їх виникнення можуть бути встановлені та усунуті. Виникнення випадкових відмов є природне явище, ймовірність появи якого визначається показниками надійності елементів та електрообладнання в цілому і характерно для будь-якого технічного об'єкта.

Ознаки, що дозволяють встановити факт порушення працездатності електрообладнання і тим самим віднести його фактичний стан до одного з відомих, називаються критеріями відмови або дефекту та задаються документацією у вигляді переліку параметрів із зазначенням допустимих меж їх зміни – допусків. Вихід параметра за межі допуску є критерієм за яким дізнаються про непрацездатність електроустаткування.

Після встановлення на основі критеріїв та характеру відмови факту існування в електрообладнанні дефекту переходять до його пошуку. Пошук дефектів у будь-якому обладнанні може бути представлений сукупністю тих чи інших методів діагностики, зокрема різноманітних вимірів, і навіть розрахунків, виконуваних в певній послідовності. Перевірки поділяють на непрямі та безпосередні. Непрямі – дозволяють знайти дефект чи помилку без виміру будь-яких параметрів за ознаками, побічно пов'язаними зі справним чи несправним (працездатним чи непрацездатним) станом електроустаткування, а безпосередні допомагають виявити дефект після вимірювання параметрів чи визначення характеристик.

1.2 Технічна діагностика електрообладнання у процесі експлуатації

Серед складних технічних пристроїв, що вимагають діагностування при експлуатації, електроенергетичне обладнання високої напруги займає особливе місце. Це обладнання як ніяке інше схильне до комплексного впливу сильних електричних, електромагнітних та теплових полів та електродинамічних зусиль. У зв'язку з цим електрообладнання піддається ризику утворення дефектів,

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

несправностей та відмов. Тому для обладнання застосовується контроль у виді системи діагностики.

Основними завданнями технічної діагностики є: визначення технічного стану електрообладнання в умовах експлуатаційних впливів, що змінюються; виявлення виду та ступеня небезпеки дефекту на ранньому етапі його розвитку; визначення необхідності та обсягу ремонту, термінів заміни змінних деталей та вузлів; перевірка стабільності регулювань; прогнозування залишкового ресурсу чи терміну служби [1].

Планова технічна діагностика проводиться відповідно до чинних норм і правил. При планових перевірках контролюються параметри, що характеризують технічний стан агрегату та дозволяють визначити залишковий ресурс вузлів та деталей, що обмежують можливість подальшої експлуатації обладнання. Позапланова технічна діагностика обладнання проводиться у разі виявлення порушень його технічного стану.

Розрізняють чотири можливі стани обладнання [3]:

- справне (відсутні будь-які пошкодження);
- працездатне (існуючі дефекти не заважають роботі обладнання в даний момент часу);
- непрацездатне (обладнання виводиться з експлуатації, але після відповідного технічного обслуговування може працювати в одному з попередніх станів);
- граничне (на цьому етапі приймається рішення про можливість подальшої експлуатації обладнання після ремонту або його списання).

Основні причини зміни стану електроустаткування: ушкодження; відмова; перехід у граничний стан через непереборний дефект, моральне старіння та інші фактори; відновлення; ремонт.

Практично на кожному етапі роботи устаткування має проводитися уточнена оцінка його технічного стану з видачею висновку про можливість його подальшого використання.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Технічний стан будь-якого об'єкта можна встановити при разовому та багаторазовому діагностуванні. При разовому діагностуванні високовольного устаткування, що складається з багатьох елементів, ймовірність об'єктивної оцінки технічного стану мала. Отже, лише випадково можна знайти стохастичні дефекти при одноразовому діагностуванні. Імовірність надійної та об'єктивної оцінки технічного стану підвищується зі збільшенням числа актів контролю. Ця обставина є основою запровадження багаторазового діагностування з певною періодичністю, тобто моніторингу діагностичних параметрів.

Залежно від складності та вивченості обладнання результати діагностики у вигляді висновків та рекомендацій можуть бути отримані або в автоматичному режимі або після відповідної експертної оцінки даних, отриманих в результаті діагностики обладнання. Технічне обслуговування та ремонт у цьому випадку зводяться до усунення пошкоджень та дефектів, зазначених у висновку та даних технічного діагностування або до знаходження місця відмови. Результати діагностики можуть заноситися до відповідних баз даних і передаватися іншим суб'єктам системи діагностики.

Структурно сучасна система технічної діагностики є інформаційно-вимірювальною системою та містить датчики контрольованих параметрів, лінії зв'язку з блоком збору інформації, блок обробки інформації, блоки виведення та відображення інформації, виконавчі пристрої, пристрої сполучення з іншими інформаційно-вимірювальними та керуючими системами (зокрема, із системою протиаварійної автоматики, сигнал до якої надходить під час виходу контрольованих параметрів за встановлені межі) [3]. Система технічної діагностики може проектуватися як самостійна, і як підсистема у межах вже існуючої інформаційно-вимірювальної системи підприємства.

1.3 Засоби та методи контролю стану обладнання

На сьогоднішній день значна частина фізичних явищ та процесів використовуються з метою діагностики. Багато з них знайшли широке застосування і в електроенергетиці.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Фізико-хімічні методи. Енергетичний вплив на ізоляцію електричних пристроїв призводить до появи змін на молекулярному рівні. Це відбувається незалежно від типу ізоляції та завершується хімічними реакціями з утворенням нових хімічних сполук, причому під дією електромагнітного поля, температури, вібрації одночасно йдуть процеси розкладання та синтезу [3].

Аналізуючи кількість і склад нових хімічних сполук, що з'являються, можна робити висновки про стан всіх елементів ізоляції. Найбільш просто це зробити з рідкою вуглеводневою ізоляцією, якою є мінеральні масла, тому що всі або майже всі нові хімічні сполуки, що утворилися, залишаються в замкнутому обсязі.

Перевагою фізико-хімічних методів діагностичного контролю є їх висока точність та незалежність від електричних, магнітних та електромагнітних полів та інших енергетичних впливів, оскільки всі дослідження проводяться у фізико-хімічних лабораторіях [4].

Недоліками цих методів є відносна дорожнеча і запізнення від поточного часу, тобто неоперативний контроль.

Метод хроматографічного контролю маслonaповненого обладнання заснований на хроматографічному аналізі різних газів, що виділяються в маслі та ізоляції при дефектах всередині електроустаткування. Алгоритми визначення дефектів на ранній стадії їх виникнення, засновані на аналізі складу та концентрації газів, є поширеними, добре опрацьованими для діагностики маслonaповненого електрообладнання. Оцінка стану маслonaповненого устаткування виконується в результаті контролю: граничних концентрацій газів; швидкості наростання концентрацій газів; відношення концентрацій газів [4].

Метод контролю діелектричних характеристик ізоляції заснований на вимірі діелектричних характеристик, до яких відносяться струми витоку, величини ємності, тангенс кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) та ін., що характеризують якість та ступінь старіння ізоляції.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Втрати електричної енергії на нагрівання елементів та вузлів електроустаткування в процесі експлуатації залежать від їхнього технічного стану та використовуються для діагностики в методі інфрачервоної термографії. Вимірюючи інфрачервоне випромінювання, обумовлене нагріванням, можна робити висновки про технічний стан електроустаткування. Невидиме інфрачервоне випромінювання за допомогою тепловізорів перетворюється на видимий людиною сигнал. Даний метод дистанційний, чутливий, та дозволяє реєструвати зміни температури на долі градуса. Тому його показання сильно схильні до впливових факторів, наприклад, відображаючи здатність об'єкта вимірювання, температури і стану навколишнього середовища, так як запиленість і вологість поглинають інфрачервоне випромінювання, та ін.

Оцінка технічного стану елементів та вузлів електрообладнання під навантаженням виконується або зіставленням температури однотипних елементів і вузлів (їхнє випромінювання має бути приблизно однаковим), або за перевищенням допустимої температури для цього елемента або вузла. В останньому випадку тепловізори повинні мати вбудоване обладнання для корекції впливу температури та параметрів навколишнього середовища на результат вимірювання.

Методи контролю часткових розрядів у ізоляції. Процеси виникнення та розвитку дефектів ізоляції, незалежно від її матеріалу, супроводжуються появою електричних чи часткових розрядів, які, своєю чергою, породжують електромагнітні (у радіо та оптичному діапазонах) та звукові хвилі. Інтенсивність прояву розрядів залежить від температури та вологості атмосферного повітря та пов'язана з наявністю атмосферних опадів. Така залежність діагностичної інформації, що отримується від атмосферних умов, вимагає поєднувати процедуру діагностування інтенсивності розрядів у підвісній ізоляції ЛЕП з необхідністю обов'язкового контролю температури і вологості навколишнього середовища [4].

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Для контролю широко застосовуються всі види та діапазони випромінювання. Метод акустичної емісії працює у звуковому діапазоні. Відомий метод контролю оптичного випромінювання ПР за допомогою електронно-оптичного дефектоскопа. Він ґрунтується на реєстрації просторово-часового розподілу яскравості свічення та визначенні за її характером дефектних ізоляторів. Для цих цілей з різною ефективністю застосовують радіотехнічний і ультразвуковий методи, а також метод контролю ультрафіолетового випромінювання за допомогою електронно-оптичного дефектоскопа «Філін».

1.4 Аналіз пристроїв діагностування електрообладнання

На сьогоднішній день в залежності від типу електроустановок та завдань визначення їх технічного стану застосовуються пристрої діагностування різних принципів побудови та призначення. Дані пристрої розрізняються за різними ознаками: способами технічної реалізації; конструктивним виконанням; розташуванням відносно об'єкта діагностування; принципами дії на об'єкт діагностування; універсальністю; ступенем автоматизації; формою обробки та подання інформації про стан об'єкта; режимами роботи.

За класифікацією засоби діагностування можливо розділити на групи:

- за здатністю технічної реалізації: апаратні, програмні, програмно-апаратні;
- розташування відносно об'єкта діагностування: зовнішні та вбудовані;
- за ступенем універсальності застосування: спеціалізовані та універсальні;
- за ступенем автоматизації збору та обробки інформації: ручні, автоматизовані та автоматичні;
- за формою обробки і представлення інформації: аналогові, цифрові, аналогово-цифрові;
- за ступенем дії на об'єкт діагностування: активні та пасивні.

До апаратних засобів діагностування відносять різні пристрої: прилади, пульти, стенди, спеціальні комп'ютери. Апаратні засоби, що утворюють з об'єктом діагностування конструктивне єдине ціле, є вбудованими апаратними

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

засобами діагностування. Прикладами таких засобів можуть бути прилади вимірювань електричних величин (струму, напруги, потужності, частоти й тому подібне), пристрої індикації технічного стану елементів (реле, світловипромінювальні діоди, неонові лампи), пристрої контролю ізоляції тощо.

Якщо в схемах експлуатації електроустаткування вбудовані засоби діагностування не передбачені або їх недостатньо для діагностування з необхідною достовірністю, то застосовують зовнішні апаратурні засоби діагностування, що виконані окремо від конструкції обладнання і підключаються до нього лише в процесі діагностування. Простими прикладами зовнішніх апаратурних засобів можуть бути комбіновані прилади для вимірювань в колах постійного і змінного струму, тестери логічного стану, електронно-променеві й цифрові осцилографи, переносні вимірювальні комплекти та інші.

Коли апаратурні засоби діагностування призначені тільки для однотипного обладнання, то вони є спеціалізованими, а якщо для обладнання різного конструктивного виконання та функціонального призначення, то універсальними.

Зовнішні спеціалізовані засоби діагностування, це пристрої, використовувані, наприклад, для перевірки працездатності окремих елементів або вузлів електроустаткування на стадіях технічного контролю.

До вбудованих спеціалізованих засобів діагностування можуть входити спеціально розроблені обчислювальні пристрої з жорстко запрограмованими алгоритмами діагностування конкретної системи електроустаткування.

Також існують програмні засоби діагностування, що є комп'ютерними програмами, які керують роботою обладнання відповідно до алгоритму діагностування. Вони застосовні, наприклад, для програмованих контролерів, мікропроцесорних систем управління релейним захистом та інших. Програми забезпечують технічне діагностування обладнання як у процесі використання його за прямим призначенням, так і при короткочасній перерві функціонування об'єкта (спеціальні, випробувальні програми).

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Перспективним є поєднання програмних засобів з апаратурними, що утворюють програмно-апаратні засоби діагностування, які дозволяють вирішувати завдання самодіагностування обладнання [3].

Універсальні засоби діагностування технічно складніші і, як правило, побудовані на базі серійних промислових комп'ютерів.

За ступенем автоматизації сучасні засоби діагностування можуть бути ручними, автоматизованими й автоматичними. Застосування ручних засобів потребує участі людини-оператора як в підключенні засобів до об'єкта діагностування так і в прийнятті рішень про його технічний стан. Такий підхід знижує продуктивність та об'єктивність діагностування. Як правило, ручні засоби виконуються спеціалізованими. Автоматизовані засоби вимагають часткової участі оператора для їх підключення до обладнання та вибору режимів діагностування. Основна ж процедура діагностування, включаючи видачу інформації про технічний стан обладнання, здійснюється автоматично. Автоматичні засоби (мікропроцесорні комплекти, мікро- і міні-ЕОМ) вирішують завдання діагностування без втручання людини. Автоматизовані та автоматичні засоби можуть бути як спеціалізованими, так і універсальними, вони мають високу швидкодію і достовірність діагностування.

Залежно від форм обробки і представлення інформації технічні засоби діагностування можуть бути розділені на аналогові, цифрові та цифро-аналогові.

За дією на об'єкт діагностування сучасні технічні пристрої можуть бути активними та пасивними. Активні впливають на об'єкт, посилаючи в нього сигнал, що викликає реакцію об'єкта, яка потім і аналізується. Сигнали збурення можуть бути імпульсними, ступеневими, гармонійними та іншими. Пасивні засоби виконують лише вимірювання, обробку та оцінку сигналів, що характеризують стан об'єкта.

З усього різноманіття засобів діагностування в енергетиці найбільше застосування нині знаходять апаратні засоби для визначення працездатності й несправності окремих складових одиниць електроустаткування. Сьогодні в

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

зв'язку з поширенням мікропроцесорних систем і обчислювальної техніки, набувають широкого впровадження програмні та програмно-апаратні засоби діагностування.

Важливість забезпечення надійності електрообладнання при використанні сучасних методів та засобів діагностики висуває до останніх високі вимоги. Тому при проектуванні вдосконаленні та експлуатації пристроїв діагностування повинні виконуватись вимоги які характеризуються: номінальними та допустимими значеннями вхідних та вихідних сигналів; статичною та динамічною точністю їх вимірювання; глибиною діагностування (числом діагностованих сигналів); достовірністю діагностування; технічною та метрологічною надійністю; способом зв'язку з об'єктом діагностування; формою представлення результатів.

Перелічені показники взаємопов'язані та мають бути узгоджені між собою.

Технічні пристрої діагностування можуть мати похибку вимірювання, що задовольняє ряду ± 5 ; $\pm 2,5$; $\pm 1\%$ [3]. На величину похибки впливають вид сигналу (аналоговий або дискретний), спосіб і форма передачі інформації, а також статичні та динамічні характеристики контрольованих параметрів електрообладнання.

Високий рівень електромагнітних та технологічних перешкод на об'єктах електроенергетики, пов'язаний зі специфікою роботи обладнання та природними коливаннями електричних та технологічних параметрів, пред'являє високі вимоги до перешкодозахищеності та перешкодостійкості засобів діагностування.

Коли використовують апаратні засоби діагностування та дотримуються ієрархічного принципу виділення дефекту (починаючи з діагностування окремих функціональних елементів і закінчуючи діагностуванням обладнання в цілому), то для кожного з них вважають достатнім контролювати не більше 25...26 діагностичних параметрів. Подальше зростання числа вхідних сигналів не виправдано ускладнює технічну реалізацію засобів діагностування та може

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

призвести до збільшення його тривалості, а надмірно велика кількість діагностичних параметрів ускладнює їх аналіз.

Достовірність засобів діагностування – властивість забезпечувати відповідність результату діагностування істинному стану об'єкта – залежить від глибини діагностування (набору або числа параметрів, що діагностуються), періоду перевірки та його тривалості, перешкодостійкості тощо. Достовірність діагностування знижується зі збільшенням тривалості періоду перевірки через можливе виникнення дефектів устаткування за цей час. Залежно від необхідної точності оцінки діагностичних параметрів обладнання (оцінки справності, працездатності чи правильності функціонування) період перевірки окремих елементів електрообладнання може коливатися в широких межах: від 10^{-4} до 10^5 с.

Основним напрямком вдосконалення для пристроїв діагностування є збільшення швидкодії діагностування за рахунок вибору найбільш інформаційних контрольованих параметрів та зниження їх числа, застосування вбудованих засобів діагностування, а також використання програмованих обчислювальних пристроїв.

Надійність засобів діагностування не повинна бути нижчою за рівень надійності елементів та деталей електрообладнання, а також не повинна знижувати їх надійність у процесі діагностування. Досягнення високої надійності засобів діагностування може бути забезпечене за рахунок використання в них високонадійних комплектуючих елементів та деталей, вибором системних та технічних рішень побудови схем, стійких до різних факторів, що дестабілізують, застосуванням резервних пристроїв, методом самоконтролю і т.п.

Для зовнішніх засобів діагностування потрібна наявність гальванічного поділу електричних ланцюгів обладнання та пристроїв діагностування. Останнє диктується як умовами надійності роботи низьковольтного електричного ланцюга засобів діагностування, так й умовами безпеки пристроїв діагностування із високим потенціалом.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

На сьогодні основним напрямком підвищення якості діагностичного контролю силового електрообладнання здійснюється за рахунок автоматизації процесів вимірювань, реєстрації, отримання оперативної інформації про технічний стан електрообладнання. Реалізація систем діагностики стає найбільш ефективною в режимі постійного моніторингу діагностичних параметрів контрольованого електрообладнання. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність експлуатації обладнання, підвищити основні параметри експлуатаційної надійності, використовувати найбільш повно ресурс обладнання, зменшити кількість обслуговуючого персоналу та знизити фінансово-економічні витрати на проведення технічного обслуговування та ремонту.

При вдосконаленні пристроїв для проведення діагностичних обстежень потрібно також реалізовувати програму підвищення ефективності обстежень, яка повинна включати виконання наступних робіт:

1. Створення бази даних аварійності і характерних дефектів обладнання різних типів.
2. Систематизацію основних видів дефектів і розробка бази даних дефектів (включаючи ілюстративний матеріал).
3. Зіставлення результатів комплексних діагностичних обстежень та ремонтів.
4. Статистична обробка отриманих результатів і оцінка достовірності та ефективності окремих методів комплексних діагностичних обстежень.
5. Розробка рекомендацій з оцінки рівня і небезпеки розвитку дефектів.

Постійне вдосконалення діагностичних методів та пристроїв дозволяє визначати точне місце виникнення дефектів, прогнозувати подальший розвиток дефектів та визначати рівень небезпеки дефектів.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІЗОЛЯЦІЯ КАБЕЛІВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Матеріали, особливо новостворені, були і залишаються однією з головних ланок у вирішенні багатьох інженерних завдань у виробництві електрообладнання. Сучасне електрообладнання є складним пристроєм, з великою кількістю різноманітних деталей, для виготовлення яких потрібен широкий асортимент різних електротехнічних і конструкційних матеріалів. Кожен використовуваний для цієї мети матеріал повинен мати цілком певні електричні, механічні та хімічні властивості, які залежать від його хімічного складу та будови, а також інтенсивності зовнішнього енергетичного впливу (напруженості та частоти електричного поля, температури тощо). Без знання основних властивостей цих матеріалів, без розуміння фізичних процесів, що протікають при поміщенні їх у електричне або магнітне поле, без розуміння зв'язку цих процесів з хімічним складом та будовою матеріалу, не можна спроектувати та виготовити електротехнічну апаратуру, неможливо грамотно її експлуатувати.

2.1 Сучасна полімерна ізоляція для кабельних виробів

Першим електроізоляційним матеріалом був звичайний папір – у 1795 році папером почали обмотувати телеграфні дроти. У 1894 р. з'явилися силові електрокабелі із просоченою олією паперовою ізоляцією. У ХІХ ст. (Під час прокладання підземних комунікацій в Європі) за допомогою гуттаперчі (натуральний каучук) навчилися захищати проводи та кабелі від впливу вологи, і з освоєнням технології вулканізації гумова ізоляція міцно і надовго увійшла в кабельну індустрію [5]. Лише після закінчення Другої світової війни замість гумової ізоляції почали застосовувати термопласти – впровадження у кабельне виробництво на початку 1950-х років поліетиленових композицій відкрило дорогу для екструзійних полімерних ізоляційних матеріалів.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Типова конструкція більшості електрокабелів являє собою металевий провідник (мідь або алюміній), оточений діелектричним шаром ізоляції та захисною оболонкою. Головні вимоги до матеріалу ізоляції - високі діелектричні властивості, а зовнішньої оболонки - стійкість до впливів агресивних чинників довкілля.

Найбільш важливими та загальноприйнятими для оцінки експлуатаційних властивостей електрокабелів, розрахованих на напругу до 150 кВ, є такі параметри: питомий опір ізоляції, постійна діелектрична стала, тангенс кута діелектричних втрат та електрична міцність [6].

Електричний опір ізоляційних матеріалів визначається переважно хімічною структурою макромолекул. Найчастіше оцінюють питомий об'ємний опір (ρ_v) ізоляції при постійній напрузі. Для більшості полімерних матеріалів значення ρ_v лежать у межах $10^{10} \dots 10^{16}$ Ом·см [7].

Діелектрична стала є мірою здатності матеріалу до поляризації під дією зовнішнього електричного поля і відповідає інтервалу значень від 2 до 5 (ASTM D150).

Тангенс кута діелектричних втрат характеризує нагрівання діелектрика в електричному полі. Ізоляційні матеріали повинні мати якнайменше значення цього параметра.

Діелектрична міцність характеризує граничну стійкість ізоляції на пробій, визначається хімічною природою полімеру і залежить від домішок, що вимірюється в кіловольтах на одиницю товщини (мм) зразка матеріалу (ASTM D149) [8].

Серед найважливіших властивостей зовнішньої (захисної) оболонки кабельних виробів слід відзначити стійкість до дії вогню, високих температур та хімічних агентів. В даний час в якості електричної ізоляції та захисної оболонки проводів і кабелів різних марок застосовують три класи полімерів: традиційні гуми, класичні термопласти (полівінілхлоридні пластикати, поліолефіни, фторопласти та ін) і термопластичні еластомери (ТЕГТ) (табл. 2.1) [5].

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Традиційні гуми на основі натурального, ізопренового та бутадієн-стирольних каучуків широко застосовувалися та застосовуються для ізоляції та оболонки проводів та кабелів, розрахованих на напругу до 25 кВ. В даний час кабельними заводами випускається понад 200 різних марок кабелів та проводів із застосуванням гум. Найбільш гумоємними кабелями, є гнучкі силові проводи та кабелі, судові та шахтні кабелі [5].

Таблиця 2.1 – Електроізоляційні властивості полімерних матеріалів

Матеріал	Питомий об'ємний електричний опір, Ом·см	Електрична міцність, кВ/мм	Тангенс кута діелектричних втрат при 1 КГц	Діелектрична проникність
Каучуки				
Натуральний каучук	$10^{15} \dots 10^{17}$	3...30	$(2,3 \dots 3) \cdot 10^{-3}$	2,1...3,7
Ізопреновий, бутадієн-стирольний	10^{15}	20...28	$0,9 \cdot 10^{-3}$	2,1...2,7
Етилен-пропіленовий (дієновий)	$10^{15} \dots 10^{17}$	35...42	$(0,5 \dots 0,9) \cdot 10^{-3}$	3...3,5
Бутилкаучук	10^{17}	16...24	$(8 \dots 30) \cdot 10^{-3}$	2,4...2,6
Хлоропреновий	10^{11}	6...24	$30 \cdot 10^{-3}$	9
Нітрильний	$10^9 \dots 10^{10}$	10...25	$5 \cdot 10^{-3}$	3...5
Силоксановий	$10^{14} \dots 10^{16}$	20...25	$(1 \dots 50) \cdot 10^{-3}$	3...5
Термопласти				
ПВХ-пластики	$10^{11} \dots 10^{14}$	14...20	$(50 \dots 90) \cdot 10^{-3}$	3...10
Поліетилен	$10^{15} \dots 10^{17}$	18...30	$(0,1 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$	2,3
Зшитий поліетилен	більше 10^{15}	25...98	$0,3 \cdot 10^{-3}$	2,3...2,4
Поліпропілен та його сополімери	$10^{14} \dots 10^{15}$	25...30	$(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$	2,3...2,4
Фторопласти: ПВДФ (Ф-2) ПТФЕ (Ф-4)	більше 10^{14} більше 10^{16}	10...37 20...30	$(10 \dots 20) \cdot 10^{-3}$ $(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$	7,5...13 2,0
Термопластичні еластоміри				
Олефінові (Santoprene, ТЕП ПП 305К-М та ін.)	$10^{13} \dots 10^{15}$	25...40	$(0,2 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$	2,3...2,4
Стирольні (Tefabloc тощо)	більше 10^{14}	20...30	$(0,3 \dots 1,4) \cdot 10^{-3}$	2,4...2,5
Уретанові (Elastollan та ін.)	більше 10^{12}	15...25	$(40 \dots 90) \cdot 10^{-3}$	3...6
Сополіефірні (Amitel, Ннекуд тощо)	$10^{11} \dots 10^{14}$	15...20	$(40 \dots 80) \cdot 10^{-3}$	3...5

Вінілові (Tefanyl, ТПВЕ «Тамерлен», ТЕП-ПВХ тощо)	$10^9 \dots 10^{11}$	15...20	$(40 \dots 100) \cdot 10^{-3}$	3...5
---	----------------------	---------	--------------------------------	-------

Однак, з появою полімерних матеріалів, що складаються з насичених вуглеводневих макромолекул і, отже, мають більш високу тепло-, озono-, вологостійкість і з стабільнішими електричними параметрами, зазначені еластomersи все частіше витісняються поліолефінами та етиленпропіленовим каучуком. Слід згадати про бутил-каучук - популярний ізоляційний компаунд для кабелів середньої напруги в період 1940-1950 років [9].

Етилен-іропілен-дієнові каучуки (СКЕПТ), особливо нові марки, отримані на металоцінних каталізаторах - найбільш поширені у світовій кабельній промисловості ізоляційні еластomersи. Застосовуються з початку 1960-х років як конкурент зшитой поліетиленової ізоляції для силових кабелів напругою до 35 кВ. Відрізняються гарною еластичністю, підвищеною озono- та атмосферостійкістю, але недостатня термо-, волого- та триінгостійкість обмежує їх використання в кабелях вище 138 кВ [5].

Серед захисних (оболонкових) покриттів кабельних виробів необхідно відзначити ряд полярних каучуків, що відрізняються високою хімічною стійкістю до дії нафтопродуктів та інших агресивних середовищ. Хлоропренову, а пізніше і нітрильну гуми досить широко застосовують із середини ХХ століття як оболонку телефонних, шахтних, нафтозавантажувальних та ін електрокабелів. Однак рівень їх споживання останні 10...15 років не зростає, оскільки вони програють за теплостійкістю щодо більш новим оболонковим компаундам на базі хлорованих та хлорсульфованих поліолефінів [10].

У таблиці 2.1 представлені основні властивості діелектричних матеріалів, що застосовуються нині у кабельній техніці.

Головними полімерними матеріалами для виробництва кабельної продукції у світі на сьогоднішній день є поліолефіни. При цьому в кабельній галузі країн СНД найбільш поширеними залишаються ПВХ-пластикати (понад 60% від загального обсягу полімерів, що споживаються), за ними йдуть

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

поліетиленові компаунди (всього близько 37 %, у тому числі: на базі поліетилену низької щільності (ПЕНП) або ПВД) - 21%, поліетилену високої щільності (ПЕВГ1 або ПНД) - 9%, і композиції, що зшиваються (7%) [5].

2.2 Поліетилен

2.2.1. Властивості поліетилену з низькою молекулярною масою

Термопластичний полімер білого кольору, хімічна формула має вигляд $[-CH_2-CH_2-]_n$. Макромолекули є лінійними утвореннями з невеликою кількістю бічних відгалужень. За технологією отримання розрізняють такі марки поліетилену [8]:

- Поліетилен високого тиску (ПЕВТ) або низької щільності.

Отримують полімеризацією етилену (C_2H_4) при високому тиску (130...250 МПа і високій температурі 190...300 °С) протягом 30...100 с у присутності каталізаторів (кисень, органічні перекиси) по радикальному механізму.

- Поліетилен низького тиску (ПЕНТ) або високої щільності.

Одержують полімеризацією етилену (C_2H_4) за іонним механізмом при низькому тиску (близько 1МПа та температурі 80 °С) у присутності ініціаторів (кисень, органічні перекиси).

- Поліетилен середнього тиску (ПЕСТ) або високої щільності. Отримують полімеризацією етилену (C_2H_4) за іонним механізмом при середньому тиску (3...4МПа і температурі нижче 160 °С у присутності каталізаторів (оксидів металів)).

Поліетилен (ПЕ) відрізняється від інших термопластів високою міцністю, достатньою еластичністю, широким інтервалом робочих температур (від -120 до +100 °С). Для ПЕ характерна мала температурна зміна властивостей: при $T =$ (від -40 до +110) $\text{tg}\delta$ дорівнює $(2...4) \cdot 10^{-4}$, $E_{\text{пр}} = 40...30$ МВ/м. Ступінь кристалічності ПЕВП $\sim 70...85\%$, ПЕНП - 60%.

Нестабілізований ПЕ при нагріванні на повітрі піддається термоокислювальній деструкції (термостаріння), а під впливом сонячної радіації - фотостарінню. Обидва процеси протікають ланцюговим радикальним механізмом.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Термостаріння супроводжується виділенням альдегідів, кетонів, перекису водню та інших продуктів. В результаті погіршуються діелектричні та механічні характеристики. При фотостарінні відбуваються як деструктивні, так і процеси, що структурують. Відносна швидкість структурування під впливом світла значно вище, ніж під впливом тепла. Особливо чутливий поліетилен до впливу УФ-променів. Нагрівостійкість ПЕ підвищують шляхом радіаційного, пероксидного або силанольного зшивання. Зшитий ПЕ мало деформується і залишається досить еластичним після тривалого перебування при температурі 130 °С, має хорошу стійкість до стирання, до агресивних середовищ, міцний на розрив, стійкий до старіння в атмосферних умовах і зберігає достатню гнучкість при низьких температурах. Стійкість до дії УФ-випромінювання підвищують додаванням до складу полімерної композиції сажі.

Для ізоляції та оболонок кабелів і проводів застосовуються композиції ПЕ на базі ПЕНП та ПЕВП. Позначення композиції складається з найменування матеріалу «ПЕ», трьох перших цифр позначення базової марки Г1Е, номера рецептури добавок, написаного через тире, та літери К, що означає застосування композиції в кабельній промисловості. Після позначення марки композиції вказується сорт. На основі базових марок вищого та першого сорту ПЕНП 10203-003, 10702-020, 15303-003 і 17802-015 і рецептур добавок 01, 02, 04, 05, 09 і 10 випускаються композиції. Композиції ПЕВП випускаються на основі базових марок ПЕ 20406-007 і 20606-012 і рецептур добавок 07-12, 19 і 2 [11].

ПЕ інертний до дії багатьох хімічних реагентів. Хімічестійкість залежить від молекулярної маси, ММР та щільності. Визначальний показник - щільність, з її збільшенням хімічестійкість зростає.

Введенням у ПЕ сполук фтору, хлору або окису сурми, сурм'яно-органічних сполук знижується горіння ПЕ (самозагасаючий ПЕ). Композиції ПЕ з поліізобутиленом, ацетиленовою сажею та стеариноювою кислотою використовуються як напівпровідні екрани кабелів з ПЕ ізоляцією. Композиції ПЕ зі стабілізуючими добавками є основним матеріалом для ізоляції радіочастотних

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

кабелів, кабелів зв'язку та сигнально-блокувальних кабелів, а також широко використовуються для ізоляції силових та контрольних кабелів [12].

Для запобігання погіршенню електричних властивостей при старінні ПЕ вводять антиоксиданти (аміни, алкілфеноли та ін.) ПЕ переробляється при (120...280 ° С) усіма методами переробки термопластів [9].

2.2.2 Сополімери етилену (СЕ)

Найбільш широко в електроізоляційній техніці застосовуються сополімери етилену з пропіленом (СЕР) [5]. Зі збільшенням в СЕР пропілену знижуються: кристалічність, щільність, модуль пружності, температура плавлення, але збільшуються: газо- і паропроникність, розчинність в органічних розчинниках, еластичність, ударна в'язкість, стійкість до розтріскування. Електроізоляційні матеріали на основі СЕР еластичні, характеризуються хорошими механічними та електричними властивостями, але вони горючі.

2.2.3 Надвисокомолекулярний поліетилен (СВМПЕ)

Відносно нещодавно координаційною полімеризацією на комплексних металоорганічних каталізаторах синтезовано надвисокомолекулярний ПЕ (СВМПЕ) з молекулярною масою понад 10^6 . Цей матеріал має комплекс унікальних властивостей.

Це четвертий різновид поліетилену СВМПЕ-поліетилен з молекулярною масою понад $1,5 \cdot 10^6$ г/моль. Надвисока молекулярна маса цього полімеру визначає його унікальні фізико-механічні властивості, що різко відрізняють його від інших марок поліетилену [7].

Зокрема СВМПЕ володіє:

- підвищеною жорсткістю та виключно високою ударною міцністю;
- високою зносостійкістю;
- низьким коефіцієнтом тертя, лише на рівні фторопласта;
- високою корозійною стійкістю;
- високою морозостійкістю.

Можливість отримання надміцних ниток, що перевищують за своїми показниками міцності нитки з усіх відомих матеріалів.

У цілому СВМПЕ можна визначити як конструкційний полімерний матеріал з унікальними фізико-механічними властивостями для різноманітних областей застосування. Надвисока молекулярна маса цього полімеру, що визначає його унікальні фізико-механічні властивості, одночасно викликає обмеження в переробці цього полімеру. Порівняння фізико-механічних властивостей різних марок поліетилену представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні властивості поліетилену

Властивості	ПЕНП (ПЕВП)	ПЕВП		СВМПЕ
		ПЕНД	ПЕСД	
Щільність, кг/м	918...935	945...955	960...970	940
Температура плавлення, °С	105...115	130...135	130...135	125...135
Температура розм'якшення, °С	60...65	80...90	80...100	110...120
Молекулярна маса промислових марок, 10^4	2...5	7...350	4...7	350...600
Модуль пружності при згинанні, МПа	80...260	1000...1200	1070...1100	1070...1100
Руйнівна напруга, МПа, при:				
розтягуванні	10...16	22...32	25...38	28...32
згині	12...17	20...35	25...40	30...40
Відносне подовження, %	150...600	400...800	200...800	400...500
Ударна в'язкість, кДж/м ²	Зразок не ламається			
Твердість по Брінеллю, МПа	15...25	45...60	55...60	40...50
Питома теплоємність, кДж/(кг·К)	2,1...2,8	2,3...2,7	2,3...2,7	2,5...2,9
Коефіцієнт температуропровідності, Вт/(м·К)	0,2...0,3	0,27	0,27	0,28
Коефіцієнт лінійного розширення, 10^4 град ⁻¹	2,2...2,5	2	2	2
Показник плинності розплаву, г/10 хв	0,2...20	0,1...15	0,2...10	0,2...0,3

При негативних температурах у СВМПЕ відносно подовження при розриві значно вище, ніж у стандартного ПЕ. Він як би є більш гнучким полімером, а, отже, і морозостійкішим. При позитивній температурі картина змінюється, СВМПЕ стає менш гнучким. Має хороші антифрикційні властивості, близькі до властивостей фторопласту-42 та поліаміду П-68. Коефіцієнт тертя СВМПЕ також дорівнює коефіцієнту тертя фторопласту та поліаміду. Зносостійкість СВМПЕ вдвічі перевищує зносостійкість інших марок ПЕНД.

Висока в'язкість розплаву СВМПЕ дозволяє використовувати звичайні для термопластів методи переробки.

Процес виробництва СВМПЕ аналогічний процесу полімеризації ПЕНД.

Електричні властивості СВМПЕ: ρ_v - 017 Ом·см; $\operatorname{tg}\delta$ - $2 \cdot 10^{-4}$; ϵ - 2,3; $E_{пр}$ - 50...55 кВ/мм [7].

2.2.4 Технології одержання зшитого поліетилену

В даний час найпоширенішим матеріалом для кабельної ізоляції є поліетилен. Головний недолік ізоляції кабелів з поліетилену є втрата формостійкості і погіршення механічних властивостей при температурах, близьких до температури плавлення поліетилену (125...128 °С). Вироби з поліетилену низького та середнього тиску мають робочу температуру 70...80 °С, що пояснюються лінійною будовою макромолекул. Пошук шляхів збільшення стійкості ПЕ призвів до ідеї зшивки, яка була реалізована ще у 70-х р. ХХ ст. Спочатку вона проводилася шляхом опромінення променями (радіаційна зшивка).

Радіаційна технологія визначається в наступному. Опромінення електронами поліетилену при помірній температурі не вимагає добавки будь-яких речовин. На практиці труба багато разів проходить через лінійний прискорювач. Чим більша доза, тим більша частка зшивки. Отримані структури зшитого поліетилену і термомеханічні властивості відрізняються один від одного при різних технологіях.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Технологія силанової зшивки макромолекул поліетилену народилася наприкінці 60-х років минулого століття. До теперішнього часу розроблено два різновиди: monosil і sioplas [5].

Monosil-технологія вводить вінілсілан у поліетилен в момент звичайної екструзії поліетилену. У sioplas-технології використовується вже готова суміш поліетилену, що поставляється виробником поліетилену з силаном - поліетилен + вінілсілан + пероксид. У цю суміш додається каучук-каталізатор (прискорювач), все це подається в екструдер для переробки матеріалу. В обох випадках виріб з поліетилену на виході з екструдера «доходить» до кондиції в паровій бані при високій температурі протягом декількох годин, де і відбувається процес зшивки (вже в твердій фазі) завдяки дифузії вологи всередину матеріалу (вода реагує з силаном, утворюючи активні групи – радикали, які і зшивають молекули поліетилену). Тут зшивка відбувається за температур нижче температури плавлення поліетилену.

Головне в monosil, порівняно з sioplas-технологією, - адсорбція рідкого силану пористим полімерним носієм. У цьому головна причина покращення диспергування силану, що забезпечує можливість виробництва об'ємних виробів.

Вироби, отримані за цією технологією, витримують до 110°C. Максимальна частка зшивки визначається кількістю вініл-силану та часом витримки в паровій лазні.

Існує також пероксидна технологія. Пероксиди - деякі хімікалії, що активуються за підвищеної температури, породжуючи вільні радикали. Радикал відриває атом водню від атома вуглецю в поліетиленовому ланцюгу, залишаючи РЕ-радикал.

Така активна молекула може з'єднатися з аналогічною та утворювати зв'язок, тобто зшивку. Найпопулярніший пероксид - 2,5-dimethyl-2,5-di-(butylperoxy) hexane. При кімнатній температурі він знаходиться в рідкій фазі, але може адсорбуватися на великій різноманітності поверхонь. При високій (180...220°C) температурі розкладається, утворюючи вільні радикали.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

2.2.5 Кабелі силові, з ізоляцією із силаносшитого поліетилену

Світові тенденції розвитку кабельних енергорозподільчих мереж протягом останніх десятиліть спрямовані на впровадження кабелів із теплостійкою екструдованою ізоляцією (зшитий поліетилен та етилен-пропіленова гума) та заміну ними кабелів із паперовою просоченою ізоляцією. В даний час у промислово розвинених країнах Європи та Америки практично 100% ринку силових кабелів займають кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену [5].

Перехід від кабелів з паперовою просоченою ізоляцією до кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену (СПЕ) пов'язаний з зростаючими вимогами експлуатуючих організацій до технічних параметрів кабелів. У цьому відношенні переваги кабелів із СПЕ очевидні. Перерахуємо тільки деякі з них: висока пропускна здатність, низька вага, менший діаметр і радіус вигину, низька ушкоджувальність, поліетиленова ізоляція має малу щільність, володіє малими значеннями відносної діелектричної проникності та коефіцієнта діелектричних втрат, прокладання на складних трасах, монтаж без використання спеціального обладнання, собівартість прокладання.

Застосування даних кабелів у порівнянні з традиційними в полівінілхлоридній ізоляції дозволяє використовувати жили меншого перерізу для передачі рівного потоку, збільшити допустиму температуру нагріву жил кабелів до 90 °С, збільшити тривало допустиму температуру нагрівання жил кабелів при короткому замиканні до 250 °С [12].

Своїми унікальними властивостями кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену зобов'язані ізоляційному матеріалу, що застосовується. Поліетилен нині один із найпоширеніших ізоляційних матеріалів під час виробництва кабелів. Але спочатку термопластичному поліетилену притаманні серйозні недоліки, головним із яких є різке погіршення механічних властивостей при температурах, близьких до температури плавлення. Вирішенням цієї проблеми стало застосування зшитого поліетилену. Поперечні зв'язки, що утворюються в процесі

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

зшивки між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка визначає високі характеристики матеріалу.

Конструкція кабелів із ізоляцією із СПЕ значно відрізняється від традиційних кабелів із паперовою ізоляцією. Кабелі випускаються з багатодротяною круглою мідною або алюмінієвою жилою, а застосування різних типів оболонок і можливість герметизації дозволяє використовувати кабель як для прокладання в землі, так і для кабельних споруд, у тому числі при груповій прокладці. При прокладанні в землі застосовується оболонка з поліетилену високої щільності, що забезпечує необхідний захист кабелю від механічних ушкоджень як при прокладці, так і в процесі експлуатації. Якщо необхідна герметизація екрану, використовуються два розділові шари водоблокуючих стрічок під і поверх мідного екрану, що накладаються з перекриттям. При прокладанні кабелю в кабельних спорудах застосовується оболонка із ПВХ – пластикату зниженої горючості.

За сумою факторів, кабелі з ізоляцією із СПЕ більш надійні в експлуатації, вимагають менших витрат на монтаж, реконструкцію та утримання кабельних ліній. Це підтверджує майже сорокарічний досвід експлуатації таких кабелів у більшості промислово розвинених країн. Наприклад, за даними зарубіжних джерел, відсоток пробоїв кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену на два-три порядки менший, ніж у кабелів із паперово-просоченою ізоляцією [11].

Зараз у США та Канаді частка кабелів з ізоляцією із СПЕ становить 85%, у Німеччині та Данії – 95 %, а в Японії, Франції, Фінляндії та Швеції у розподільчих мережах середньої напруги використовується лише кабель із ізоляцією із СПЕ [5].

2.3 Полівінілхлорид (ПВХ)

Полівінілхлоридний пластикат, що застосовується в кабельній промисловості, являє собою суміш полівінілхлоридної смоли (полівінілхлориду), одержуваної полімеризацією хлористого вінілу ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$), з пластифікаторами, стабілізаторами, наповнювачами та іншими компонентами. У кабельної техніці

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

використовують ПВХ, молекулярна маса якого 60000...100000. Відсутність подвійних зв'язків та наявність атомів хлору робить ПВХ стійким до кислот та лугів, озоностійким та негорючим матеріалом. При додаванні до полівінілхлоридної смоли пластифікаторів, стабілізаторів та інших компонентів підвищуються її механічні та технологічні властивості, але знижується діелектрика.

Полівінілхлоридні пластмаси, що застосовуються в кабельній промисловості, за своїми властивостями і вимогами, що висуваються до них, можна розділити на три основні групи:

- ізоляційні, що мають високі електричні характеристики в діапазоні робочих температур;
- шлангові, що захищають основні конструктивні елементи кабелю від впливу довкілля;
- напівпровідні, що займають за своїми електричними характеристиками проміжне місце між діелектриком та провідником.

Фізико-механічні характеристики ПВХ-пластмас в основному визначаються відсотковим вмістом у рецептурі пластифікаторів.

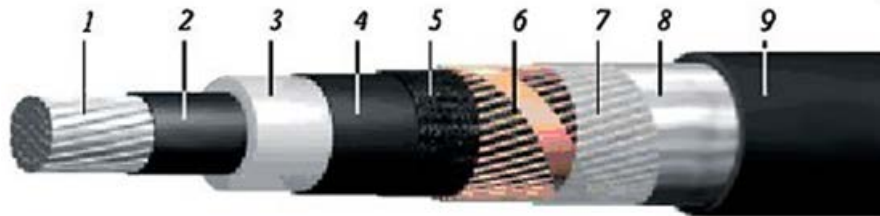
Зокрема, максимальне відносне подовження при розтягуванні одержують при вмісті 45...70 мас. ч. пластифікатора. Кількість та рецептура пластифікатора також істотно впливають на питомий об'ємний електричний опір (ρ_v) ПВХ-пластмаси. Зі збільшенням відсоткового вмісту пластифікатора ρ_v пластмаси зменшується, оскільки ПВХ має $\rho_v = 10^{15} \dots 10^{17}$ Ом·см, у пластифікатора $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{14}$ Ом·см. Тому в ізоляційних рецептурах кількість пластифікатора не повинна перевищувати 40...45 % [10].

2.4 Основні дефекти в ізоляції кабелів при виробництві та експлуатації

Термін служби кабелю залежить як від технології виробництва, так і від правильної експлуатації. Поліетиленову ізоляцію кабелів наносять на екструдерах. Головні вимоги до технології накладання ізоляції: вона має бути монолітною, не містити сторонніх включень та порожнеч. Кабелі на середню та

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

високу напругу містять екрани з напівпровідного поліетилену (рис. 2.1). Між ізоляцією та напівпровідним екраном не повинно бути відшарування, інакше в порожнинах виникне іонізація [13]. Хороша адгезія між напівпровідним екраном та ізоляцією досягається їх одночасним накладенням.



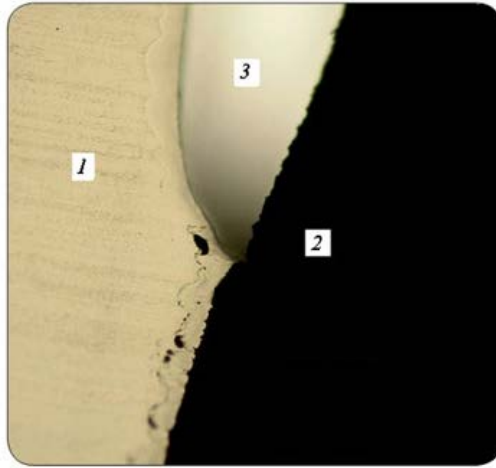
- 1 – алюмінієва кругла багатодротяна струмопровідна жила; 2 – екран по жилі з зшитого поліетилену; 3 – ізоляція із сшитого поліетилену; 4 – екран по ізоляції із сшитого поліетилену; 5 – роздільний шар з електропровідної водоблокувальної стрічки; 6 – екран з мідних дрітків; 7 – роздільний шар з водоблокувальної стрічки; 8 – шар алюмополімерної стрічки; 9 – поліетиленова оболонка

Рисунок 2.1 – Кабель на напругу 10 кВ

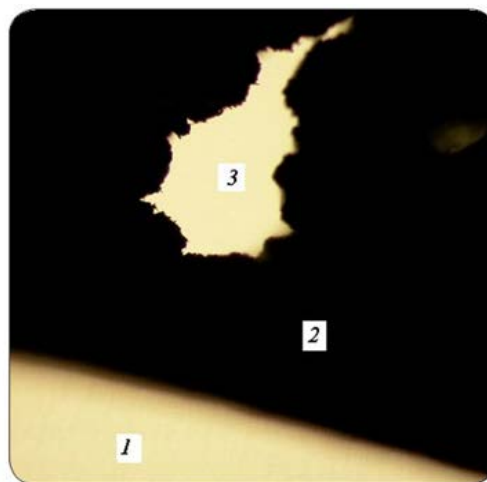
Існує достатньо видів дефектів які виникають в процесі виробництва. Кількість та розмір цих дефектів залежить від різних факторів: якості матеріалу, параметрів технологічного процесу, умови зберігання готової продукції.

При виробництві гранули поліетилену, що подаються в екструдер, повинні бути сухими. На рис. 2.2 і 2.3 показаний випадок, коли в екструдер були завантажені вологі гранули. Відбулося закипання води з утворенням порожнини у напівпровідному екрані (рис. 2.2) та відшарування ізоляції від напівпровідного екрану (рис. 2.3).

Велике значення при накладенні ізоляції має чистота вихідного матеріалу. Забруднення можуть потрапити до поліетилену як при полімеризації та виготовленні гранул, так і при завантаженні в екструдер. Більше того, при неправильному технологічному режимі роботи екструдера можливе підгоряння поліетилену.



1 – ізоляція; 2 – напівпровідний екран; 3 - порожнина
Рисунок 2.2 – Порожнина в напівпровідному екрані:



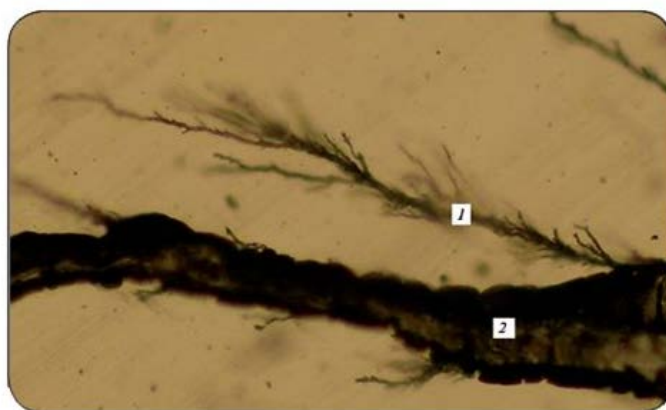
1 – ізоляція; 2 – напівпровідний екран; 3 – порожнина
Рисунок 2.3 – Відшарування ізоляції від напівпровідного екрану

На рис. 2.4 показані сторонні включення поліетиленової ізоляції при 100-кратному збільшенні та огляді в темнопільному мікроскопі. Такі включення сприяють розвитку трингів та пробою ізоляції (рис. 2.5).

Ще одним видом дефектів є неповне розплавлення поліетиленових гранул (рис. 2.6). На цій неоднорідності накопичуватимуться об'ємні заряди, які підвищують напруженість електричного поля та прискорять старіння ізоляції. Дефекти такого типу не виникають при правильному розрахунку режиму роботи екструдера.



Рисунок 2.4 – Сторонні включення в поліетиленовій ізоляції



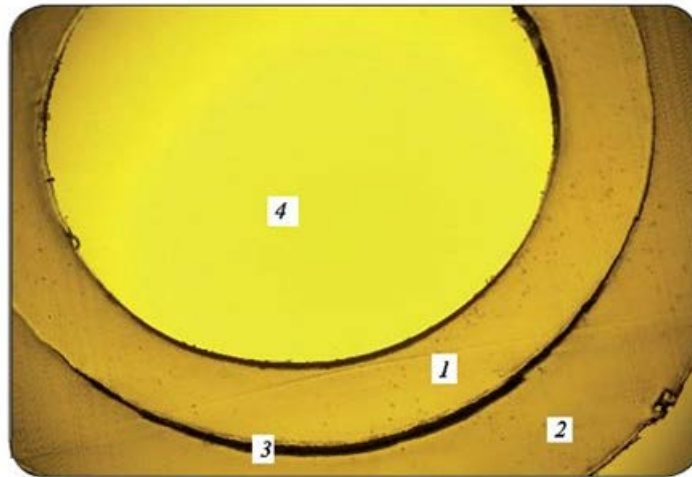
1 – триінги; 2 – канал пробою

Рисунок 2.5 – Пробій ізоляції



Рисунок 2.6 – Неоднорідність ізоляції визвана неповним розплавленням гранул поліетилену

У разі порушення технології накладення поліетиленової ізоляції в два шари на струмопровідні жили кабелів можливе забруднення поверхні ізоляції після накладання першого шару (рис. 2.7). Кабель з таким дефектом швидко виходить з ладу.



1 – перший шар; 2 – другий шар; 3 – забруднення; 4 – струмопровідна жила

Рисунок 2.7 – Забруднення поверхні ізоляції після накладення першого слою

Основними причинами виникнення вище перерахованих дефектів являються невисока якість сировини та порушення технології виробництва. Тому після накладання ізоляції в обов'язковому порядку необхідно проводити перевірку її цілісності.

З ДІАГНОСТУВАННЯ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ

3.1 Методи оцінки часткових розрядів

Важливим параметром кабельного виробу який визначає його експлуатаційні характеристики, є цілісність ізоляції. При підвищеній напруженості електричного поля в окремих елементах ізоляції можуть відбуватися розряди (пробій), які призводять до повного пробоею електроізоляційної конструкції [14]. Такі розряди отримали назву часткових розрядів (ЧР). Вони розвиваються головним чином у газових включеннях в діелектриці, у можливих технологічних дефектах [15].

Для оцінки стану ізоляції силових кабелів застосовуються різні методи випробувань та діагностики, у тому числі традиційно використовувані та нові сучасні методи. З метою забезпечення високої якості продукції на технологічній лінії кабельний виріб контролюється електроіскровим методом [16]. Суть цього методу полягає в тому, що при русі виробу по технологічній лінії до поверхні його ізоляції прикладається висока напруга за допомогою спеціального електрода, а струмопровідна жила, броня або екран заземлюється. При попаданні дефектної ділянки кабельного виробу у полі випробувань відбувається іскровий розряд, що фіксується електроіскровим дефектоскопом [17].

На сьогоднішній день найбільшого поширення набули методи реєстрації електричних імпульсів при ЧР. В електричній ізоляції готових виробів ЧР реєструють електричними методами. Схема, що ілюструє цей метод показана на рис. 3.1.

Сутність методу заключається в наступному. У момент, коли при підвищеній напруженості електричного поля виникає ударна іонізація та відбувається пробій газового включення C_3 , на час 10^{-7} с, то сумарна ємність зростає на ΔC_x . При зміні полярності електродів у наступний напівперіод відбувається новий спалах іонізації. Зазвичай число імпульсів за секунду пропорційно частоті f ($n = 4 \cdot k \cdot f$; $k = 1, 2, 3 \dots$).

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

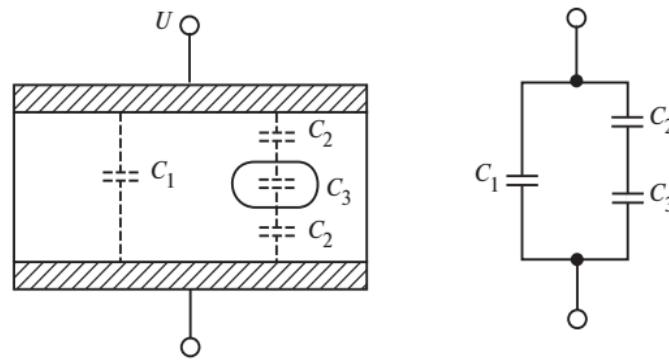


Рисунок 3.1 – Схема діелектрика із газовим включенням

При зміні ємності зразка C_x на ΔC_x відбувається зміна заряду ΔQ_x :

$$\Delta Q_x = U \Delta C_x,$$

де U - напруга на зразку.

Величину ΔQ_x називають зарядом одиничного ЧР, що здається.

Якщо послідовно C_x включений резистор, то зміна ємності на ΔC_x призведе до виникнення імпульсу напруги на C_x :

$$\Delta U_x = \frac{\Delta Q_x}{C} = \frac{U \Delta C_x}{C}.$$

Після посилення цей імпульс може бути вимірний реєструючим приладом Р.

Оскільки сигнал має форму короткочасного імпульсу, то спектр електромагнітних коливань, з яких він підсумовується, становить 20...2000 кГц. Для точного вимірювання кількості заряду або струму необхідно рівномірне посилення та реєстрація в цій області частот. У разі сильних перешкод або необхідності реєстрації ЧР використовують резонансні підсилювачі [18].

Середній струм часткових розрядів дорівнює:

$$I = \Delta Q_x n.$$

Для оцінки якості діелектрика іноді використовують значення потужності часткових розрядів, яка пропорційна ΔU_x^2 та сумарного заряду Q за час випробувань t .

Схеми приладів для дослідження ЧР при послідовному, паралельному та балансовому з'єднаннях показані на рис. 3.2, а-в.

В даних схемах як опір Z_u застосовується резистор або налаштований контур. Допускається застосування індуктивності або фільтра складнішої конструкції [16].

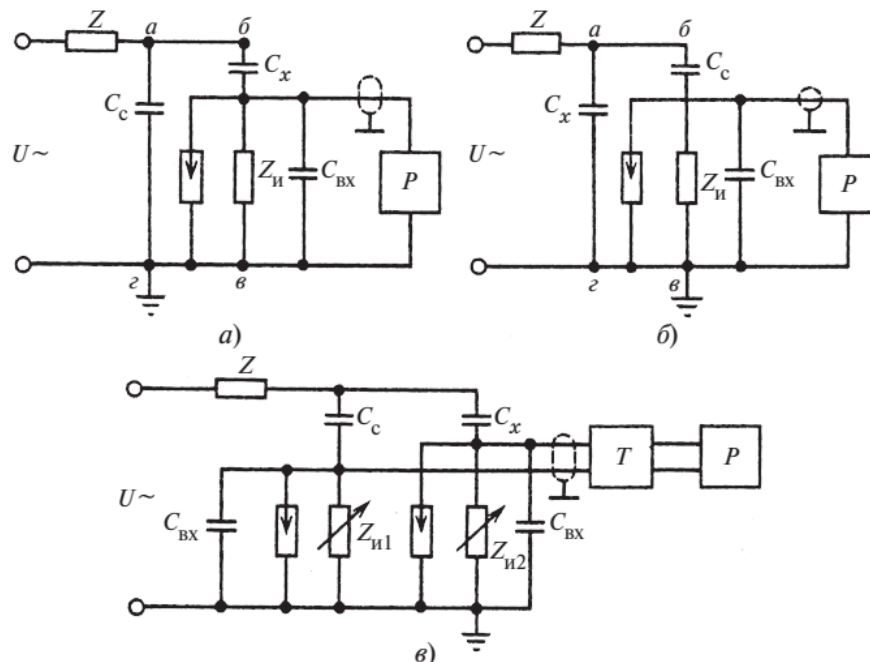


Рисунок 3.2 – Схеми приладів для дослідження часткових розрядів електричним методом

Як реєструючий прилад при вимірюванні ΔQ_x застосовують підсилювач, вимірювальний перетворювач (амплітудний вольтметр), осцилограф та вимірювач радіоперешкод. Для вимірювання параметрів імпульсів застосовують підсилювач, амплітудний дискримінатор, лічильник імпульсів.

При вимірюванні струму застосовують підсилювач, випрямляючий пристрій або вимірювач середніх значень.

На вході підсилювача встановлюють фільтр, що «зрізає» напругу з частотою менше 5...20 кГц. Коефіцієнт посилення досягає значень 10^6 зі ступенями регулювання 20 дБ. Оскільки згідно (3.2) чутливість вимірювань зменшується зі збільшенням C_x , то при великих значеннях C_x , а також за наявності перешкод застосовують вузькосмуговий підсилювач зі смугою пропускання Δf приблизно 8...10 кГц, при цьому частота посилення може змінюватися від 20 кГц до 2 МГц. В цьому випадку як Z_u застосовують резонансний контур, налаштований на частоту підсилювача.

При вимірах ЧР можливий пробій зразків, тому паралельно Z_u встановлюють розрядник. При послідовному з'єднанні (схема рис. 3.2, а) чутливість схеми трохи вище, однак у цьому випадку обидва електроди мають бути ізольовані від заземлення. Сполучний елемент C_c дозволяє при підключенні елемента індуктивністю L в якості Z_u налаштувати контур а - б - в - г в резонанс з частотою підсилювача і з частотою, на яку припадає максимум у спектрі частот імпульсу ЧР. Ємність C_c у поєднанні з Z_u може працювати як фільтр, що «зрізає» високочастотні перешкоди, що надходять з електричної мережі.

В якості Z_u застосовують захисний резистор або фільтр, що «зрізає» частоти понад 5...20 кГц.

При паралельному з'єднанні (рис. 3.2, б) конденсатор C_c служить для з'єднання зразка C_x з вимірювальним Z_u . Якщо в якості Z_u використовують індуктивність, то контур а - б - в - г може бути налаштований на резонанс, як і при послідовному з'єднанні. У цьому випадку один із електродів C_x заземлений.

У балансовій схемі рис. 3.2,в, якщо $C_c = C_x$ і $Z_{u1} = Z_{u2}$, повністю усуваються перешкоди, що надходять з електричної мережі та від трансформатора високої напруги. В цьому випадку при несиметричному вході Р необхідний узгоджуючий трансформатор Т.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо на виході реєструючого приладу необхідно створити напругу сигналів порядку 1 В, то при коефіцієнті посилення 10^6 можна реєструвати ΔU_x приблизно рівне 10^{-6} В. Тоді згідно (3.1) заряд ΔQ_x , який реєструє схема, становитиме $\Delta Q_x = C_x \Delta U_x$. Так, при ємності $C_x = 1000$ пФ (10^{-9} Ф), чутливість схеми складе 10^{-15} Кл. Зі збільшенням C_x чутливість схеми знижується. Однак унаслідок втрат енергії в елементах схеми (при цьому сигнал зменшується приблизно на порядок), а також внаслідок наявності перешкод чутливість схем рідко досягає 10^{-13} Кл [17].

Усі проводи у схемі, які знаходяться під високою напругою, повинні мати гладку поверхню та діаметр, що виключає виникнення корони. У сполучному конденсаторі та обмотці трансформатору високої напруги не повинні виникати власні ЧР. При цьому конденсатор C_c повинен бути обраний на напругу, що значно перевищує напругу при вимірах ЧР. Для задання випробувального напруження при вимірах ЧР виготовляють спеціальні трансформатори із обмотками без ЧР. При використанні звичайних трансформаторів слід використовувати його при зниженій напрузі, що не досягає номінального значення. Слід враховувати, що якість проведених вимірювань ЧР багато в чому залежить від усунення впливу перешкод.

Рівень перешкод при вимірах можна визначити експериментально. Для цього до схеми підключають зразок C_x , свідомо що не має ЧР при заданій напрузі. Поява показань приладу, що реєструє, при встановленій напрузі свідчить про виникнення перешкод.

У кабельній техніці необхідні дослідження ЧР, що з'являються в точках вздовж довжини кабелю. Особливо це важливо для кабелів високої напруги із полімерною ізоляцією. Схема таких вимірів показана на рис. 3.3. Металева ванна 1 заземлена та заповнена водою 2, очищеною від іонів за допомогою іонообмінних смол. При цьому питомий об'ємний опір води великий. До електрода 3, підведено високу напругу, жила кабелю з'єднана із заземленням через вимірювальний резистор Z_u . Електроди 4 заземлені. Оскільки діелектрична

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

проникність води велика, то майже вся напруга приходить на ізоляцію кабелю. Між ізоляцією кабелю та електродом 3 немає газових включень, і ЧР можуть розвиватися лише всередині кабелю. Пропускаючи кабель будівельної довжини через таку ванну можна знайти місце виникнення ЧР.

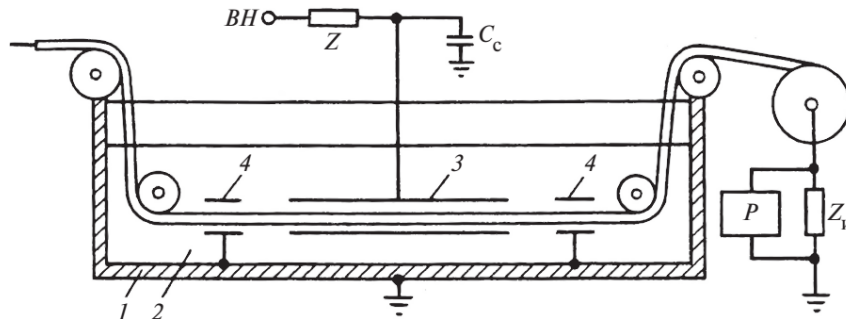


Рисунок 3.3 – Схема вимірювання часткових розрядів у кабелі

Існують схеми вимірювання ЧР у довгих кабелях при частоті близько 20 МГц. При цьому за різницею часу приходу імпульсу від місця його виникнення та при його відображенні від дальнього кінця кабелю судять про місце виникнення ЧР.

Часткові розряди малої інтенсивності можуть поступово згасати. Наявність таких ЧР при випробуваннях допустима. Якщо інтенсивність ЧР зростає, це свідчить про те, що через нетривалий час може статися пробій ізоляції.

Стійкість різних матеріалів до ЧР неоднакова. Наприклад, поліетилен швидко руйнується під дією ЧР, а скло чи фарфор – повільно. Залежність напрацювання t електроізоляційної конструкції від напруги U зазвичай підпорядковується степеневій закономірності $t = AU^n$, де A і n - постійні величини.

Фактором, що знижує достовірність контролю за рівнем ЧР, буде наявність коронних розрядів насамперед у місцях контакту високовольтного електрода випробувача та поверхні ізоляції.

Недоліком даного способу контролю є те, що багато «ненаскрізних» дефектів, що впливають на електричну міцність і зносостійкість ізоляції, електроіскровим методом не виявляються. Також до недоліку способу можна

віднести відсутність можливості отримання інформації про електричні властивості об'єкта контролю, які могли б підвищити точність визначення дефектів і забезпечити можливість вибору найбільш ефективних режимів роботи дефектоскопів.

3.2 Вдосконалений комплексний метод визначення стану ізоляції

Згадані вище дефекти в ізоляції, які не виявляються електроіскровим методом контролю, виявляють способом безперервного вимірювання ємності ділянок кабельних виробів.

При контролі погонної електричної ємності кабельний виріб проходить через циліндричний електрод, за допомогою якого подається низьковольтна напруга та вимірюється електрична ємність ділянки ізоляції. Для забезпечення електричного контакту між поверхнею ізоляції та електродом використовують воду охолоджуючої ванни. При проходженні дефекту через зону контролю значення погонної електричної ємності змінюється. За значенням ємності судять про властивості діелектрика.

Тому для підвищення достовірності було запропоновано об'єднати два існуючі методи контролю в один комплексний метод.

Запропонований комплексний метод контролю полягає у вимірюванні погонної електричної ємності при електроіскрових випробуваннях.

При електроіскровому методі контролю широко використовуються електроди із наборів кулькових ланцюгів (ланцюжкового, пружинного або щіткового), так як даний вид електродів має найвищі експлуатаційні характеристики [19]. За допомогою даного електрода висока випробувальна напруга прикладається до ізоляції поверхні. При проходженні дефекту через зону контролю відбувається електричний пробій, який реєструється автоматикою.

У запропонованому методі контролю на результат вимірювання сильно впливає розподіл електричного поля по поверхні об'єкта контролю. При зменшенні неоднорідності поля інформативність вимірів підвищується.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Для достовірного вимірювання електричної ємності необхідно, щоб випробувальна напруга була прикладена по всій поверхні зони контролю, а не тільки в місцях контакту ланцюжків електрода і поверхні ізоляції. В даному методі це можливо здійснити за рахунок високої випробувальної напруги [20].

Так як конструкція електрода являє собою набір ланцюжків, то поле в зоні контролю є неоднорідним (рис.3.4). При аналізі картини електричного поля в початковий момент часу (до виникнення іонізаційних процесів) було виявлено, що нормальна складова переважає над тангенціальною складовою електричного поля. Переважання нормальної складової електричного поля призводить до термічної іонізації, яка полегшує процес виникнення розряду.

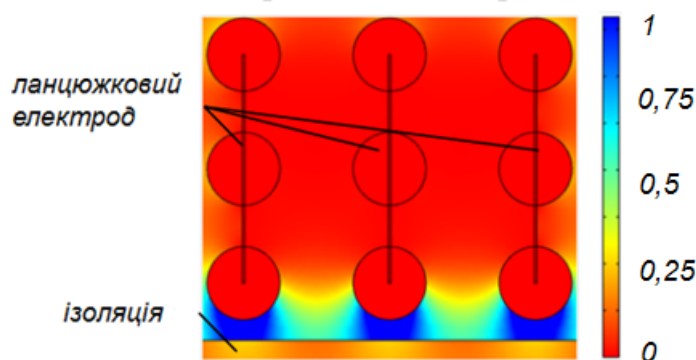


Рисунок 3.4 – Картина електричного поля між поверхнею ізоляції та ланцюжковим електродом (максимальна відносна напруженість дорівнює 1, мінімальна 0)

При цьому електричному полі виникає ковзний розряд. На поширення ковзного розряду впливають різні фактори: матеріал, стан поверхні ізоляції, тип та величина випробувальної напруги [21].

При збільшенні однорідності поля інформативність вимірів збільшується.

Визначаємо за допомогою нормального закону розподілу ймовірність точності діагнозу та інформативності контролю при постійній напрузі (1), при змінній напрузі з частотою 50 Гц (2), та при змінній напрузі з частотою 1 кГц (3).

Дати кількісні оцінки результату виміру та його випадкової похибки дозволяє теорія ймовірностей та математична статистика [22].

Похибку можна визначити як відхилення виміряного значення X від дійсного X_{∂} .

$$\Delta = X - X_{\partial}. \quad (3.1)$$

Для характеристики точності технічних пристроїв, що застосовуються при вимірюваннях, використовується поняття похибка засобу вимірювань, що представляє собою різницю між показанням засобу вимірювань та істинним значенням фізичної величини.

При прямих вимірах числове значення величини, що визначається, безпосередньо зчитується з показань приладу. Якщо за повторних вимірах (n) однієї й тієї ж величини X виходять різні значення X_i , їх сукупність може розраховуватися як вибірка випадкових величин: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. Тоді як найбільш ймовірну оцінку значення вимірюваної величини в цьому випадку зазвичай беруть вибіркове середнє (середнє арифметичне значення).

Різниця між середнім значенням X вимірюваної величини та значеннями (x_i), отриманими при визначенні окремих вимірювань називають одиничним відхиленням або відхиленням окремих вимірів від середнього арифметичного або абсолютними помилками одиничного відхилення, та визначають як:

$$\Delta X_i = \bar{X} - X_i \quad (3.2)$$

Для визначення середньої абсолютної помилки результату беруть середнє арифметичне абсолютне значення (модулів) окремих помилок:

$$\Delta X = \frac{|\bar{X} - X_1| + |\bar{X} - X_2| + \dots + |\bar{X} - X_n|}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.3)$$

Відношення середньої абсолютної помилки результатів виміру до його середнього арифметичного значення дає середню відносну помилку вимірювання,

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

тобто:

$$E = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

З теорії помилок відомо, що щільність розподілу випадкових помилок залежить від їхньої величини і виражається формулою нормального розподілу (або закону Гауса) [23]:

$$f_{X,\sigma} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\bar{X}-X_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

де X_i – справжнє (середньоарифметичне) значення вимірюваної величини;
 σ – середня квадратична похибка.

Дисперсію генеральної сукупності для n знайдених значень $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ випадкових величин знаходимо за формулою:

$$\sigma^2(S^2) = \frac{(\bar{X} - X_1)^2 + (\bar{X} - X_2)^2 + \dots + (\bar{X} - X_n)^2}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2 \quad (3.6)$$

Вона характеризує рівень розкиду X_i навколо X (рис. 3.5).

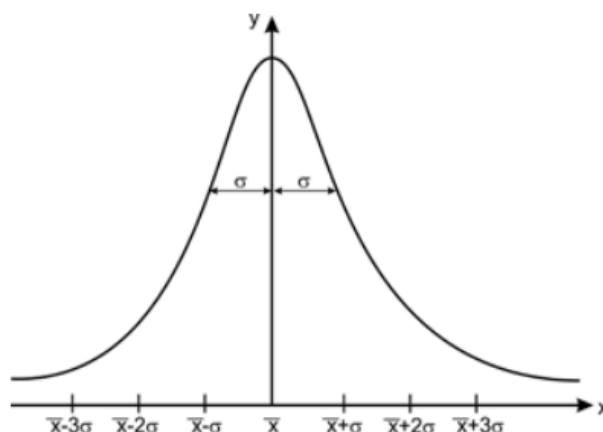


Рисунок 3.5 – Крива нормального розподілу помилок

Стандартне відхилення, середню квадратичну помилку окремого виміру знаходять за такою формулою:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{(\bar{X} - X_1)^2 + (\bar{X} - X_2)^2 + \dots (\bar{X} - X_n)^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2} \quad (3.7)$$

Відносна середня квадратична помилка виміру, виражена у відсотках, називається коефіцієнтом варіації:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (3.8)$$

З рис. 3.5 видно, що максимум густини розподілу випадкових помилок відповідає середньому значенню $\bar{X}$ всіх σ результатів вимірювань. Від цієї точки крива симетрично опускається ліворуч і праворуч, тобто позитивні та негативні помилки однієї величини зустрічаються однаково часто. На кривій є дві точки перегину, відстань яких значення $\bar{X}$ по осі абсцис називається стандартним відхиленням σ . Стандартне відхилення характеризує відтворюваність методу виміру. Чим менше σ , тим менший розкид даних.

Ймовірність $P(k)$ іноді називають надійністю. Отже, для характеристики випадкової похибки необхідно вказати два числа: саму похибку, тобто півширину довірчого інтервалу ΔX або DX , і пов'язану з нею довірчу ймовірність $P(k)$. У технічних вимірах довірчу ймовірність приймають рівну $P = 0,95$; у науково-дослідних дослідженнях $P = 0,68$, тобто вказують середню квадратичну похибку (стандартне відхилення середнього результату), яка обчислюється:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}, \quad (3.9)$$

і тоді вимірювання похибок середнього значення обчислюють за такою формулою:

$$\Delta \bar{X} = K \cdot \sigma_{\bar{X}} = \frac{K \cdot \sigma}{\sqrt{n}} = K \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}. \quad (3.10)$$

Результати розрахунку визначення точності діагнозу при вимірюванні ємності кабелю при постійній напрузі, при змінній напрузі з частотою 50 Гц та з частотою 1 кГц по формулами (3.1)...(3.10) представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку визначення точності діагнозу

Параметри	Вимірювання ємності кабелю		
	При постійній напрузі	При змінній напрузі з частотою 50 Гц	При змінній напрузі з частотою 1 кГц
Погонна ємність при досліді 1, пФ/м	310	295	305
Погонна ємність при досліді 2, пФ/м	275	280	295
Погонна ємність при досліді 3, пФ/м	290	305	285
Погонна ємність при досліді 4, пФ/м	265	275	290
Погонна ємність при досліді 5, пФ/м	270	280	300
Середнє значення погонної ємності, пФ/м	282	287	295
Середнє арифметичне абсолютне значення (модулів) окремих помилок, ΔX , пФ/м	14,4	10,4	6
Середня відносна помилка вимірювання, E , %	5,11	3,62	2,03
Дисперсія генеральної сукупності, σ^2	266,00	126,00	50,00
Середня квадратична помилка, σ	16,31	11,22	7,07
Відносна середня квадратична помилка, V , %	5,78	3,91	2,40
Стандартне відхилення середнього результату, $\sigma_{\bar{X}}$	7,29	5,02	3,16

По результатам розрахунків з табл. 3.1 видно, що точність діагнозу та інформативність контролю при змінній напрузі з частотою 1 кГц вище, у порівнянні з іншими експериментами, так як середня відносна помилка вимірювання (2,03 %) та відносна середня квадратична помилка (2,40 %) при даних дослідях мають найменше значення.

Згідно з формулою Теплера на довжину ковзного розряду надає значний вплив величина напруги та питома поверхнева ємність. Під час проведення експериментів були отримані залежності розподілу випробувальної напруги на поверхні ізоляції (рис. 3.6).

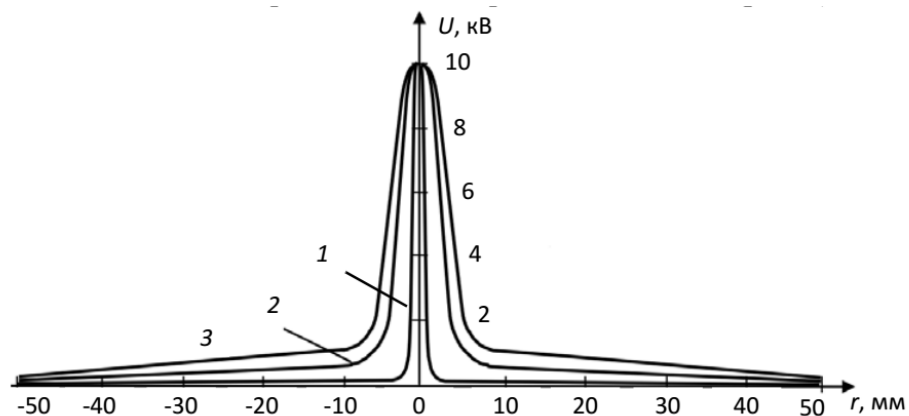


Рисунок 3.6 – Розподіл напруги на поверхні ізоляції при постійній напрузі (1) та при змінній напрузі з частотою 50 Гц (2), 1 кГц (3)

При аналізі отриманих залежностей для випробувальної напруги величиною 3, 10 і 15 кВ можна відзначити, що помітний розподіл потенціалу по поверхні присутній тільки при змінній напрузі. Це виникає за рахунок питомої поверхневої ємності ізоляційного матеріалу, що підтверджує формула теплоізоляції. На поширення розряду при постійній випробувальній напрузі питома поверхнева ємність не робить значного впливу і розряд, що виникає в даному випадку, є схожим з розрядом в повітряному проміжку.

На основі одержаних залежностей розподілу напруги теоретично було знайдено залежність подовження електрода, за допомогою якого подавалася випробувальна напруга, від типу та величини напруги (рис.3.7).

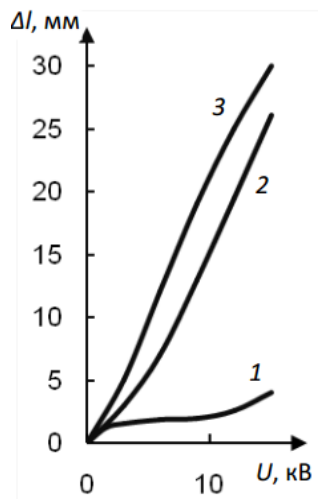


Рисунок 3.7 – Залежність подовження електрода від величини постійної (1) та змінної напруги із частотою 50 Гц (2), 1 кГц (3)

Якщо допустити зв'язок розподілу напруги та довжини ковзного розряду, то можна відзначити, що значний вплив на подовження електрода має величина прикладеної змінної напруги. При постійній напрузі виявлено лише невелике подовження електрода.

Аналіз наведених результатів дослідження показує, що за рахунок виникнення ковзних розрядів можливе забезпечення електричного контакту між електродом і поверхнею ізоляції не тільки в місцях торкання ланцюжків електрода, а по всій довжині зони контролю при використанні змінної напруги. Таким чином, збільшення однорідності поля призведе до підвищення інформативності контролю при виміру погонної ємності. Об'єднання ж контролю погонної електричної ємності і електроіскрового методу контролю дасть можливість більш точного та якісного визначення дефектів в ізоляції кабелю.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі виконано дослідження ефективності сучасної ізоляції кабелю та визначено основні дефекти в ізоляції кабелів які виникають при виробництві, що приводить до випадків браку продукції.

В даний час при виробництві кабельних виробів використовують два методи контролю: контроль погонної електричної ємності і електроіскровий метод контролю. Визначено, що окремо дані методи не дозволяють виявляти деякі види дефектів, і, тим самим, знижують достовірність проведеного контролю. Тому для підвищення достовірності було рекомендовано об'єднати два існуючі методи контролю в один комплексний метод.

В роботі визначено, що для достовірного вимірювання електричної ємності необхідно, щоб випробувальна напруга була впроваджена по всій поверхні зони контролю, а не тільки в місцях контакту ланцюжків електрода і поверхні ізоляції. В даному методі це рекомендовано здійснити за рахунок високої випробувальної напруги.

На основі отриманих результатів розраховані залежності еквівалентного подовження вимірювального електрода від зміни амплітуди та частоти вимірювальної напруги. Визначено, що значний вплив на подовження електрода надає величина прикладеної змінної напруги. При постійній напрузі виявлено тільки невелике подовження електрода.

Аналіз наведених результатів показує, що за рахунок прикладення змінної напруги та виникнення ковзних розрядів можливе забезпечення електричного контакту між електродом і поверхнею ізоляції не тільки в місцях торкання ланцюжків електрода, а по всій довжині зони контролю. Це веде до збільшення однорідності електричного поля між поверхнею ізоляції та ланцюжковим електродом і в результаті до підвищення точності вимірювання питомої ємності.

Виконані розрахунки показали, що точність діагнозу та інформативність контролю при змінній напрузі з частотою 1 кГц вище, у порівнянні з іншими

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

експериментами, так як середня відносна помилка вимірювання (2,03 %) та відносна середня квадратична помилка (2,40 %) при даних дослідях мають найменше значення, а визначення ємності кабелю в даному випадку буде найбільш точним.

Тому визначення стану ізоляції кабелю при поєднанні контролю погонної електричної ємності та електроіскровому методі контролю дасть можливість визначення більшої кількості дефектів та забезпечить точність діагнозу та інформативність контролю результатів вимірювання на досить високому рівні.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сапожников В. В. Основы технической диагностики: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М.: Маршрут, 2004. – 318 с.
2. Швалов Д. В. Основы технической диагностики: учебное пособие / Д. В. Швалов, В. Н. Прокопец, А. И. Кирюнин. – Ростов-на -Дону: РГУПС, 2019. – 76 с.
3. Сафарбаков А. М. Основы технической диагностики: учеб. пособие для вузов / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – И.: ИрГУПС, 2006. – 216 с.
4. Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.
5. Анненков Ю. М. Перспективные материалы и технологии в электроизоляционной и кабельной технике: учебное пособие / Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко. – Томск: ТПУ, 2011. – 212 с.
6. Харченко А. Ф. Техника высоких напряжений: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / А. Ф. Харченко. – Москва: РОАТ, 2012. – 386 с.
7. Крыжановский В.К. Технические свойства полимерных материалов: Учеб, справ, пособие / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. - 2-е изд., испр. и доп. - СПб.: Профессия, 2005. – 248 стр.
8. Рычков А. А. Полимерные диэлектрики: учеб, пособие / А.А. Рычков, Д.А. Рычков, С.А. Трифионов; Рос. гос. пед. ун-т им. А.И. Герцена. - Санкт-Петербург: Кн. дом, 2005. – 156 с.
9. Григорьян А. Г. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / А. Г. Григорьян, Д. Н. Диксрман, И. Б. Пешков. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

10. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники: учеб, пособие / Л.А. Ковригин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.
11. Леонов В. М. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Леонов, И. Б. Пешков, И. Б. Рязанов, С. Д. Холодный. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
12. Аникеев В. М. Основы кабельной техники: учебное пособие в 2 ч. / В. М. Аникеев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 126 с.
13. Славинский А. В. Физика диэлектриков / А. В. Славинский. – Москва: Научтехлитиздат, 2007. – 327 с.
14. Важов В. Ф. Пробой твердых диэлектриков: Учеб, пособие / В. Ф. Важов. Том. политехи, ун-т. – Томск: ТПУ, 1992. – 80 с.
15. Исмагилов Ф. Р. Диэлектрики в электрическом поле / Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов. – Уфа: УГАТУ, 2009. – 104 с.
16. Холодный С.Д. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике: учебное пособие / С.Д. Холодный, С.В. Серебрянников, М.А. Боев – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 232 с.
17. Редько В.В. Разработка методов и средств электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий – Томск: Издательство ТПУ, 2013. – 91 с.
18. Петров А. В. Методы испытаний электрической изоляции: практикум по курсу: учебное пособие / А. В. Петров. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 121 с.
19. Редько В. В. Приборы контроля качества изоляции кабельных изделий, Т. 2. / В. В. Редько, Л. А. Редько. – 2004. – 338с.
20. Старикова Н. С., Редько В. В. Исследование достоверности контроля целостности изоляции по изменению электрической емкости в области сильных электрических полей / Неразрушающий контроль: всероссийская молодежная школа-конференция, Томск 18 Августа 2013 – Томск: ТПУ, 2013. – с. 153–159.

21. Редько В.В., Бурцева Л.Б., Редько Л.А.. Изоляция кабельных изделий как объект электроискрового технологического контроля / Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 317. № 4. с. 111-114.

22. Пухаренко Ю.В. Статистическая обработка результатов измерений: учебное пособие для вузов / Ю. В. Пухаренко, В.А. Норин. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 236 с.

23. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2017. – 171 с.

					02.15.ЕС2026.РД.2021–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57