


Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на тему:

**«Дослідження методів та засобів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів»**


Виконав: студент 2-го курсу, групи 2ЕСМ-22м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
освітня програма «Електричні системи та мережі»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

  
Ладанюк С. Д.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС

  
Матвієнко С.В.  
(прізвище та ініціали)


« 9 » грудня 2023 р.

Опонент:  к.т.н., доц. каф. ЕСС

Бабенко О.В.  
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2023 р.

Допущено до захисту

 Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., проф. Комар В. О.

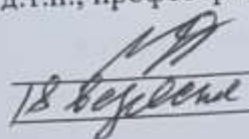
(прізвище та ініціали)

« 11 » грудня 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

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





ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ЕСС  
д.т.н., професор Комар В. О.

  
18 вересня 2023 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

1. Тема роботи. Ладанюк Сергій Дмитрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
«Дослідження методів та засобів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів»
- керівник роботи к.т.н., доцент каф. ЕСС Матвієнко С. В.  
затверджена наказом вищого навчального закладу від 18.09.2023 року № 247
2. Строк подання студентом роботи 05 грудня 2023 року
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: Конструктивне виконання існуючих опорно-стрижневих ізоляторів; методи та засоби їх діагностування; нормативна документація; статистичні.
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Стан проблеми і задачі дослідження. 2. Методи виявлення дефектів фарфорової ізоляції. 3. Обладнання для випробувань, контролю та діагностування опорно-стрижневих ізоляторів. 5. Економічна частина. 4. Охорона праці та безпека життєдіяльності в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Титульний лист. 2. Мета, об'єкт, предмет, задачі дослідження. 3. Аналіз об'єкта дослідження. 4. Методи дослідження. 5. Моделі сучасних тепловізорів різних конструкцій та виробників. 6. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Матвієнко С. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ <i>Матвієнко С. В.</i>		
Економічна частина	Остра Н. В., к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС		

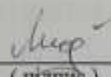
7. Дата видачі завдання 18 вересня 2023 року

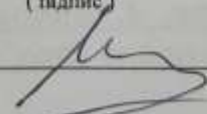
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи		Прізвище
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	21.09.23	23.09.23	<i>Век</i>
2	Стан проблеми і задачі дослідження	24.09.23	29.09.23	<i>Век</i>
3	Методи виявлення дефектів фарфорової ізоляції	30.09.23	10.10.23	<i>Век</i>
4	Обладнання для випробувань, контролю та діагностування опорно-стрижневих ізоляторів	11.10.23	28.10.23	<i>Век</i>
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.10.23	05.11.23	<i>Век</i>
6	Економічна частина	06.11.23	12.11.23	<i>Век</i>
7	Оформлення пояснювальної записки	13.11.23	21.11.23	<i>Век</i>
8	Виконання графічної/ілюстративної частини та оформлення презентації	22.11.23	27.11.23	<i>Век</i>
9	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР	28.11.23	01.12.23	<i>Век</i>
10	Рецензування МКР	01.12.23	04.12.23	<i>Век</i>
11	Захист МКР	За графіком		<i>Век</i>

Студент

Керівник роботи

  
(підпис)



С. Д. Ладанюк

С. В. Матвієнко

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Ладанюк Сергій Дмитрович “Дослідження методів та засобів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів”. Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця: ВНТУ. 2023. 99 с.

Пояснювальна записка виконана на 99 аркушах друкованого тексту і містить 14 таблиць, 24 рисунка. При виконанні роботи було використано 19 літературних джерел. Робота складається з вступу, чотирьох розділів основної частини, висновку, списку літератури та додатків.

В магістерській кваліфікаційній роботі було розглянуто призначення, класифікацію, технічні характеристики опорно-стрижневих ізоляторів. Виконано короткий аналіз використання цих ізоляторів, технологій їх виробництва. Проведено дослідження причин пошкоджуваності та визначено діагностичні параметри. Показано основні методи випробувань, контролю параметрів та визначення стану ізоляторів на їх основі. У розділі охорони праці та цивільного захисту розглянуто заходи спрямовані на створення безпечних умов праці.

**Ключові слова:** відкрита розподільна установка, власні потреби, заземлювальний пристрій, схема електричних з'єднань

## ABSTRACT

UDC 621.311.1

Serhii Dmytrovych Ladanyuk "Research of methods and means of diagnosing support-rod insulators". ". Master's qualification work on specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2023. 99 p.

The explanatory note is made on 100 sheets of printed text and contains 14 tables, 24 figures. 19 literary sources were used in the performance of the work. The work consists of an introduction, four sections of the main part, a conclusion, a list of references and appendices.

The purpose, classification, and technical characteristics of support-rod insulators were considered in the master's thesis. A brief analysis of the use of these insulators and their production technologies was performed. The causes of damage were investigated and diagnostic parameters were determined. The main methods of testing, controlling parameters and determining the condition of insulators based on them are shown. In the section on labor protection and civil protection, measures aimed at creating safe working conditions are considered.

**Keywords:** open switchgear, own needs, grounding device, electrical connection diagram

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Стан проблеми і задачі дослідження.....	10
1.1 Загальні відомості про опорно-стрижневі ізолятори.....	10
1.1.1 Призначення, параметри та класифікація ізоляторів.....	11
1.1.2 Лінійні ізолятори.....	14
1.2 Вплив зовнішніх чинників на ОСІ.....	18
1.2.1 Вплив хімічного і гранулометричного складу фарфорової маси та температури на основні параметри фарфору.....	18
1.2.2 Вплив температури на основні властивості електро-фарфору та зміна електричних і механічних властивостей при збільшенні товщини ізоляторів.....	21
1.3 Класифікація дефектів фарфорових ізоляторів.....	24
1.4 Дослідження причин пошкодження ОСІ.....	27
1.5 Місцеві дефекти.....	29
2 Методи виявлення дефектів фарфорової ізоляції.....	32
2.1 Діагностичні параметри ОСІ. Загальна характеристика методів виявлення дефектів фарфору та їх класифікація.....	32
2.2 Електричні методи.....	36
2.2.1 Загальна характеристика контролю ізоляції.....	36
2.2.2 Вимірювання опору ізоляції.....	39
2.2.3 Метод вимірювання розподілу напруги.....	41
2.2.4 Випробування підвищеною напругою.....	41
2.2.5 Оцінювання ефективності електричних методів для контролю ОСІ...	42
2.3 Звукові та низькочастотні ультразвукові методи.....	42
2.3.1 Наскрізне прозвучування на частотах 4-10 кГц.....	43
2.3.2 Контактний та безконтактний методи вільних коливань.....	44
2.3.3 Велосиметричний метод.....	45
2.3.4 Ультразвуковий резонансний метод.....	46
2.3.5 Вібраційний метод.....	48
2.3.6 Оцінювання ефективності використання звукових та низькочастотний ультразвукових методів для контролю ОСІ.....	49
2.4 Ультразвукові методи.....	50
2.4.1 Метод локації.....	50
2.4.2 Тіньовий метод.....	54
2.4.3 Виявлення та оцінювання ступеня ВМП методами УЗНК.....	55
2.5 Візуальні методи.....	57

2.5.1	Контроль зовнішнього стану .....	57
2.5.2	Метод індикаторних фарб.....	57
2.5.3	Ефективність візуальних методів контролю ОСІ в експлуатації.....	58
2.5.4	Метод реєстрації часткових розрядів.....	59
2.6	Порівняльна характеристика ефективності методів контролю ОСІ в експлуатації.....	61
3	Обладнання для випробувань, контролю та для діагностування ОСІ...	64
3.1	Засоби інфрачервоної техніки.....	64
3.2	Прилади реєстрації ультрафіолетового випромінювання.....	67
3.3	Прилади для проведення УЗНК.....	70
3.4	Прилади засновані на вимірюванні частоти власних коливань ОСІ....	72
3.5	Пристрої для випробувань високовольтних фарфорових ізоляторів методом акустичної емісії.....	74
4.	Економічна частина.....	77
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	84
5.1	Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	84
5.1.1	Електробезпека.....	84
5.1.2	Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	85
5.2	Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії.....	87
5.2.1	Мікроклімат.....	87
5.2.2	Склад повітря робочої зони.....	88
5.2.3	Виробниче освітлення.....	89
5.2.4	Виробничий шум.....	90
5.2.5	Виробничі вібрації.....	92
	Висновки.....	97
	Список літератури.....	98
	Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	
	Додаток Б. Технічне завдання.	
	Додаток В. Ілюстративна частина	

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Одним із важливих завдань у використанні електротехнічного обладнання є забезпечення надійності й безперебійності його роботи. Відомо, що відмова електричної установки завжди призводить до значних економічних втрат через пошкодження коштовного обладнання та призупинення постачання електроенергії споживачам.

Україна використовує силове електричне обладнання, більшість якого працює понад 25 років і вичерпала свій запланований термін служби. Один з типів цього обладнання - опорно-стрижневі ізолятори (ОСІ), які поширено впроваджувалися в експлуатацію від 1970 до 1990 років. Продовження використання такої застарілої техніки призводить до аварій, обмежує роботу персоналу, погіршує безпеку та знижує надійність, що спричиняє зростання витрат на ремонт та обслуговування.

Основним завданням на сьогодні є покращення існуючих методів і розробка нових для діагностики високовольтного обладнання в електроенергетичних системах. Діагностика спрямована на визначення стану електричного обладнання (справність, несправність, готовність до експлуатації тощо), виявлення місця та причин пошкоджень, визначення можливості подальшого використання, передбачення залишкового ресурсу та потреби у ремонті.

**Для вирішення цих завдань** покращуються наявні та розробляються нові методи контролю параметрів та тестування електричного обладнання. Умови зростаючої автоматизації систем електропостачання сприяють розвитку систем постійного моніторингу параметрів обладнання під час його роботи, щоб визначати зміни стану та ресурсу для майбутнього прогнозування.

**З метою поліпшення** діагностики розвиваються методи і засоби періодичного контролю (інфрачервона техніка, спостереження за ультрафіолетовим випромінюванням, хроматографічний аналіз складу газів у маслі тощо), а також впроваджуються методики руйнівних (елегазові високовольтні випробувальні трансформатори, пересувне випробувальне



обладнання) та неруйнівних випробувань (інструменти контролю проходження ультразвукового сигналу та інші).

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розгляду методів та засобів діагностики такого обладнання під час експлуатації.

**Мета дослідження:** підвищення ефективності контролю технічного стану опорно-стрижневих ізоляторів шляхом застосування комбінованого методу діагностування, а саме засобів інфрачервоної техніки, приладів контролю проходження тестового ультразвукового сигналу та інших засобів періодичного неруйнівного контролю.

**Об'єкт дослідження:** процеси зміни технічного стану ОСІ в процесі їх експлуатації.

**Предмет дослідження:** методи та засоби контролю технічного стану ОСІ.

**Наукова новизна** полягає у підтвердженні необхідності дослідження методи та засоби контролю технічного стану ОСІ.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, які складають основний зміст магістерської роботи, отримані автором самостійно.

Результати теоретичних досліджень, були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

**Апробація результатів МКР.** Основні положення роботи та її результати прийняті на ІІІ науково-технічну конференцію підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, 2024).

## 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Загальні відомості про опорно-стрижневі ізолятори

Опорно-стрижневі ізолятори (ОСІ) - як найбільш масовий так і найбільш вразливий в електричному та механічному відношеннях ізоляційний елемент розподільних пристроїв (шинні опори, ізолятори роз'єднувачів та інших апаратів).

З кінця 50 на початку 60 років минулого сторіччя в експлуатації почали інтенсивно застосовуватися опорно-стрижневі фарфорові ізолятори. В наш час на енергетичних підприємствах країни знаходяться в експлуатації декілька мільйонів ОСІ, які використовуються в електроустановках 35-750 кВ і випускаються з механічною міцністю на вигин від 4000 до 20000 Н [2].

Досвід експлуатації електроустаткування розподільних пристроїв станцій і підстанцій напругою 110 кВ та вище свідчить, що опорно-стрижневі ізолятори є елементом, який найбільш часто пошкоджується, особливо ізолятори у складі роз'єднувачів. Вплив пошкоджуваності ОСІ на надійність ВРУ збільшується їхньою кількістю, що перевищує на кілька порядків кількість інших видів електроустаткування. Число технологічних порушень, пов'язаних з руйнуванням ОСІ в електроенергетичних системах України в цілому складає десятки за рік.

При цьому руйнуються не тільки старі опорно-стрижневі ізолятори випуску 60-70-х років (серії АКО, УСТ, ОНС), але й ізолятори, які випускаються з початку 80-х років (серія ИОС). Пошкоджуваність ізоляторів значно зростає після 10—12 років експлуатації.

На енергетичних підприємствах неодноразово траплялися аварії через пошкодження (поломку) ОСІ, які втрачали механічну міцність через розтріскування фарфору. На рис.1.1 показаний роз'єднувач 330 кВ, у якого при черговому ремонті виявили та замінили ізолятори з пошкодженою

фарфоровою частиною. Замінені ізолятори мають білий колір без слідів забруднення. Такий роз'єднувач у будь-який момент міг пошкодитися.

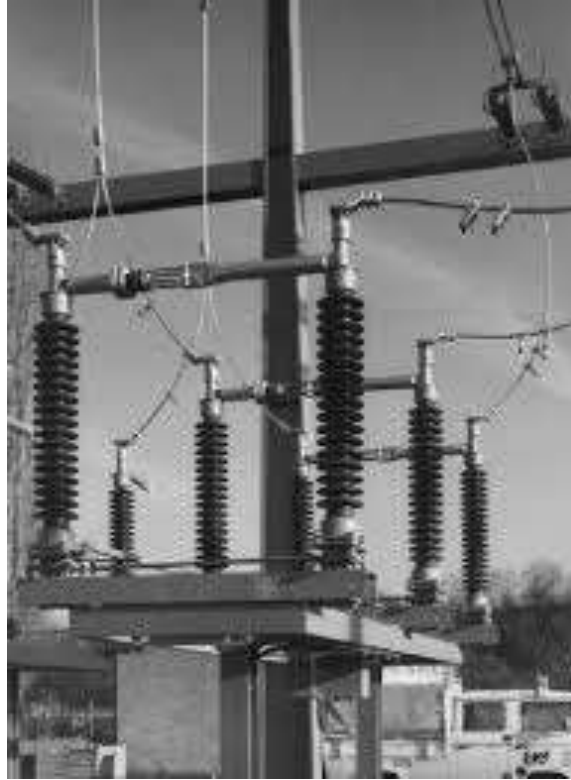


Рисунок 1.1 - Відремонтований роз'єднувач 330 кВ

Особливу небезпеку представляють відмови ОСІ з розвитком технологічних порушень, які можуть спричинити нещасні випадки, супроводжуються знеструмленням ліній, виділенням на ізольовану роботу станцій, тобто на режим роботи при якому згенерована електроенергія не передається, порушенням режимів відпуску електроенергії.

Протягом багатьох десятиліть електричні перекриття ОСІ були однією з головних причин аварій з тяжкими наслідками, особливо в районах з різними природними та промисловими забрудненнями. Сьогодні переважна кількість технологічних порушень викликана механічними пошкодженнями ОСІ.

#### 1.1.1 Призначення, параметри та класифікація ізоляторів

Ізолятори є невід'ємною частиною високовольтних і низьковольтних апаратів, розподільних та трансформаторних підстанцій і призначені для

електричної ізоляції та механічного кріплення частин електричних пристроїв, які знаходяться під різними потенціалами. Деякі з видів фарфорових ізоляторів показані на рис. 1.2.

Електричні ізолятори та спорудження з них являють собою самостійні конструкції, які використовуються в розподільних пристроях або в різного роду електротехнічних установках, а також входять до складу багатьох електричних апаратів. У всіх випадках ізолятори виконують такі функції: з їхньою допомогою здійснюється механічне кріплення струмопровідних частин, у деяких випадках передається механічний рух, наприклад від привода до рухомого контакту комутаційного апарату.

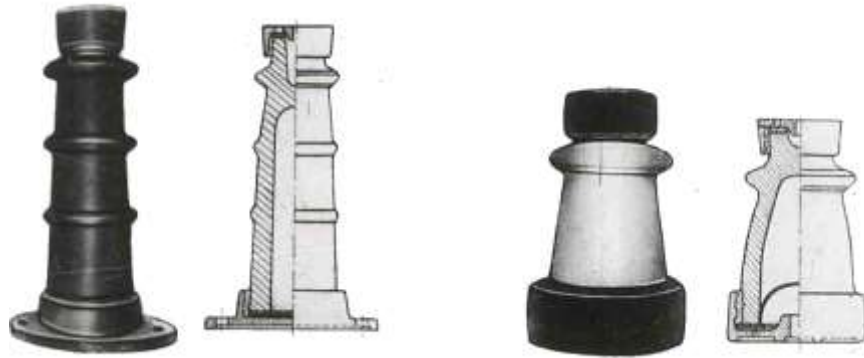


Рисунок 1.2 Деякі види фарфорових ізоляторів

Як елементи механічного кріплення ізолятори забезпечують необхідне взаємне розташування струмопровідних, заземлених та інших частин установки, тим самим, забезпечуючи необхідний рівень електричної міцності на всіх ділянках розподільної установки або лінії.

Основні характеристики ізоляторів - габарити, маса та вартість - істотно впливають на загальні техніко-економічні показники всієї установки в цілому. Цей вплив різко зростає зі збільшенням номінальної напруги. В установках надвисокої напруги характеристики ізоляторів можуть мати визначальне значення.

Кожен тип ізолятора має різновиди, які відрізняються за конструктивним виконанням, технічними характеристиками та умовами експлуатації (наприклад, видом та ступенем атмосферного забруднення). Для кожного класу напруги однотипні ізолятори виготовляють на різні механічні навантаження. Класифікація ізоляторів наведена в додатку А.

За призначенням ізолятори можна поділити на дві групи: лінійні та станційно-апаратні. На станціях та підстанціях, окрім ізоляторів лінійного типу, які використовуються для монтажу ошиновування в відкритих розподільних установках, використовуються станційно-апаратні ізолятори, серед яких розрізняють прохідні та опорні ізолятори.

Опорні ізолятори для розподільних пристроїв за виконанням поділяються на дві основні групи: ізолятори опорно-штиреві та опорно-стрижневі.

За умовами експлуатації станційно-апаратні ізолятори поділяються на: ізолятори внутрішньої установки (для роботи в приміщенні) та зовнішньої установки (для роботи у відкритих розподільних установках). Існують також ізолятори зовнішньо-внутрішнього конструктивного виконання.

По класах напруги ізолятори поділяють на: ізолятори низької (до 660 В включно) та високої (вище 660 В) напруги. Ізолятори високої напруги виготовляють на напругу 1, 3, 6, 10, 35, 110, 150 кВ та вище.

За місцем установки ізолятори поділяються на стаціонарні, лінійні та апаратні.

Стаціонарні ізолятори призначені для кріплення та ізоляції шин в закритих і відкритих розподільних установках електричних станцій і підстанцій.

Апаратні ізолятори призначені для кріплення струмопровідних частин апаратів. Конструктивно поділяються на опорні та прохідні, які виготовляються у вигляді стрижнів, тяг, втулок тощо.

### 1.1.2 Лінійні ізолятори

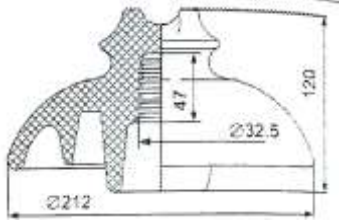
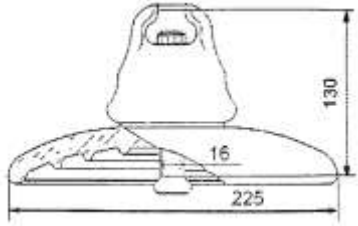
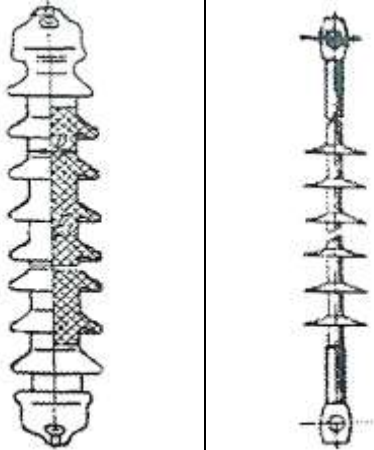
Лінійні ізолятори, призначені для кріплення та ізоляції проводів повітряних ліній високої напруги та ошинування відкритих розподільних установок від опор та металевих конструкцій (рис. 1.3). Конструктивно лінійні ізолятори поділяють на штиреві, тарілчасті та стрижневі [5].



Рисунок 1.3 – Гірлянди підвісних тарілчастих ізоляторів

Лінійні штиреві ізолятори складаються з сталевого штиря, що створює механічну жорсткість всієї конструкції, на який насаджуються фарфорові або скляні елементи. Ізолятори закріплюються на опорах за допомогою кілків або штирів і мають спеціальну канавку в головці ізолятора або шийку на яких розташовується провід, що кріпиться шляхом в'язки або за допомогою спеціальних затискачів. У цих ізоляторах характерні сильно розвинені ребра, що дозволяє виготовляти ізолятори невеликої висоти. Одиночні штиреві ізолятори використовуються на повітряних лініях та в розподільних установках до 35 кВ включно (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Типи лінійних ізоляторів

Тип	Клас напруги одиначного ізолятора	Ізоляційний матеріал	Ескіз
Штиреві	до 35 кВ включно	загартоване лужне скло, фарфор	
Тарілчасті (підвісні тарілчастого типу)	до 10 кВ включно	загартоване лужне скло, фарфор	
Стрижневі	110 кВ то вище	Фарфор, полімерні матеріали	

Оскільки виконати декілька сильно розвинутих ребер в одному фарфоровому ізоляторі досить складно, фарфор ізолятора на напругу 35 кВ складений з окремих склеєних між собою елементів, для більш високих напруг лінійні ізолятори складаються в колонку. Виготовляються ізолятори у виконанні з підвищеною стійкістю до бруду та для нормальних умов

експлуатації. На рис. 1.4 наведено конструкцію підвісного тарілчастого ізолятора.

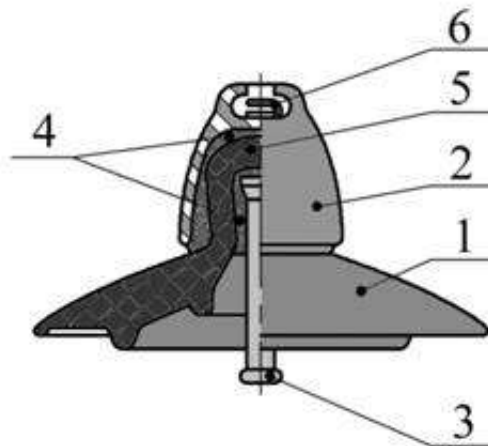


Рисунок 1.4 – Підвісний тарілчастий ізолятор з конусною головкою:  
1 – тарілка ізолятора; 2 – чавунна шапка; 3 – сталевий стрижень; 4 – цементна замазка; 5 – головка ізолятора; 6 – замок.

Лінійні ізолятори тарілчастого типу (тарілчасті) мають типові конструкції з конусною (табл. 1.1) та циліндричною головками ізолюючого тіла («тарілки»), яка армована зовні металевою шапкою. Зсередини в головку введений і закріплений сталевий стрижень (маточка). Для армування шапки та маточки використовується портландцемент високої якості, який має температурний коефіцієнт розширення, близький до температурного коефіцієнту розширення фарфору (загартованого лужного скла). Тарілчаста конструкція підвісних ізоляторів подовжує шлях поверхневого розряду, що приводить до збільшення розрядної напруги. Одиночні ізолятори використовуються в лініях напругою до 10 кВ. Для ліній більш високого класу напруги необхідний рівень ізоляції створюється вибором достатньої кількості ізоляторів, які з'єднуються за допомогою шарнірних вузлів арматури і гірлянди. У районах підвищеного забруднення атмосфери використовують ізолятори зі збільшеною довжиною шляху витoku, частини, захищеної від прямого зволоження, або з поліпшеною здатністю до самоочищення - типу ПСГ.



Лінійні стрижневі ізолятори, як правило являють собою фарфоровий стрижень із концентричними або гвинтовими ребрами. Кінці стрижня мають форму конуса, яка забезпечує високу механічну міцність закладення арматури. ізолятори із гвинтовими ребрами технологічні у виготовленні та мають здатність до самоочищення під дощем. Одиночні стрижневі ізолятори призначені на номінальну напругу 35-110 кВ і вище, що приводить до значного скорочення довжини та ваги ізоляції в порівнянні з вагою та довжиною гірлянди тарілчастих ізоляторів. Окрім застосування в лінійній ізоляції, стрижневі ізолятори та гірлянди, складені з них, використовуються як апаратні ізолятори: в якості розтяжок в деяких конструкціях повітряних вимикачів та вентиляльних розрядників на напругу 220-330 кВ.

Умовні позначення лінійних ізоляторів:

- перша літера - тип ізолятора (Ш - штиревий, П - підвісний, С - стрижневий);
- друга - матеріал ізоляційної частини (Ф - фарфоровий; С - скляний; П - полімерний;
- третя - умови експлуатації (Г - для районів з підвищеним забрудненням атмосфери, М - зі зменшеною висотою, Е - удосконалений для районів з польовими забрудненнями);
- цифра - мінімальне гарантоване електромеханічне навантаження, кН (10, 30 тощо), для штиревих та стрижневих ізоляторів - клас напруги, кВ (35,110);
- літера - конструктивне виконання (А, Б, В).

## 1.2 Вплив зовнішніх чинників на ОСІ

1.2.1 Вплив хімічного і гранулометричного складу фарфорової маси та температури на основні параметри фарфору

Властивості фарфору залежать від його складу. В таблиці 1.2 наведені основні параметри деяких сполук фарфорових мас у порівнянні з фарфором «звичайного» складу.

Таблиця 1.2 – Основні параметри деяких сполук фарфорових мас

Параметри	Фарфор			
	Високовольтний	Висококварцовий	Глиноземистий	
			МГ-12	М-134
Межа міцності при розтягуванні (стисненні), Мпа				
- неглазурованих зразків	$\geq 30$	43-46	40-50	59
- глазурованих зразків	$\geq 35$	43-55	-	78
Межа міцності при статичному вигині, Мпа				
- неглазурованих зразків	$\geq 60$	87-92	90-100	124
- глазурованих зразків	$\geq 70$	80-110	-	155
Електрична міцність при 50 Гц, МВТ/м	30	31	35	35
Тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$ при частоті 50 Гц	0,03	0,03-0,035	0,02-0,03	0,02
Діелектрична проникність $\epsilon$ при частоті 50 Гц	$\leq 7,0$	6,6	6,5	-
Питомий об'ємний опір $\rho$ при температурі 20°C, Ом·м	$\geq 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	-
Стійкість до термоударів (середній руйнівний перепад температур), °С	$\geq 160$	160	190	165-180

Одним із шляхів поліпшення механічних та електричних властивостей електротехнічної фарфорової маси є підвищення дисперсності її вихідних компонентів звичайно при незначних змінах її складу. Підвищення дисперсності має визначену межу, тому що воно пов'язано зі збільшенням тривалості подрібнення, ускладненнями при сушінні напівфабрикату виробів та іншими негативними факторами.

Суттєво впливає на властивості електротехнічного фарфору звичайного складу кількість лужних окислів ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ) та співвідношення їх вмісту. Зі зменшенням співвідношення лужних окислів (від 6,4 для матеріалу П-1 до 0,2 для матеріалу П-7 (рис. 1.5) електричні властивості електротехнічного фарфору погіршуються, особливо при підвищених температурах [11].

На рис. 1.5-1.7 показані залежності тангенса кута діелектричних втрат ( $tg\delta$ ), питомого опору ( $\rho$ ) та електричної міцності ( $E_{np}$ ) від температури для цих матеріалів.

Підвищити електричні і механічні властивості фарфору можна також за рахунок введення в початкову масу глинозему ( $Al_2O_3$  від 30 % до 50 % і більше) при зменшенні кількості польового шпату. При цьому в структурі фарфору з'являються кристали корунду, що забезпечує вищу електричну та механічну міцність.

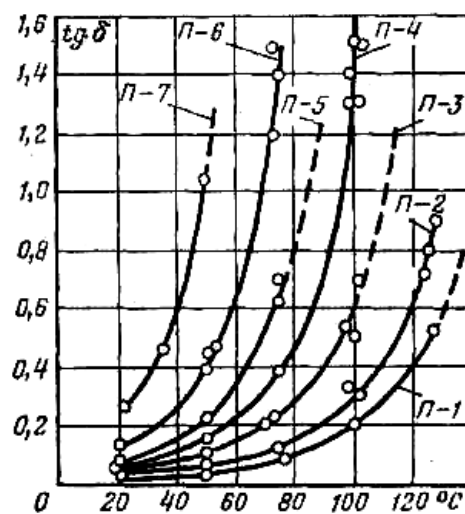


Рисунок 1.5– Температурна залежність  $tg \delta$  фарфорових матеріалів з різним співвідношенням  $K_2O$  до  $Na_2O$

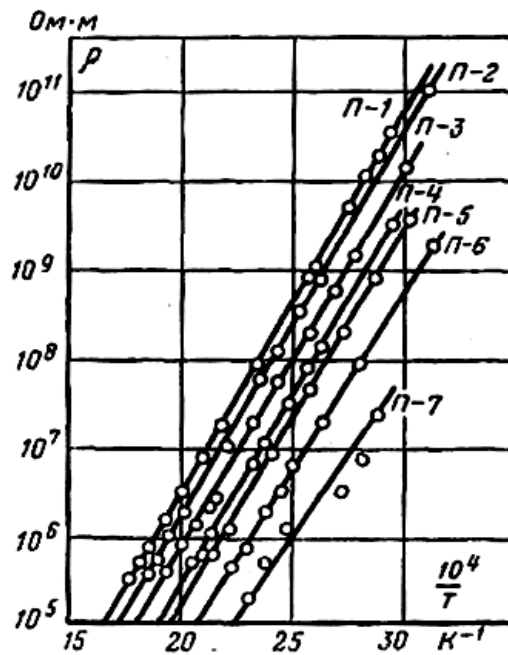


Рисунок 1.6 – Температурна залежність питомого опору, Ом·м, фарфорових матеріалів з різним співвідношенням  $K_2O$  до  $Na_2O$

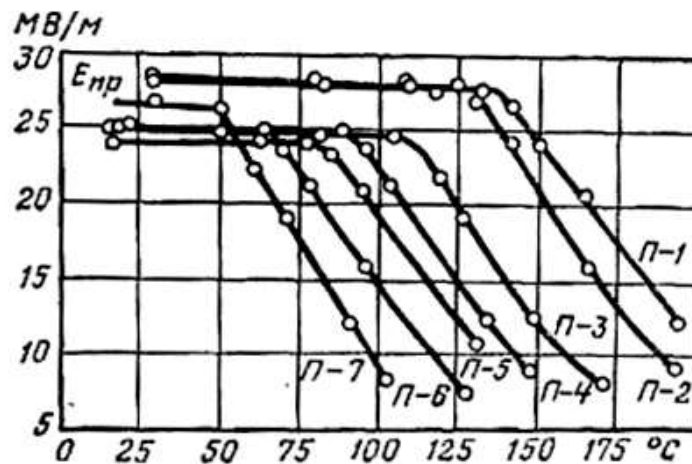


Рисунок 1.7 – Температурна залежність електричної міцності (МВ/м) при 50 Гц фарфорових матеріалів з різним співвідношенням  $K_2O$  до  $Na_2O$

Тривалий час, частина таких ізоляторів від загального числа ізоляторів, які випускалися, була відносно не велика, що пов'язано з високою вартістю  $Al_2O_3$ : використання алюмінієвих сполук здорожує ізолятор більш ніж на 15 %. Однак, починаючи з 2003–2005 років, частина глиноземистих ізоляторів значно зросла.

### 1.2.2 Вплив температури на основні властивості електро-фарфору та зміна електричних і механічних властивостей при збільшенні товщини ізоляторів

При підвищенні температури зростають  $\text{tg } \delta$  і електропровідність фарфору. Крива зміни електричної міцності в залежності від температури має характерний вигляд, властивий для форми теплового пробою (рис. 1.7). *прЕ*

З підвищенням температури величина механічної міцності спочатку залишається практично незмінною, а потім різко зменшується (рис. 1.11). Температура, при якій відбувається падіння, для тонких зразків складає 30–130 °С. Характер залежності  $\text{tg } \delta$  і змінюється зі зміною складу електрофарфору. Приклади таких залежностей показані на рис. 1.6–1.8.

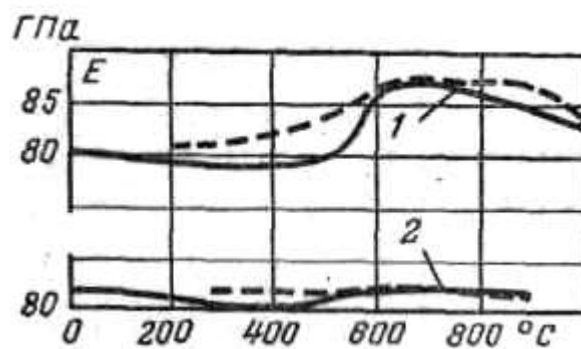


Рисунок 1.8 – Криві зміни модуля пружності при нагріванні фарфорових зразків: 1 – фарфору нормального складу; 2 – фарфоровий матеріал без вільного кварцу; суцільні графіки – нагрівання; пунктирні – охолодження

Температурна залежність модуля пружності від температури кристалоутворювальних компонентів фарфору показана на рис. 1.9. В області від’ємних температур у межах від 0 до мінус 180 °С змін величини модуля пружності в фарфорі звичайного складу не виявлено.

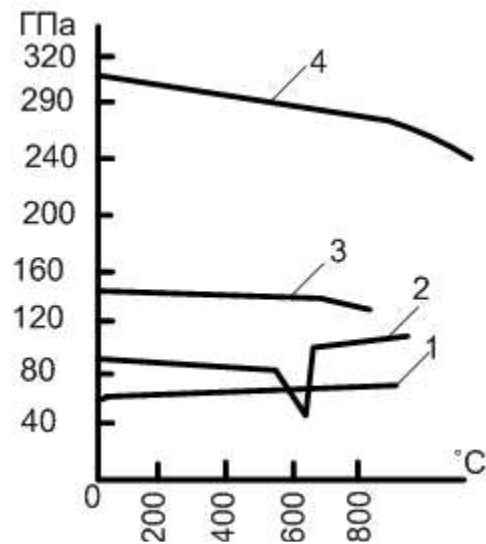


Рисунок 1.9 – Залежність пружності від температури деяких кристалоутворювальних компонентів фарфору та, для порівняння, кварцового скла: 1 – кварцове скло; 2 – кварц; 3 – муліт; 4 – глинозем.

Руйнування фарфору після значного строку експлуатації може бути пояснене тривалим та постійним впливом термомеханічних напруг, які виникають внаслідок зміни температур у тілі ізолятора та особливо в місцях приєднання фарфорових частин ізолятора до інших деталей. У цьому випадку можливий розвиток мікроскопічних та макроскопічних дефектів, які утворилися при виготовленні ізоляторів. Для якісно виготовленого електрофарфору, яких-небудь змін у структурі чи властивостях матеріалу після тривалого збереження не виявлено.

При збільшенні товщини виробу зменшується електрична міцність фарфору (рис. 1.11). Відповідно із збільшенням товщини фарфору пробивна міцність, віднесена до 1 мм товщини, також зменшується (рис. 1.10). У неоднорідному електричному полі, тобто в реальних конструкціях ізоляторів, електрична міцність ще нижча.

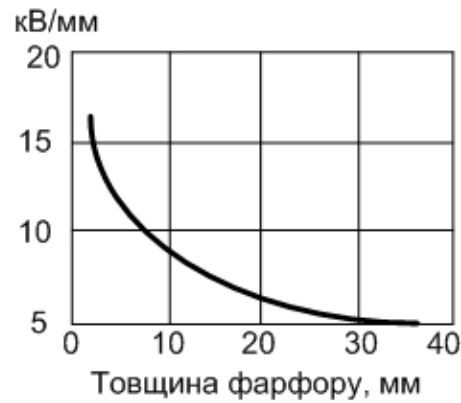


Рисунок 1.10 – Залежність електричної міцності фарфору від товщини зразка при плоских електродах

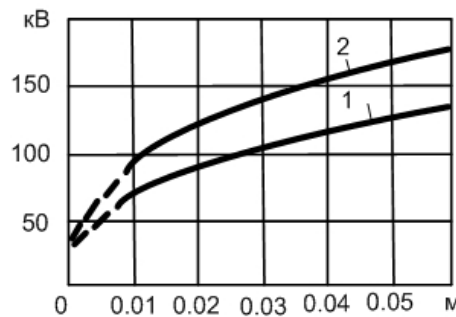


Рисунок 1.11 – Залежність пробивної напруги від товщини стінок виробів з електрофарфору: 1 – значення нормовані ГОСТ 5862-79 [16]; 2 – усереднені значення, отримані при випробуваннях

Певний вплив на міцність ізоляторів вносить вузол армування ізолятора, через який, чи на межі якого, часто проходить небезпечний переріз ізолятора. Точні дані на вибір розрахункових величин руйнівних механічних напруг фарфору відсутні. Як приклад, на рис. 1.12 та рис. 1.13 наведені залежності межі міцності фарфору на вигин від діаметра порожніх та суцільних ізоляторів циліндричної форми. Більшість, отриманих при випробуваннях, значень механічних руйнівних напруг у фарфорі розташувалися в межах затушованого поля на графіках рис. 1.12.

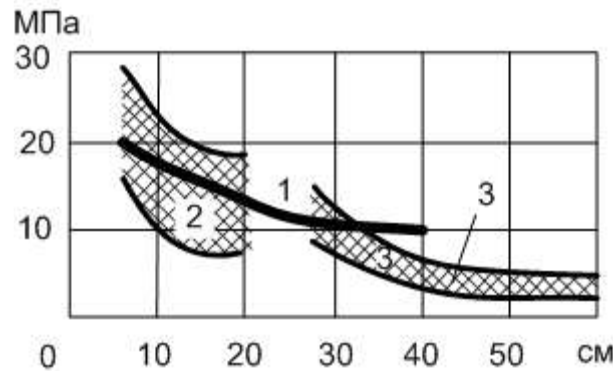


Рисунок 1.12 – Залежність механічної міцності при вигинанні фарфору від діаметра порожніх ізоляторів циліндричної форми: 1 – з даних Німеччини; 2, 3 – з російських даних [11]

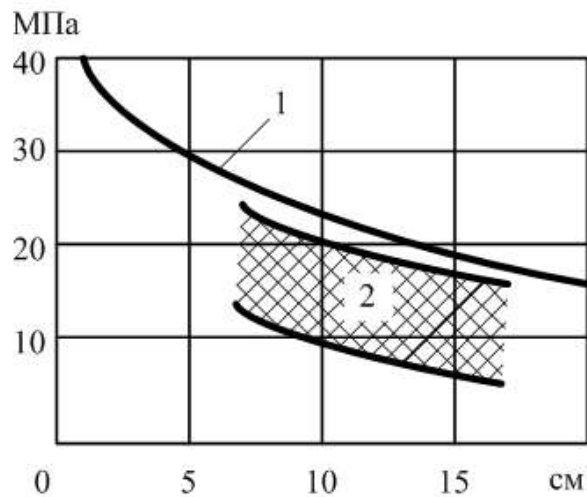


Рисунок 1.13 – Залежність межі міцності на вигинання фарфору від діаметра суцільних циліндричних ізоляторів: 1 – за даними Німеччини; 2 – за російськими даними [11]

### 1.3 Класифікація дефектів фарфорових ізоляторів

У дефектоскопії зазвичай виділяють три великі групи прихованих дефектів, які істотно відрізняються, як характером, так і способами їх виявлення: місцеві, об'ємні та обмежено-об'ємні дефекти [37].



Стосовно виробів з високовольтного електрофарфору доцільно додатково класифікувати структурні дефекти, відрізняючи при цьому макроструктурні дефекти та мікроструктурні дефекти.

Дефекти опорно-стрижневих ізоляторів можна розподілити:

а) за фізичним змістом відмови:

- електричні (повний або місцевий пробій твердого діелектрика; перекриття по поверхні ізолятора);
- механічні (дефекти, пов'язані з втратою механічної міцності та механічним руйнуванням);

б) за виникненням:

- виробничі;
- які виникли в процесі експлуатації;

в) за місцем їх знаходження в ізоляторі:

- зовнішні:

- відхилення від припустимих розмірів;
- відхилення по якості поверхні;
- наявність сколів на поверхні ізолятора;
- поверхневе викришування цементної зв'язки;

- внутрішні:

- макроскопічні (одиначні тріщини, порожнини та включення);
- засмічена макроскопічна пористість;
- обпалювальна макроскопічна пористість;
- мікроскопічні (мікроскопічна пористість).

г) за ступенем розповсюдження в об'ємі ізолятора:

- зосереджені;

- електричний місцевий пробій твердого діелектрика;
- приховані дефекти;

- місцеві дефекти:
  - одиночні тріщини;
  - порожнини та включення;
  - розподіленні:
    - зволоження та забруднення поверхні;
    - обмежено-об'ємні (зонні) дефекти:
  - засмічена пористість;
  - обпалювальна макроскопічна пористість;
  - відкрита мікроскопічна пористість;
  - дефект типу «згортиш».

Під «внутрішніми» зазвичай розуміють дефекти, які не виходять на поверхню, тобто дефекти виробу в цілому, які не виявляються при візуальному огляді.

Внутрішні виробничі дефекти опорних ізоляторів в свою чергу поділяються по виду структурних порушень на мікроскопічні та макроскопічні. Мікроскопічні дефекти представлені перш за все мікроскопічною пористістю фарфору.

Технологічними ознаками якості ОСІ є відсутність неприпустимих дефектів до яких відносяться:

- видимі тріщини;
- відхилення від припустимих розмірів;
- відхилення по якості поверхні;
- приховані дефекти;
- внутрішні дефекти небезпечні для механічної міцності.

Діюча нормативно-технічна документація містить недостатні ви-моги до фарфору ізоляторів. У зв'язку з цим при визначенні якості ОСІ доцільно враховувати статистику відмов в експлуатації, виділяючи при цьому конкретні причини.

#### 1.4 Дослідження причин пошкодження ОСІ

Вивчення причин пошкодження ізоляторів у процесі їх експлуатації разом з профілактикою ізоляції у енергосистемах - одне з найважливіших завдань експлуатуючих організацій. Вивчення пошкоджуваності дозволяє знайти відповідні методи виявлення та усунення конкретних пошкоджень, раціональніше організувати вибір та експлуатацію устаткування, узагальнити матеріал для проектувальників та виробників ізоляторів. Ізоляція – один з найбільш відповідальних, але і найбільш пошкоджуваних елементів в системі передачі та розподілу електроенергії. Навіть такі надійні ізоляційні матеріали, як фарфор та скло, не завжди відповідають вимогам експлуатації зі стійкості до різних зовнішніх дій.

Останні десятиліття переважна більшість відмов ОСІ зумовлена втратою механічної міцності та механічним руйнуванням. Суттєва величина зовнішньої довжини шляху витoku ізолятора та її збільшення шляхом певних конструктивних рішень, запас ізоляційної міцності при розрахунку габаритів ізоляторів, хороші діелектричні властивості фарфору та низка профілактичних заходів під час ремонтів обладнання (миття поверхні ізоляторів, заміна ізоляторів зі сколами ребер або відновлений ремонт) практично виключили електричні відмови ОСІ, окрім поодиноких випадків, переважно, в районах 4-ї та 5-ї зон забруднення.

Втрата механічної міцності пов'язана перш за все з виробничими дефектами. У деяких випадках мають місце руйнування якісного фарфору через тривале перебування під механічним навантаженням, яке дорівнює межі міцності (наприклад, тяжіння ОСІ ошинуванням в умовах сильного зледеніння). Слід зазначити, що такі руйнування, як і «силові» злами, складають безперечну меншість дефектів фарфорових конструкцій у порівнянні з руйнуванням ОСІ внаслідок виробничих дефектів.

Завдяки впровадженню приладів ультразвукового контролю, приладів контролю акустичної емісії щорічно перевіряється велика кількість ізоляторів, які знаходяться в експлуатації. Крім того перевіряються резервні ізолятори, які знаходяться на складах підстанцій.

Так, наприклад, з 2003 по 2008 рік в Південно-Західній електроенергетичній системі ультразвуковими методами випробувано 7500 ізоляторів, що складає приблизно половину від загальної кількості ізоляторів в електроенергетичній системі, при цьому дефектні ізолятори склали 12 %.

Надійність ізолятора визначається якістю його фарфорового тіла, при цьому слід зазначити:

- дефекти навіть дуже малих розмірів (наприклад, поверхневі тріщини глибиною лише 0,1 мм, які розташовані біля нижнього фланця ізолятора) здатні призвести до руйнування ізолятора;
- тривалість розвитку тріщини від її зародження до зламу фарфору важко прогнозувати (від секунд до декількох років), тобто, руйнування ізолятора може відбутися без утворення видимої тріщини, яка певний, відносно тривалий час, не приводить до відмови;
- візуально виявити внутрішні тріщини фарфору, а також тріщини, які розташовані під фланцем ізолятора, неможливо, а поверхневі тріщини – досить складно, особливо в умовах забруднення опорних ізоляторів.

Дія на ізолятор зовнішньої сили приводить до появи в ньому дода-ткового механічного напруження, руйнування нових частинок фарфорового тіла та стрибкоподібного зростання мікроскопічних тріщин.

### 1.5 Місцеві дефекти

Місцеві дефекти (МД) – обмежено-об'ємні дефекти макроструктурного типу, зокрема – окремі тріщини, порожнини, включення, пов'язані головним чином із легуванням у фарфорову масу великих сторонніх включень, а іноді з

порушеннями режиму витягування заготовки ОСІ з вакуумпресу. Місцеві дефекти зумовлені наявністю в фарфоровій масі крупних сторонніх включень.

Місцеві дефекти: одиночні тріщини, порожнини, включення, при цьому розглядаються тільки макроскопічні місцеві дефекти, розмір яких помітно перевершує характерний розмір елементів структури речовини контрольованого виробу. Оскільки для електротехнічного фарфору розмір зерна його полікристалічної структури досягає 100 мкм, мінімальний розмір несущільності, яку можна розглядати як макроскопічний місцевий дефект, складає декілька десятих частин міліметра. Місцеві дефекти мають чітко окреслену межу: вся частина об'єму виробу, який зайнятий місцевим дефектом, відрізняється від речовини виробу за хімічним складом та за мікроструктурою.

Приповерхневі дефекти опорно-стрижневих ізоляторів, які опинились в зоні розтягування представлені в Додатку Б. Приповерхневі дефекти стали причиною руйнування ізоляторів при механічних випробуваннях. Стрілкою показано напрямок механічного навантаження.

Зосереджені дефекти зумовлені крупними металевими, та неметалевими (Додаток Б) включеннями, були виявленні за допомогою методу ультразвукової імпульсної дефектометрії. Причина дефекту – велика неметалева засміченість, яка закипіла під час обпалювання при температурах більше 1150–1250 °С, тобто після втрати фарфором газопроникності.

Аналіз характеристик місцевих дефектів, які стали причиною руйнувань ОСІ при вибіркових механічних та ударних випробуваннях, показав, що більшість цих дефектів дрібні, розміром до 1,5–2 мм; рідше – середні (до 5–7 мм). За типом такі дефекти, в основному, є включеннями, рідше – порожнинами. За формою вони, в основному, близькі до сферичних. Розташовані на відстані від десятих доль міліметра до 20–30 мм від бокової поверхні, в зоні розтягування. Дрібні місцеві дефекти, пов'язані з фоновим засміченням маси (розміром менше 1 мм), як правило, не є критичними.

Крупні місцеві дефекти ОСІ в ізоляторах випуску сімдесятих-вісімдесятих роках були достатньо рідкісні. В ізоляторах, які випускалися в 90-

х їх кількість значною мірою зростає, як і взагалі дефектів типу засмічень. Ці дефекти, безперечно, можуть і повинні виявлятися при виробничому ультразвуковому неруйнівному контролі (УЗНК) ОСІ за умови прозвучування з торців виробів.

На виявлення саме цих дефектів, в основному, розраховані і повні силові випробування ОСІ «на вигин». Інформативність силових випробувань ОСІ можна підвищити, поєднуючи їх з реєстрацією сигналів акустичної емісії (метод АЕ). Особливим видом виробничих місцевих дефектів є різні види тріщин, небезпека яких полягає в можливості зростання ймовірності руйнування ізоляторів в умовах експлуатації при порівняно невеликих навантаженнях, які тривало діють або повторюються, навіть якщо виріб і витримав короточасне випробувальне навантаження значно більшої величини. Більшість внутрішніх тріщин можуть бути виявлені на виробництві при прозвучуванні з торців методами ультразвукової імпульсної дефектометрії або методами АЕ.

#### Висновки до розділу

- Надійність роботи ОСІ в експлуатації недостатня, ізолятори залишаються найбільш вразливим елементом ВРУ.
- Переважна більшість дефектів опорно-стрижневих ізоляторів мають виробниче походження, що вимагає підвищеної уваги до культури виробництва ізоляторів, приведення вітчизняної нормативної документації, щодо вимог якості опорно-стрижневих ізоляторів, у відповідність до норм та здійснення обов'язкових приймально-здавальних випробувань ізоляторів в електроенергетичних системах.
- Пошкодження опорно-стрижневих ізоляторів майже завжди викликані втратою механічної міцності та руйнуванням ізоляторів, що зумовило спрямування більшості методів діагностування ОСІ в напрямку контролю механічного стану, а не електричних параметрів.

#### Задачі дослідження:

1. Аналіз основних характеристик об'єкта дослідження.

2. Причини та характер пошкодження ОСІ.
3. Аналіз існуючих методів виявлення дефектів фарфорових ізоляторів.
4. Аналіз існуючих засобів контролю технічного стану ОСІ та їх вдосконалення.
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

## 2 МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ФАРФОРОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

### 2.1. Діагностичні параметри ОСІ. Загальна характеристика методів виявлення дефектів фарфору та їх класифікація

На енергетичних підприємствах надійність експлуатації ОСІ може бути забезпечена двома шляхами.

Перший шлях – підвищення культури експлуатації роз'єднувачів та ізоляторів. Для цього необхідно робити своєчасне та правильне регулювання й обслуговування роз'єднувачів, контроль зусилля натискання ножів, періодичний візуальний контроль наявності поверхневих тріщин фарфору та цементного армувального шва, використання захисного покриття армувального шва гідрофобними покриттями.

Другий шлях – контроль технічного стану ізоляторів, як перед монтажем, так і в період експлуатації. Ще порівняно недавно єдиним способом такого контролю на енергетичних підприємствах були механічні випробування ізоляторів роз'єднувачів. Два ізолятори – полюси роз'єднувача, за допомогою стяжного пристрою з динамометром, який розташовується на їхніх верхніх фланцях, одночасно випробовують на вигин силою, яка дорівнює 60 % від мінімального руйнівного навантаження для даного типу ізоляторів. Цей спосіб дозволяє відбракувати найбільш слабкі ізолятори, які руйнуються при такому рівні випробувального механічного навантаження [41].

Однак, окремі недоброякісні ізолятори, міцність яких (руйнівне навантаження) нижче нормованого мінімального руйнівного, але вище випробного навантаження, такі випробування витримують. Але при навантаженнях, які перевищують 60% їхньої реальної міцності, може відбутися деградація міцності ізоляторів, можливі утворення та розвиток у них внутрішніх мікроскопічних тріщин. Ізолятор, який витримав механічні випробування, незабаром може зруйнуватися під дією експлуатаційних



навантажень. Такі випадки неодноразово відзначалися персоналом енергетичних підприємств, що викликало недовіру до механічних випробувань ізоляторів і масову відмову від проведення випробувань.

До недоліків методу варто віднести необхідність багаторазового прикладання випробувального навантаження, а також те, що верхня частина ізолятора, у якій найбільша ймовірність виникнення найбільш масового дефекту – відкритої мікроскопічної пористості, випробовується не навантаженням на вигин, а тільки навантаженням на зріз.

Разом з тим, механічні випробування ізоляторів цінні тим, що вони дозволяють імітувати реальні навантаження, які діють на ізолятор при операціях увімкнення та вимикання роз'єднувача. При цьому можна контролювати стан ізолятора, наявність у ньому дефектів, які розвиваються за допомогою методу акустичної емісії. Проведення механічних випробувань без такого контролю неефективне.

Розроблена велика кількість інших методів та засобів, які дозволяють вчасно виявити дефектні ізолятори, як на стадії їхнього виготовлення, так і в процесі експлуатації. Як при виробництві, так і під час експлуатації, ремонту, монтажу, проводяться вимірювання параметрів ОСІ. Класифікація методів випробування ОСІ схематично показана на рис. 2.1. В подальшому будуть розглянуті методи діагностування ізоляторів, причому, основна увага приділяється експлуатаційним методам контролю.

Контроль стану опорно-стрижневих ізоляторів передбачає багато методів контролю параметрів, які характеризують механічний стан ОСІ [42]. До них відносяться такі: теплові методи, візуальний контроль, ультразвукова імпульсна дефектометрія та структурометрія, УЗНК ВМП, УЗНК ОМАП та зосереджених дефектів небезпечних перерізів, УЗНК зосереджених дефектів країв ізолятора, реєстрація сигналів акустичної емісії, методи, засновані на виявленні часткових розрядів, звукові і низькочастотні ультразвукові методи.

Технічний стан опорно-стрижневого фарфорового ізолятора може визначатися за допомогою різних параметрів контролю: по величині його

механічної міцності, а саме здатності витримувати механічне навантаження (мінімальне зусилля, при якому може відбутися руйнування ізолятора), за оцінкою спектральної щільності потужності (СЩП) при реакції ізолятора на дію випадкової вібрації з плоским спектром тощо.



Рисунок 2.1 – Класифікація методів контролю ОСІ

При цьому різні види дефектів можуть бути виявлені шляхом контролю величин різних параметрів: для виявлення ОМАП контролюють характеристики КГІ (компактної групи імпульсів), кількість донних імпульсів

(ДІ), які видно на фоні шумів, сумарну амплітуду перших п'яти ДІ; для виявлення ЗАСП контролюють кількість ДІ, які видно на фоні шумів, амплітуду ДІ, сумарну амплітуду перших п'яти ДІ, амплітуду шумів структурної реверберації (ШСР) поблизу ЗІ; для виявлення ВМІП параметром контролю може бути швидкість розповсюдження ультразвуку.

Методи виявлення дефектів фарфорових ізоляторів можна класифікувати по декількох категоріях:

- по місцю випробування:
  - виробничі;
  - експлуатаційні;
- по виду діагностичного параметра:
  - контроль стану механічної частини;
  - контроль електричних параметрів;
- по виду вимірювальної величини:
  - електричні (вимірювання опору ізоляції, метод вимірювання розподілу напруг, випробування підвищеною напругою промислової часто-ти);
  - звукові та низькочастотні ультразвукові методи (наскрізне прозвучування на частотах (4–10 кГц), велосиметричний метод (20–70 кГц), метод вільних коливань на частоті (20 кГц), ультразвуковий резонансний метод, акустико-топографічний метод);
  - ультразвукові методи (ультразвукова структурометрія, ультразвукова дефектометрія, тіньовий, метод локації);
  - візуальні методи ( контроль зовнішнього стану, «органолептичний» метод, метод індикаторних фарб);
  - методи рентгенодефектоскопії.

## 2.2 Електричні методи

### 2.2.1 Загальна характеристика контролю ізоляції

Електрична схема заміщення ізоляції електроустановок, яка пояснює призначення та місце кожного з електричних методів профілактичних випробувань ізоляторів, показана на рис. 2.2.

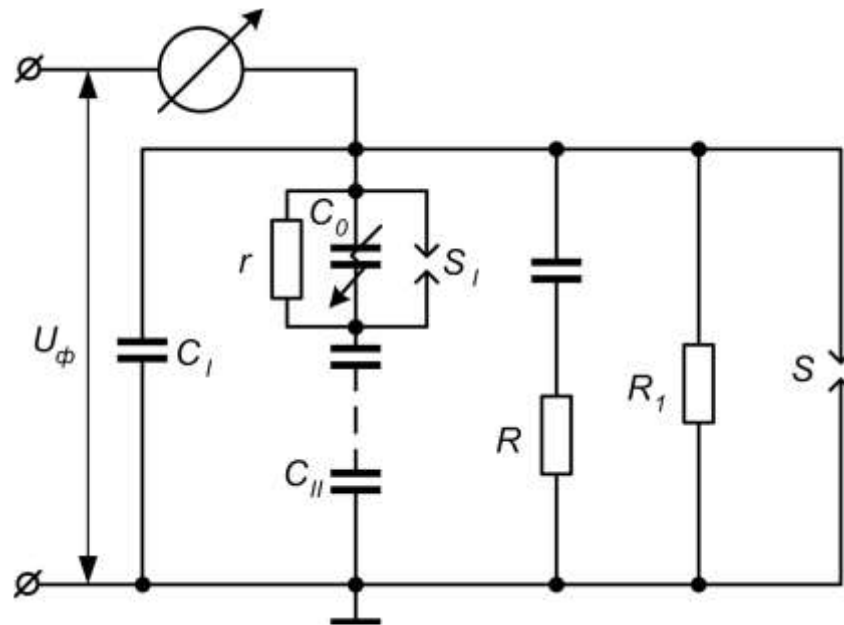


Рисунок 2.2 – Електрична схема заміщення ізоляції

На рисунку 3.2 показані:  $U_{\phi}$  – прикладена фазна напруга;  $C_1$  – геометрична ємність ізоляції;  $C_n$  – ємності окремих елементів ізоляції;  $r$  – опір дефектного ізолятора;  $S_1$  – еквівалентний іскровий проміжок дефектного ізолятора;  $C$  та  $R$  – абсорбційна складова ізоляції;  $R_1$  – опір ізоляції постійному струму;  $S$  – еквівалентний пробивній напрузі іскровий проміжок.

Електрична схема заміщення ізоляції складається з п'яти складових, які визначають основні електричні характеристики ізоляції [2].

Перша складова, яка містить ємність  $C_1$ , характеризує геометричну ємність ізоляції та обумовлює зарядний струм. Друга складова, характерна для багатоелементних ізоляційних конструкцій та містить ємності окремих елементів. На прикладі ємності  $C_0$  пояснюється наявність у колонці багатоелементних ізоляторів дефектного ізолятора. Дефект в ізоляторі характеризується розрядним проміжком  $S_1$  або опором ізоляції  $r$ . Ця складова визначає розподіл напруги по елементах ізоляції або можливість виникнення часткових розрядів. Третя складова, яка містить ємність  $C$  та опір  $R$ ,

характеризує ступень неоднорідності ізоляції, наявність розшарувань, зволожень, забруднень тощо. Ця складова визначає початкове значення та постійну частоту спадання струму абсорбції, а також ємність і діелектричні втрати ізоляції при змінному струмі. Четверта складова, яка містить опір  $R_1$ , визначає опір ізоляції постійному струму й струм наскрізної провідності (струм витоку). П'ята складова містить еквівалентний іскровий проміжок  $S$ , яким характеризується розрядна або пробивна напруга ізоляції.

Кожний з методів профілактичних електричних випробувань здатний контролювати ту або іншу складову в електричній схемі ізоляції. Зокрема, вимір опору ізоляції або струми провідності дозволяє контролювати складову ізоляції, яка містить опір  $R$  або  $r$ , а з урахуванням абсорбційної залежності струму, також складова, яка містить ємність  $C$  та опір  $R$ ; вимір розподілу напруги по окремих ізоляторах дозволяє контролювати ізолятори  $C_0$ – $C_n$  або часткові розряди, які виникають в іскровому проміжку  $S_1$ ; випробуванням ізоляції прикладеною напругою контролюється ізоляція в частині, яка містить еквівалентний проміжок  $S$ .

Якщо до ізоляції, представленою електричною схемою заміщення, буде поштовхом подана постійна напруга  $U$ , то при цьому дуже швидко, за проміжок часу значно менший півперіоду промислової частоти, заряджається ємність  $C$ , величина якої зумовлена геометричними розмірами, конфігурацією ізолюючої конструкції та діелектричною постійною ізоляційного матеріалу  $\epsilon$ . Одночасно виникають поляризаційні явища, пов'язані з нагромадженням та перерозподілом заряду в ємностях.

На промисловій частоті ці процеси будуть повторюватися через кожний півперіод, при цьому може бути помічена дія дипольної та міжшарової поляризації, які визначають діелектричні втрати ізоляції. Дипольна поляризація пов'язана з орієнтацією дипольних молекул по напрямку силових ліній прикладеного електричного поля.

Міжшарова поляризація пов'язана з неоднорідністю структури ізоляції. Для простоти можна представити, що в товщі ізоляції розподілені частки

підвищеної провідності, між якими існують ємнісні зв'язки  $C$ . При прикладанні постійної напруги виникає струм, який зумовлений зарядом ємності  $C$  через якісь опори  $R$  («повільна» поля-ризація, рис. 2.3) [2].

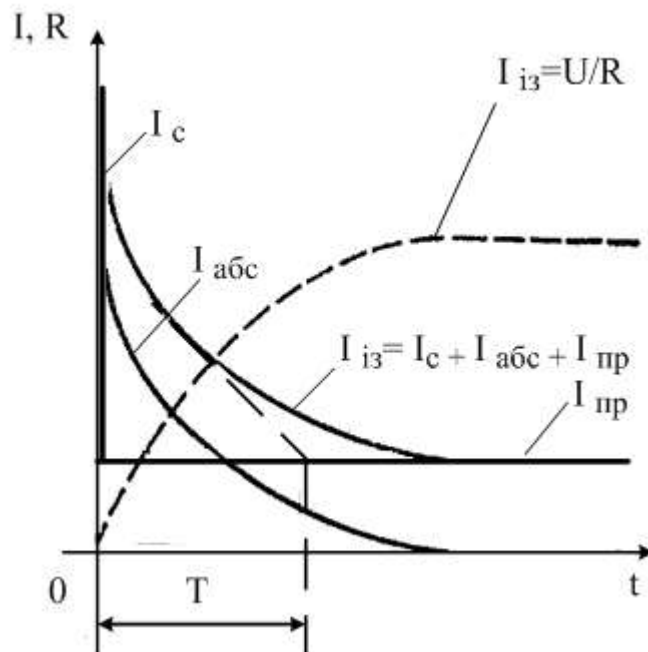


Рисунок 2.3 – Характер зміни струму через ізоляцію і опір після прикладення постійної напруги

При обох видах поляризації поляризаційний струм (струм абсорбції) зменшується з часом приблизно за експонентним законом з постійною часу  $T$  від мілісекунд до декількох десятків хвилин залежно від виду і стану ізоляції.

### 2.2.2 Вимірювання опору ізоляції

Вимірювання опору ізоляції ізоляторів повинні проводитись: під час прийнятно-здавальних випробувань після монтажу або реконструкції обладнання, під час капітального ремонту обладнання, під час поточної експлуатації. Опір вимірюють мегомметром на напругу 2,5 кВ за температури

навколишнього повітря не нижче ніж 5 °С. Під час монтажу ізоляторів опір ізоляції вимірюється безпосередньо перед установленням ізоляторів. Опір кожного ізолятора або кожного елемента багатоелементного ізолятора має бути не меншим 300 МОм.

Контроль опору ізоляції входить в обсяг випробувань багатьох видів ізоляційних конструкцій як при налагодженнях, так і у процесі ремонтів та профілактичного контролю. Вимірювання опору ізоляції або струмів провідності зазвичай виконується на постійній напрузі.

Сумарний струм через ізоляцію, включену поштовхом на постійну напругу, буде мати складові: кидок струму заряду  $I_c$  геометричної ємності  $C$ ; струм абсорбції, який визначається з формули (3.1) та струм наскрізної провідності, який визначається з формули (2.2).

$$I_{abc} = \frac{U}{R}, \quad (2.1)$$

$$I_{np} = \frac{U}{R_1}, \quad (2.2)$$

Відповідно до характеру зміни сумарного струму змінюється і опір ізоляції.

Ізолятори мають порівняно малу ємність, прості конструктивно, використовують однорідний діелектрик (фарфор) і тому при вимірі їхнього опору абсорбційні явища протікають у дуже короткі проміжки часу і практично не впливають на результати вимірювань. У схемі заміщення такої ізоляції (рис. 2.2) можна не зважати на параметри складової  $C$  та  $R$ . Вимірювання опору ізоляції використовується для швидкого орієнтовного оцінювання електричного стану ізоляційної конструкції. Вартото мати на увазі, що величина, опору ізоляції може служити лише вкрай грубим критерієм загальної надійності ізоляторів. Не можна, наприклад, за значенням опору ізоляції визначити наявність пробою або тріщини, якщо поверхня каналу або тріщини суха й

чиста. Окрім того навіть невелика частина фарфорового тіла ізолятора, має значний опір (більше 300 МОм). Таким чином для того, щоб ізолятор відбракувався по значенням опору постійного струму він повинен мати вертикальну тріщину, майже по всій висоті ізолятора, до того ж зволожену і забруднену.

Значне зниження опору ізоляції можуть викликати:

- пробій з наскрізним каналом великої провідності (розплавлений метал, обвуглювання каналу);
- зволоження всього об'єму діелектрика (при наявності відкритої пористості);
- зниження поверхневого опору під дією забруднення та зволоження.

У більшості випадків при вимірюванні опору ізоляції ізолятора отримують сумарний опір об'ємного та поверхневого опорів:

$$R = \frac{R_v \square R_s}{R_v + R_s}, \quad (2.3)$$

де  $R_v$  - об'ємний (внутрішній) опір;  $R_s$  - поверхневий опір.

Причому вплив поверхневого опору досить істотний. Для усунення впливу опору  $R_s$  ізолятор піддають попередньому протиранню, а в деяких випадках ретельному очищенню, із застосуванням розчинників, з наступною просушкою та протиранням до сухого чистого стану, або використовують екрануючі електроди, які відводять струми з поверхні в обхід вимірювальної схеми.

### 2.2.3 Метод вимірювання розподілу напруги

Методом вимірювання розподілу напруги виявляються головним чином зосереджені, місцеві дефекти ізоляції в опорних колонках з штиревыми ізоляторами. Сутність методу полягає в порівнянні вимірних падінь напруги,



на кожному елементі ізолюючої конструкції, з нормальними падіннями напруги, тобто з нормальним розподілом напруги. Під нормальним розподілом напруги розуміють розподіл напруги по елементах ізолюючої конструкції, у випадку відсутності дефектних елементів. Використання цього методу для опорно-стрижневих ізоляторів ускладнюється тим, що розподіл напруги для різноманітних ізоляційних конструкцій, зокрема конструкцій у складі повітряних вимикачів, роз'єднувачів, олонок різної конфігурації буде різним, що вимагає великої кількості значень еталонних розподілів напруги з завідомо бездефектними ізоляторами. Окрім того, головною складністю в реалізації методу є відсутність зручних пересувних вимірювальних засобів для контролю напруги 50 – 100 кВ.

#### 2.2.4 Випробування підвищеною напругою

На ізоляцію подають напругу, значення якої вище тої, що виникає в процесі експлуатації. Таким чином можна перевірити запас електричної міцності ізоляції та виявити слабкі місця в ізоляції. У той же час це випробування не дозволяє отримати абсолютних значень досліджуваного параметра, а відповідає лише на питання, витримує чи ні ізоляція напругу встановленого значення.

#### 2.2.5 Оцінювання ефективності електричних методів для контролю ОСІ

Опорно-стрижневі ізолятори мають значний запас електричної міцності, тому безперечно більшість відмов опорно-стрижневих ізоляторів пов'язана з втратою механічної міцності. Електричні методи показали високу ефективність при контролі підвісних та штиревих ізоляторів, зокрема фарфорових підвісних. Для використання в якості лінійної ізоляції перевага надається скляним підвісним ізоляторам, які руйнуються при пробі, і тому зникає необхідність пошуку «пробитого» ізолятора в гірлянді за допомогою електричних методів.

Показання приладів можуть бути завищеними в період сухої жаркої бо морозної погоди, коли тріщини в ізоляторах не зволожені. Стосовно ОСІ, то відомі випадки успішного виявлення дефектних ізоляторів, однак, при цьому дуже велика ймовірність пропуску дефектних ізоляторів й визначення їх технічного стану, як справних. Окрім того, як правило, перекриття ізолятора відбувається внаслідок пробою фарфору по тріщинах, які є показником втрати механічної міцності, або відбувається по поверхні ОСІ, що пов'язано виключно з його зволоженням та забрудненням. Наявність цих дефектів може оцінюватися візуально. Саме ці факти, складність реалізації (необхідність громіздкого високовольтного устаткування, кваліфікованого персоналу) та низька інформативність електричних методів, які з успіхом використовуються для підвісних фарфорових ізоляторів, зробила їх мало прийнятними для опорно-стрижневих ізоляторів класу напруги 35 кВ і вище, та зорієнтувала діагностування стану опорно-стрижневих ізоляторів, які експлуатуються, в напрямку контролю їх механічної міцності.

### 2.3 Звукові та низькочастотні ультразвукові методи

До звукових та низькочастотних ультразвукових методів відносяться: методи наскрізного прозвучування, вільних коливань, вібраційний (резонансний). Ці методи принципово дозволяють виявляти лише великі дефекти, розмір яких близький до розміру поперечного перерізу ізолятора. Досить часто такі дефекти виходять на поверхню ізолятора і можуть бути виявлені візуально.

#### 2.3.1 Наскрізне прозвучування на частотах 4-10 кГц

Акустичний імпульс збуджують у контрольованому ізоляторі за допомогою фіксованого удару, і після проходження імпульсу через ізолятор приймають датчиком з резонансною частотою близько 150кГц, тобто прозвучування

ведеться в нерезонансній області. Сферична хвиля, що виникає при ударі проходить через ізолятор, приймається датчиком з підсилювачем та передається на піковий вольтметр, який фіксує максимальну амплітуду прийнятого сигналу. У випадку, якщо на шляху сферичної хвилі виявиться дефект досить великого розміру, амплітуда прийнятого сигналу може змінитися залежно від взаємного розташування датчика та місця введення акустичного імпульсу. Метод реалізований на приладі «ПАК-2» та його модифікації «Метакон» [43]. Основним недоліком методу є низька вірогідність виявлення дефектів властивих фарфоровим ізоляторам. Це обумовлено тим, що частотам 4–10 кГц відповідають довжини звукових хвиль у фарфорі 1,4–0,6 м, які, при використанні методу наскрізного прозвучування, в принципі дозволяють виявити дефекти розміром близько 10 см та більше. Якщо помітно змінити межі частотного діапазону даного методу в бік збільшення частот, зникне можливість створення імпульсу прозвучування в будь-якому довільно обраному місці ізолятора, що зведе метод до звичайного спрямованого наскрізного прозвучування, який використовується, як один з варіантів УЗНК.

### 2.3.2 Контактний та безконтактний методи вільних коливань

Метод вільних коливань є одним з найдавніших методів неруйнівного контролю фарфорових виробів, коли методом простукування по звуку, який поширюється від керамічного виробу після нанесення по ньому удару, вдавалося виявляти вироби з тріщинами та іншими видами дефектів.

Методи, засновані на вимірюванні частоти власних коливань (чвк), знайшли також достатньо широке розповсюдження для визначення фізико-механічних властивостей різного роду матеріалів та виробів. До останнього часу серйозною перешкодою на шляху практичного застосування методу та зниження суб'єктивного чинника при контролі була сильна залежність чвк від

форми та розмірів контрольованого виробу, проте успіхи, досягнуті в області аналізу спектрів ЧВК виробів різних форм та розмірів, а також широке застосування комп'ютерної техніки, дозволяють в наш час істотно спростити процес контролю, що приводить, в свою чергу, до розширення областей застосування цього методу.

В основу акустичного методу неруйнівного контролю, заснованого на вимірюванні ЧВК, покладена наявність кореляційних залежностей між пружними константами матеріалу, з яких виготовлений виріб, та такими фізико-механічними властивостями, як жорсткість, пористість, щільність, міцність тощо, а також експлуатаційними характеристиками виробів і параметрами їх виготовлення.

В процесі контролю вимірюють ЧВК вирівного виду коливань, розраховують з залежності (2.4) приведену швидкість розповсюдження акустичних хвиль (стрижневу швидкість звуку)  $C_1$  і з раніше знайдених кореляційних залежностей визначають необхідні фізико-механічні властивості.

$$f_i = F_i \cdot C_1, \quad (2.4)$$

де  $f_i$  - ЧВК певного виду  $i$ ,  $F_i$  - коефіцієнт форми та розмірів виробу, виду збуджуваних коливань та від коефіцієнта Пуассона,  $C_1 = \sqrt{E/\rho}$  - приведена швидкість розповсюдження акустичних хвиль;  $E$  - модуль нормальної пружності,  $\rho$  - щільність фарфору.

Параметр  $C_1$  є інформативним параметром і у ряді випадків достатньо повно характеризує фізико-механічні властивості виробів, що визначають їх поведінку при експлуатації.[4]

В опорно-стрижневих ізоляторах збуджуються вільні коливання шляхом удару ізолюваною штангою або кулею з пневматичної рушниці.

В контактному методі реєстрація акустичних сигналів власних коливань виробу здійснюється за допомогою п'єзоелектричного приймача, який

встановлюється на ізолятор. В безконтактному методі збуджені акустичні сигнали фіксуються спрямованим мікрофоном. Частотний спектр коливань записується та порівнюється за допомогою комп'ютера з еталонними результатами з бази даних. З результатів порівняння оцінюються дефекти ізоляторів. Стосовно ОСІ випробування даним методом проводились на частотах близько 20 кГц, що, як показав досвід, випробування приладу «Звук-202» на ізоляторах ИОС-110-1250, для виявлення характерних дефектів фарфорових ізоляторів явно недостатньо.

### 2.3.3 Велосиметричний метод

У велосиметричному (фазовому) методі використовується залежність швидкості поширення вигибнених хвиль у пластині від товщини цієї пластини. Наявність розшарування всередині тіла може розглядатися як різке зменшення товщини виробу. У цьому місці швидкість поширення згинальної хвилі, збудженої вібратором, зменшується, що фіксується приймачем по зміні фази хвилі в точці прийому. Таким чином, велосиметричний метод є власне кажучи фазовим методом. Робота ведеться на частотах 20–70 кГц, причому введення коливань здійснюється за допомогою сухого контакту. Випромінювач та приймач ультразвуку можуть розташовуватися на одній поверхні виробу на відстані декількох сантиметрів один від одного. При цьому чітко реєструються дефекти (розшарування) площею від 2 до 15 см<sup>2</sup> у залежності від глибини їхнього залягання (гранична глибина залягання – 25 мм). Недолік контролю при однобічному доступі – наявність мертвої зони, яка прилягає до поверхні, протилежній поверхні введення коливань, і складає 20–40 % від товщини виробу. У цій зоні дефекти не можуть бути виявлені через інтерференцію прямої хвилі і хвиль, відбитих від границь контрольованого виробу. Тому при наявності двостороннього доступу до виробу доцільно застосовувати роздільні випромінювач та приймач повздовжніх хвиль, розташовуючи їх по обидва боки контрольованого виробу. Хвиля, зустрічаючи розташований на своєму шляху

дефект, обгинає його і, проходячи при цьому більший шлях, приходиться до приймача коливань з відставанням по фазі стосовно хвилі, що пройшла через бездефектний переріз. “Мертва” зона в цьому випадку відсутня. У порівнянні з методом вільних коливань велосиметричний метод має більшу чутливість і показання приладу більш стабільні.

Метод успішно застосовується для контролю склеєних виробів невеликої товщини, однак, стосовно ОСІ він мало прийнятний, оскільки ізолятори мають складну конфігурацію та відносно великий діаметр, а, в сенсі виявлення дефектів, метод не суттєво відрізняється від методу вільних коливань.

#### 2.3.4 Ультразвуковий резонансний метод

Резонансний метод використовується головним чином для вимірювання (при односторонньому доступі) товщини виробів з металів, скла, фарфору та інших матеріалів з досить високою добротністю, а також для виявлення зон корозії в металах (на недоступній поверхні), розшарувань у тонких аркушах і біметалах тощо.

У резонансному дефектоскопі п'єзоелектричний перетворювач, збуджуючись частотно-модульованим генератором, випромінює безперервно у виріб ультразвукові хвилі змінної частоти. У моменти резонансу, коли по товщині вимірюваного перерізу вкладається ціле число півхвиль, яке відповідає частоті зовнішньої збуджувальної сили, з частотою власних коливань системи, утворюються стоячі хвилі. При цьому зменшується вхідний імпеданс контрольованого виробу, який є опором навантаження для перетворювача (реактивна складова його звертається в нуль), амплітуда пружних коливань у виробі різко зростає, змінюються сили струмів у ланцюгах генератора, які відмічаються індикатором у вигляді резонансних піків. Кожній точці на лінії розгортки відповідає визначена частота генератора, яка дозволяє відрахувати відстань від початку розгортки до відповідного піка і може бути проградуєвана в МГц або в мм. Якщо зразкова товщина виробу відома, а

параметри генератора підібрані так, що враховується тільки один резонансний пік, який відповідає основній частоті, то відстань до дефекту або товщина виробу визначається з формул:

$$B = \lambda / 2 \quad (2.5)$$

Однак, якщо зразкова товщина виро значається не тільки на основній частоті, але також і на гармоніках, тому відлік ускладнюється і підвищуються вимоги до зміни частоти – вона повинна забезпечити перекриття частотного діапазону в межах до двох-трьох гармонік. Власна частота п'єзоелемента, щоб його резонанс не впливав на показання приладу, повинна бути вищою верхнього значення частоти генератора. У цьому випадку:

$$B = \frac{m \cdot c}{2 \cdot (f_{n+m} - f_n)}, \quad (2.6)$$

де  $f_{n+m}$  і  $f_n$  - частоти, що відповідають двом довільно узятим пікам,  $m$  – число проміжків між цими піками.

Чутливість резонансного дефектоскопа зростає зі збільшенням коефіцієнта стоячої хвилі та з підвищенням добротності всіх елементів пристрою, які представляють собою пов'язані коливальні системи контурів: генератора, підсилувача, п'єзоелектричного перетворювача, проміжного контактного середовища та контрольованого виробу. При високій добротності перерахованих елементів, коефіцієнт стоячої хвилі зростає зі зменшенням девіації частоти генератора [15].

Ультразвуковий резонансний метод успішно використовується для вимірювань товщини та виявлення розшарувань у конструкціях простої форми, які мають малу товщину (оболонки, пластини тощо), для яких резонансна частота ультразвукових коливань може досягати сотень кілогерців і навіть одиниць мегагерц, що забезпечує високу чутливість резонансного методу до дефектів цих конструкцій. Для контролю ізоляторів ультразвуковий

резонансний метод малоприматний у силу їхньої складної форми та великих розмірів.

### 2.3.5 Вібраційний метод

Вібраційний (віброакустичний) метод є одним із варіантів резонансного методу та зводиться до визначення резонансної частоти випробуваних конструкцій у режимі змушених коливань. В цьому методі основним критерієм збереження механічної міцності опорно-стрижневого ізолятора є незмінність в часі його частотних характеристик, зокрема, оцінювання спектральної щільності потужності реакції ізолятора на вібраційне збудження із спектром типу «білий шум».

Критерії оцінювання механічного стану ізоляторів при першому обстеженні, яке проводиться при позитивній температурі, залежать від стану одного максимуму на спектрі щільності потужності. Для ізолятора, який знаходиться в задовільному стані, таким критерієм є наявність одного максимуму в діапазоні частот 4000–5000 Гц. Основна або визначальна частота приблизно 4500 Гц – це частота стоячої хвилі в ізоляторі [5]. Стояча хвиля – це коливання, які виникають в розподіленій системі, наприклад, в пружному середовищі, в результаті інтерференції хвиль, що біжать, і амплітуди яких однакові, а напрями розповсюдження взаємно протилежні. Стояча хвиля на відміну від хвилі, яка біжить не переносить енергію [16].

Ізолятори, які знаходяться в інших станах вимагають обстеження точнішими методами, наприклад: акустико-емісійним контролем, ультразвуковим методом (УЗНК). Повторне обстеження віброакустичним методом, проведене через 6–8 місяців (після остаточного переходу температури через 0 °С), дозволяє уточнити механічний стан ізоляторів. Якщо ізолятор знаходиться в задовільному стані і виготовлений без відхилень від вимог технологічних процесів незалежно в об'єкта та температури навколишнього середовища має оцінку СЦП вібрації з одним піком в області 4500 Гц.



### 2.3.6 Оцінювання ефективності використання звукових та низькочастотних ультразвукових методів для контролю ОСІ

Основним недоліком методів наскрізного прозвучування на частотах 4–10 кГц, вібраційного методу та контактного методу вільних коливань (20 кГц) є виявлення дефектів, розміром близько 10 см та більше. Велосиметричний метод складно реалізується для ОСІ в зв'язку з їх складною конфігурацією та значною товщиною, окрім того, при прозвучуванні з одного боку, метод має «мертву» зону, яка прилягає до поверхні, протилежній поверхні введення коливань, і складає 20–40 % від товщини виробу. При цьому навіть у контрольованій зоні розмір дефектів, які виявляються складає 1–2 см, що явно недостатньо для виявлення більшості дефектів ОСІ. Ультразвуковий резонансний метод та акустико-топографічний метод успішно використовуються для вимірювань товщини та виявлення розшарувань у конструкціях простої форм. Для контролю опорно-стрижневих ізоляторів методи малоприматні у силу складної форми та великих розмірів ОСІ. Віброакустичний метод вимагає великої кількості еталонних замірів та має обмеження стосовно ізоляційних конструкцій, однак може використовуватись для виявлення ізоляторів з магістральними тріщинами тощо.

## 2.4 Ультразвукові методи

### 2.4.1 Метод локації

Метод локації заснований на подачі в контрольований виріб коротких (тривалістю біля десяти періодів) акустичних імпульсів і реєстрації інтенсивності та часу приймання сигналів, відбитих від поверхонь виробу та від різного роду дефектів. Цей універсальний метод вирішує найбільше число задач. Робота дефектоскопу в цьому випадку являє собою ультразвукову локацію у твердому середовищі. Генератор створює електричні імпульси з

частотою проходження  $F_{сл}$ , яка задається синхронізатором, і збуджує п'єзоелектричний елемент перетворювача.

Ультразвукові хвилі, які випромінюються перетворювачем, вводяться через поверхню в контрольований виріб і поширюються в ньому у вигляді розбіжного пучка ультразвукових звукових променів. Відбиваючись від протилежної (донної) поверхні і повертаючись до перетворювача після проходження через прийомний тракт вони перетворюються в імпульси електричної напруги, які відображаються на екрані індикатора у вигляді сигналу. Розгортка, яка використовується в схемі приладу, і також управляється синхронізатором, дає зображення сигналів у координатах амплітуда – час (розгортка типу А), тому відстань між початковим сигналом та донним пропорційна товщині виробу в контрольованому перерізі. Потрапивши на дефект, УЗ-сигнали частково відбиваються від нього, і на екрані з'являється сигнал локації відбитий від дефекту. Сигнал локації з'являється на відстані від початкового сигналу, пропорційному глибині залягання дефекту. Контроль виконується шляхом сканування перетворювачем поверхні контрольованого виробу. Швидкість та крок сканування для забезпечення надійності контролю вибираються з урахуванням розміру перерізу ультразвукового пучка, часу, необхідного на проходження імпульсу до донної поверхні виробу і назад, а також мінімального числа прийнятих локаційних сигналів, які забезпечують спрацьовування сигналізатора дефектів [48]. П'єзоелектричний елемент перетворювача в режимі випромінювання перетворює електричні коливання, які виробляються генератором імпульсів дефектоскопа, в ультразвукові коливання, а в режимі прийому – ультразвукові коливання в електричні.

Конструкції перетворювачів передбачають можливість уведення пучків ультразвукових променів по нормалі, або під різними кутами до поверхні виробу. В останньому випадку в результаті заломлення звуку та трансформації ультразвукових коливань у виробі можна збуджувати хвилі різних типів і виявляти поверхневі та глибинні дефекти. Перетворювач для УЗНК ОСІ виконується, як правило, з фарфору і може бути:

- сполученим (нормальним або похилим), тобто містити один п'єзоелектричний елемент, який протягом кожного циклу роботи приладу по черзі виконує функції то випромінювача ультразвуку, то приймача;

- роздільним, який складається з двох головок, які містять випромінювальний та приймальний п'єзоелектричний елемент;

- роздільно-суміщеним, який складається з двох п'єзоелектричних елементів, але конструктивно виконаним у вигляді однієї головки.

Нормальний сполучений перетворювач найбільш універсальний і зручний, однак, при роботі з ним найбільшою мірою виявляється принциповий і дуже істотний недолік методу локації – наявність неконтрольованої, так званої “мертвої” зони. Її довжина  $l_0$  визначає в основному тривалістю  $\tau_u$  випромінюваного імпульсу, тривалістю  $\tau_n$  перехідних процесів (час «оглушення» прийомного тракту зондувальним імпульсом) та швидкістю ультразвукових повздовжніх хвиль  $C$  у матеріалі контрольованого виробу

$$l_0 = 1/2c(\tau_u + \tau_n), \quad (2.7)$$

У більшості випадків  $l_0 = 6-8$  мм, але іноді доходить до 15–20 мм. У межах мертвої зони виявлення дефектів неможливе, що ускладнює контроль виробів, які не мають достатніх припусків на обробку. У. З метою скорочення мертвої зони добротність  $Q$  перетворювача штучно знижується, для чого тильний бік п'єзоелектричного елемента жорстко з'єднується з демпфером з матеріалу, в якого хвильовий опір  $\rho$  близький до хвильового опору матеріалу п'єзоелектричного елемента та має високе значення  $\delta$ . Однак при зниженні  $Q$  падає чутливість перетворювача, тому демпфірування варто доводити до деякого оптимального стану, який визначається умовами контролю.

У похилому сполученому перетворювачі є заломлююча призма, яка виготовляється з матеріалу (органічне скло), у якому швидкість поширення повздовжніх ультразвукових хвиль  $C$ , набагато менша, ніж у матеріалі

контрольованого виробу (в органічному склі  $C \approx 2550$  м/с, у фарфорі  $C \approx 6000$  м/с). Це дає можливість, направляючи повздо-вжні хвилі  $L$  п'єзоелектричного елемента під кутом падіння  $\alpha$ , який перевищує деяке критичне значення (звичайно  $26\text{--}30^\circ$ ), забезпечити повне внутрішнє відбиття повздо-вжних хвиль та, використовуючи трансфор-мацію коливань, ввести у виріб одні лише поперечні (зміщені) хвилі  $S$ , які поширюються під кутом заломлення  $\beta$ . Якщо кут введення повздо-вжних хвиль збільшити до значення, яке перевищує другий критичний кут (близько  $60^\circ$ ), то спостерігається і повне внутрішнє відбиття поперечних хвиль, а по вільній поверхні виробу поширюються поверхневі хвилі.

Ці особливості заломлюючого перетворювача істотно розширюють можливості контролю і широко використовуються, наприклад, при контролі зварених сполук, а також виробів складної форми, зокрема, при прозвучуванні підфланцевих зон ізолятора. Призма виконує також роль гасника відбитих від контактної поверхні повздо-вжних та поперечних ультразвукових хвиль.

Роздільно-суміщений перетворювач менш універсальний, але має малу мертву зону, яка у цьому випадку визначається просторовою орієнтацією осей характеристик спрямованості п'єзоелектричних елементів. П'єзоелектричні елементи в перетворювачі розміщені до заломлюючих призм з органічного скла під кутом  $\alpha$ , значно меншим першого критичного. Тому у виріб вводяться ультразвукові хвилі  $L$  під значним кутом заломлення  $\beta$ , який дозволяє отримати відбиття від дефекту, який залягає на малій глибині ( $l_0$  знижується до  $0,5 - 1,0$  мм). Однак при цьому через значне заломлення глибина залягання дефектів, які виявляються, обмежується (тобто вона не повинна перевищувати  $150 - 200$  мм). У деяких випадках, наприклад при контролі виробів невеликої товщини, обмежених рівнобіжними площинами і виготовлених з матеріалів з невисокими значеннями  $\delta$ , можна знизити мертву зону до  $2\text{--}3$  мм. При цьому використовується дзеркальний метод локації, у якому прийомний пристрій реєструє сигнал локації (луну-сигнал), відбитий не від зверненої до перетворювача поверхні дефекту, яка має невеликі поперечні розміри, а від

протилежної (задньої). Луна-сигнал утворюється в результаті відбиття першого донного сигналу від задньої поверхні дефекту. Оскільки луна-сигнал робить подвійний шлях, то на екрані індикатора його можна бачити перед другим донним сигналом, на відміну від сигналу, отриманого в основному варіанті методу локації, де сигнали локації спостерігаються в проміжку між початковим (зондувальним) імпульсом і першим донним сигналом.

Чутливість методу локації оцінюється еквівалентними розмірами дефектів, які впевнено виявляються на заданій глибині, тобто площею штучних відбивачів, орієнтованих перпендикулярно УЗ-променя і розташованих у спеціально виготовлених контрольних зразках на заданій відстані від місця введення УЗ-променя. Показник чутливості  $k$  залежить від частоти  $f$  УЗ-хвиль, товщини виробу в данному перерізі та акустичних характеристик матеріалу контрольованого виробу (коефіцієнта загасання  $\delta$  і рівня структурних шумів). Величина  $k$  зростає з підвищенням  $f$ , оскільки при зменшенні відношення  $\lambda/d$  збільшується частка відбитої від поверхні дефекту енергії звукової хвилі та підвищується спрямованість випромінювання і прийому. Однак, поряд з цим, при збільшенні  $f$  зростає  $\delta$  та рівень структурних шумів, що приводить до зниження  $k$ . У результаті одночасного впливу перерахованих факторів,  $k$  в функції  $f$  зображується у вигляді кривої з максимумом, тобто найвища чутливість відповідає визначеній частоті. В міру зростання  $\delta$  і товщини виробу максимуми зміщаються у бік низьких частот і абсолютне значення їх зменшується, тобто чутливість падає.

#### 2.4.2 Тіньовий метод

Тіньовий метод поступається методу локації в чутливості та універсальності і тому використовується, головним чином, для контролю виробів простої форми і невеликих перерізів. Ультразвукові хвилі вводяться з одного, а приймаються, як правило, з іншого боку. Про наявність дефекту судять або по зменшенню інтенсивності звуку в зоні звукової тіні, куди ультразвукові хвилі

проникають головним чином внаслідок дифракції хвиль, або по зміні фази чи часу прийому хвилі, яка обгинає дефект, тобто пройшла більш довгий шлях. Необхідність двостороннього доступу до виробу є істотним обмеженням використання тіньового методу. Однак, якщо замість роботи в безперервному режимі застосовувати імпульси, то тіньовий метод може бути здійснений також і в дзеркальному варіанті при однобічному доступі до виробу. У цьому випадку про наявність дефекту судять із зменшення амплітуди донного відбиття – дефект викликає утворення зони звукової тіні з боку шукача. Перевага тіньового методу – відсутність мертвої зони.

Чутливість тіньового методу, так само як і чутливість методу локації, зростає з підвищенням  $f$  і падає зі збільшенням  $\delta$  та з підвищенням рівня структурних шумів. При цьому загальний рівень чутливості тут істотно нижчий, ніж у методу локації. Тіньовий метод доцільно використовувати для контролю виробів невеликої товщини, а також у випадках, коли необхідно проконтролювати весь виріб без “мертвих” зон [18].

#### 2.4.3 Виявлення та оцінювання ступеня ВМП методами УЗНК

Найбільш суттєвим дефектом фарфорових ізоляторів, який виявляється за допомогою УЗНК, є відкрита мікроскопічна пористість фарфорового тіла ізолятора – дефект, який в наш час присутній в більшій частині пошкоджених ізоляторів з вини виробників. ВМП має чисто виробниче походження. Зважаючи на це, ультразвукова структурометрія повинна проводитися на заводі, які виробляють ізолятори.

Діючі стандарти на високовольтний електрофарфор вимагають повної відсутності ВМП по всьому об'єму ізолятора. Однак, через недостатній об'єм контрольних перевірок в процесі виробництва, кількість виробів з ВМП, які надходили в експлуатацію десятиліттями, їх частина складає від 5 % до 10 % від загальної кількості встановлених ізоляторів.

Слід зазначити, що для різних заводів-виробників різні граничні швидкості критерію відбраковування. Існує також певне відхилення значень швидкості розповсюдження УЗ-хвиль в залежності від року випуску ізолятора. Орієнтовні значення цих швидкостей наведені в табл. 2.1.

В зв'язку з тим, що для різних типів ізоляторів, різних заводів-виробників та різних періодів випуску залежність наявності ВМІП від швидкості розповсюдження УЗ-хвиль різна, необхідно періодично уточнювати критерії відбраковування методом фуksiнової проби під тиском.

УЗНК ВМІП виконується за таким алгоритмом. Спочатку виділяються вироби, які входять у технологічну однорідну партію (вироби одного типу, випущені тим самим заводом протягом одного року). Потім з результатів загальних ультразвукових та руйнівних випробувань встановлюється (підтверджується, перевіряється) критерій відбраковування за мінімальною припустимою швидкістю поширення ультразвуку в контрольованому виробі.

Таблиця 2.1 – Орієнтовні значення швидкості  $C_0$  – межі утворення ВМІП для деяких типів ізоляторів

Тип ізолятора	Граничні значення швидкості $C$ , м/с
АКО-10	5550–5600
ИОС-110-600	5550–5600
ИОС-110-600	5550–5600
КО-400-1000	5400–5450
ОНС-110/300	5400–5450
АКО-110/600	5450–5500
ИОС-110/400	5500–5550
ИОС-110-400	5500–5550
УСТ-110	5400–5450
АКО-110	5600–5650

Вироби мають грубу ВМІП, якщо швидкість ультразвуку у верхньому небезпечному перерізі більше ніж на 100 м/с, або швидкість ультразвуку в нижньому небезпечному перерізі більше ніж на 150 м/с нижча швидкості  $C_0$ ,

що відповідає границі початку “профарбовування” при виконанні випробування методом фуксинової проби, тобто появи відкритої мікроскопічної пористості.

## 2.5 Візуальні методи

### 2.5.1 Контроль зовнішнього стану

Застосування методу дозволяє при зовнішньому огляді (у тому числі й під напругою) виявити близько половини зовнішніх тріщин ОСІ. Ефективність такого контролю може бути підвищена за рахунок зосередження уваги на ізоляторах «групи ризику», виділених за результатами обстеження іншими методами контролю. При проведенні візуального огляду особливу увагу варто приділяти ізоляторам, статистика відмов яких є незадовільною, з метою виявлення малопомітних тріщин фарфору.

Ізолятори з видимими зовнішніми тріщинами в будь-який момент можуть повністю втратити свою механічну міцність, тому непридатні до подальшої експлуатації. Поздовжні тріщини в ОСІ через ВМІП розвиваються з торців ізоляторів, тому з особливою старанністю варто оглядати в першу чергу прифланцеві зони. Згідно з вимогами норм [1], ізолятори, які мають на ребрах поверхневі сколи, дозволяється вводити до експлуатації після відновлювальних ремонтів, за умови, що їх площі та глибини допустимих сколів не перевищують відповідних значень. Ізолятори, які мають низьку якість армування, дозволяється вводити в експлуатацію після відновлювального ремонту за умови, що площа поверхневого викришування цементної зв'язки не перевищує  $10 \text{ см}^2$ . Відхилення колонки ізолятора від вертикалі не повинне перевищувати 2 см.

### 2.5.2 Метод індикаторних фарб

Під час капітальних ремонтів для виявлення мікроскопічних тріщин, які утворюються на поверхні, але візуально не виявляються, може



використовуватися метод індикаторних фарб, оснований на використанні спеціальних індикаторних фарб, які проявляють «невидимі» тріщини.

На ОСІ наноситься барвний розчин, який проникає в тріщини. Після 3–4 хвилин висихання, ізолятор протирається м'якою ганчіркою та наноситься розчин, який проявляється в мікроскопічних тріщинах. Індикаторні фарби складаються з гасу та барвника, а розчин, який проявляє, виготовляється на каоліні або крейді. Існують розчини, які не потребують додаткового розведення для проявлення, але їх вартість значно вища.

Метод дозволяє виявити майже всі тріщини, які вийшли на поверхню, але з іншого боку потребує відключення обладнання, значних матеріальних затрат та характеризується значною трудомісткістю. Окрім того, виявляються тільки тріщини, які вийшли на поверхню.

### 2.5.3 Ефективність візуальних методів контролю ОСІ в експлуатації

Органолептичний метод, в силу крайньої суб'єктивності та відсутності чітких критеріїв відбракування, вважається неефективним.

Метод індикаторних фарб, хоч і більш ефективний ніж контроль зовнішнього стану (проявляються зовнішні тріщини, яких при звичайному огляді не видно), але так само виявляє тільки тріщини, які вийшли на поверхню ізолятора. Оскільки руйнування ізоляторів з внутрішніми дефектами часто проходить без утворення тривало існуючих зовнішніх тріщин, то метод можна вважати малоефективним. Окрім того, метод потребує відключення обладнання, значних матеріальних затрат та трудомісткий. Ці фактори зумовили те, що найбільш придатним з візуальних методів для експлуатаційного контролю ОСІ можна вважати контроль зовнішнього стану, який не потребує особливих умов, порівняно не трудомісткий та дозволяє виявити близько половини зовнішніх тріщин ізоляторів.

#### 2.5.4 Метод реєстрації часткових розрядів

Метод реєстрації часткових розрядів на відміну від методу реєстрації ультрафіолетового випромінювання, який дозволяє реєструвати тільки поверхневі розряди та розряди в повітрі, дозволяє реєструвати всі часткові розряди, в му числі і в товщі твердої ізоляції. Виникнення часткових розрядів в товщі діелектрика відбувається за класичним механізмом. У твердій ізоляції під час виготовлення та експлуатації можуть виникнути газові включення, тріщини, повітряні порожнини. Оскільки діелектрична проникність повітря в кілька разів нижче, ніж у твердих діелектриків, напруженість поля в газовому середовищі може значно перевищувати середню напруженість поля в основній твердій ізоляції при прикладанні до ізолятора робочої або випробувальної напруги. Більш низька електрична міцність газового середовища в порівнянні із твердою ізоляцією полегшує процес виникнення іонізації та часткових розрядів.

Останні одержали назву часткових, оскільки утворенню суцільного наскрізного розряду перешкоджає наявність справних ділянок повноцінного твердого діелектрика. Така комбінована ізоляція, як правило, витримує робочу та випробувальну напруги. У той же час, часткові розряди при постійному бомбардуванні іонними потоками негативно впливають на стан ізоляції, знижують її механічну та електричну міцність, сприяючи проростанню тріщин, утворенню провідних каналів (обвуглецьовування стінок повітряних порожнин, утворення «гіллястих» провідних каналів у шаруватій ізоляції), приводять в кінцевому результаті до повного пробою ізоляції. Процес виникнення часткових розрядів при змінній нарузі можна простежити на електричній схемі заміщення ізоляції (рис. 2.4) або на схемі моделі ділянки ізоляції з повітряною порожниною.

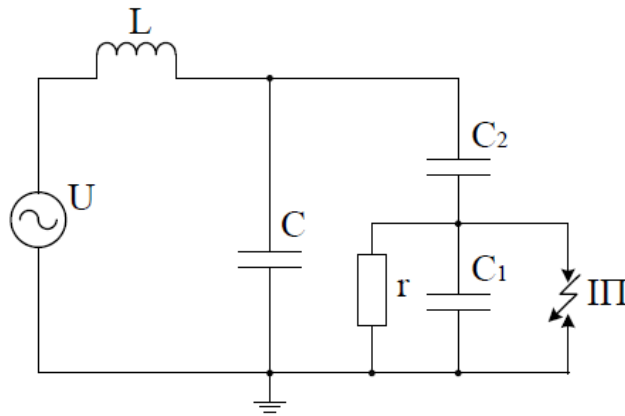


Рисунок 2.4 – Схема заміщення ділянки ізоляції з повітряною порожниною

У нормальному режимі, тобто при відсутності пробою іскрового проміжку III (частковий розряд у порожнині не утворюється), напруга джерела  $U_i$  розподіляється обернено-пропорційно ємностям  $C_1$  та  $C_2$ , де  $C_1$  – ємність газового включення, а  $C_2$  – ємність шару справної ізоляції, розташованого послідовно з газовим включенням (рис. 2.29). Напруга на ємності  $C_1$  газового включення має в цьому випадку синусоїдальний характер, як і напруга джерела.

Високочастотна пульсація напруги на ємності  $C_1$  супроводжується короткочасними (порядку  $10^{-7}$ – $10^{-3}$ ) сплесками струму в іскровому проміжку та створює коливання високої частоти. Одночасно виникають стрибкоподібні зміни напруги на ємності  $C_2$  (ємності основної маси діелектрика) та струму в зовнішньому колі. Отже, методами виявлення іонізаційних процесів або часткових розрядів у газових включеннях ізоляції можуть бути вимірювання інтенсивності електромагнітних хвиль, які випромінюються безпосередньо частковими розрядами та електричні методи:

- Вимірювання можливих пульсацій напруги на вимірюваному об'єкті;
- Вимірювання струму (сплесків) у зовнішньому колі.

Метод реєстрації часткових розрядів використовується в основному для виявлення зосереджених дефектів, таких як розшарування ізоляції, разові включення, тріщини, які утворилися в діелектрику. До переваг методу

відноситься можливість виявлення дефекту в початковій стадії його виникнення. Основним джерелом завад є коронний розряд на устаткуванні та високовольтних лініях. Природа цих розрядів подібна з природою часткового розряду і їх важко відрізнити від часткових розрядів дефектних ізоляторів, які мають тріщини. До того ж існування та характер розряду залежать від цілого ряду факторів – наявності провідних шарів на стінках порожнини, вологості повітря, величини падіння напруги на дефектному елементі ізолюючої конструкції.

## 2.6 Порівняльна характеристика ефективності методів контролю ОСІ в експлуатації

Різноманітність методів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів зумовили необхідність їх ретельного аналізу та порівняння ефективності виявлення дефектів для кожного з методів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Результати випробувань опорно-стрижньових ізоляторів різними методами

Тип ОСІ, завод- виробник, рік виготовлення	Кількість забракованих ізоляторів різними методами контролю			Кількість обстежених ізоляторів
	УЗНК	АЕ	Контроль зовнішнього стану	
ИОС-110-1250 ЛФЗ, 1974–1977	0	1	10	390
ОНСУ-40- 1000, СЗВІ, ВЗЕФ, 1974- 1997	67	9	12	515

При цьому біля 1000 штук ОСІ на РУ–110, які змонтовані, в основному, в двоповерхові колонки КО-110-1250 + ОНСУ-40-1000, разом з ультразвуковою дефектометриєю та структурометрією, паралельно випробувалися методом

реєстрації сигналів акустичної емісії за допомогою апаратурно-методичного комплексу ПАК-3М за участю його розробників. Всі 2200 ізоляторів були обстежені також ЗД ІЧТ та приладами реєстрації ультрафіолетового випромінювання («Филин-5»). Всього цими високопродуктивними дистанційними методами на ВРУ–110 та ВРУ–330 ДРЕС–19 було обстежено близько 4000 опорних ізоляторів.

За результатами випробувань методом АЕ були забраковані в цілому 11 штук ізоляторів, з яких 7 були забраковані і за результатами УЗНК. Всього ж по УЗНК та зовнішньому огляді з цієї партії 1000 штук було забраковано 83 вироби, зокрема, 15 мали видиме розтріскування фарфору, а 7 – тріщини металу фланців. Тепловізором жоден ізолятор не був забракований.

В інших електроенергетичних системах сучасними засобами ІЧТ та реєстрації ультрафіолетового випромінювання, з високою чутливістю, щороку виявляються десятки дефектних ОСІ в одноповерхових та багатоповерхових конструкціях різного класу напруги.

Результати випробувань представлені в таблиці 2.2 доводять, що жоден з методів окремо не дає можливості однозначного визначення технічного стану ОСІ.

Цей факт та недоліки, притаманні кожному з методів, зумовлює необхідність впровадження нових методів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів або використання комплексу методів, які б частково компенсували недоліки один одного. Загальне оцінювання ефективності методів представлені в додатку В.

Висновки до розділу:

- Існують методи та засоби, які дозволяють суттєво підвищити ефективність виявлення дефектів ОСІ як на виробництві, так і в експлуатації, в порівнянні з традиційними методами контролю технічного стану ОСІ, які регламентуються [1].

- Метод тепловізійного діагностування ефективний для виявлення розвинених дефектів опорно-стрижневих ізоляторів, ймовірність відмов через які найбільша.

- Окрім впровадження «основних» ефективних методів, реєстрації сигналів акустичної емісії при силовому навантаженні ізоляторів та ультразвукового неруйнівного контролю, необхідно розглянути можливість комплексного використання.

### 3 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ОСІ

Для кожного з методів контролю ізоляторів розроблені та використовуються відповідні засоби контролю прилади або пристрої. Пошук нових, розробка раціональніших рішень існуючих приладів та пристроїв. трудність в організації своєчасного виготовлення таких засобів в централізованому порядку приводять до того, що чимало приладів і пристроїв для контролю ізоляторів виготовляються не тільки в Україні, але і в інших країнах світу. Наслідком цього є відмінність виконань однотипних пристроїв в межах однієї групи засобів.

#### 3.1 Засоби інфрачервоної техніки

Тепловізор (інфрачервона камера) - оптико-електронний вимірювальний прилад, який працює в інфрачервоній області електромагнітного спектру та "переводить" у видиму область спектру власне теплове випромінювання об'єктів (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Тепловізор Fluke TIR

Кожне тіло, температура якого відрізняється від абсолютного нуля створює випромінювання, інтенсивність якого максимальна в інфрачервоному спектрі. Окрім того, інтенсивність теплового випромінювання залежить від

властивостей поверхні тіла. Залежність енергії теплового потоку власного випромінювання тіла від температури поверхні тіла підкоряється закону Стефана-Больцмана:

$$Q_L = \sigma S (T^4 - T_n^4), \quad (3.1)$$

де  $Q_L$  - енергія випромінювання (Вт);  $\sigma$  - постійна Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$  (Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $S$  – площа поверхні (м<sup>2</sup>);  $T$ ,  $T_n$  – температура ізолятора та повітря (К).

Таким чином з інтенсивності інфрачервоного випромінювання можна визначити температуру тіла в певній точці. Сукупність значень температур об'єкта, яка є скалярною функцією координат, в усіх точках в даний момент часу, визначає температурне поле об'єкта. Тепловізор дозволяє представити температурне поле у вигляді термограм - видимого зображення за допомогою різних палітр рис. 3.2.

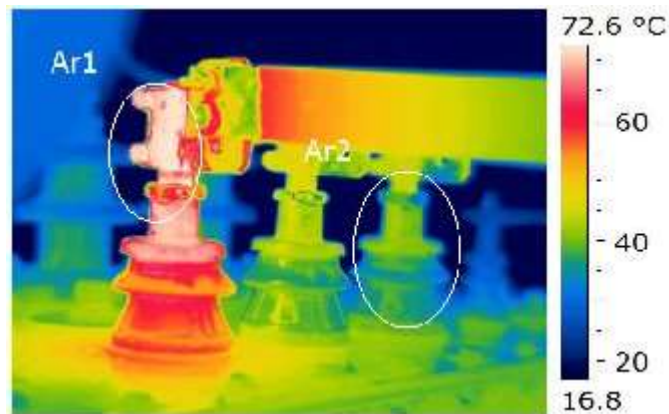


Рисунок 3.2 – Термограма опорно-стрижневих ізоляторів при лабораторних дослідженнях

Тепловізор може використовуватися, як прилад для безконтактного вимірювання температури об'єктів та температурних полів. Тепловізори використовуються для контролю стану об'єктів та технологічних процесів в різних галузях промисловості, а також при проведенні наукових досліджень.



Принцип дії сучасного тепловізора порівняно простий: теплове випромінювання від досліджуваного об'єкта через оптичну систему передається на приймач, який являє собою неохолоджувану матрицю термодетекторів та реєструє інтенсивність випромінювання в інфрачервоному спектрі. В матриці сигнал перетворюється на електричні імпульси, які, після підсилення, формуються як відеосигнал і, в подальшому, за допомогою електронного блока вимірювання, реєстрації та математичної обробки представляється у вигляді цифрового сигналу.

В моделях тепловізорів, які використовувались раніше, замість матриці використовувались лінійка термодетекторів з вертикальної та горизонтальної оптико-механічної розгортки, з системою охолодження рідким азотом.

Діагностування ізоляторів засобами ІЧТ необхідно проводити на якомога меншому температурному діапазоні, тобто при максимальній чутливості тепловізора, бо різниця температури між нормальними та дефектними ізоляторами складає, як правило, десяті частки градуса.

Сучасні тепловізори з самоохолодженням матриці мають температурну чутливість не більше  $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ , частоту  $50 - 60\text{ Гц}$  та можуть встановлюватися в будь-якому положенні до вертикалі, як правило, дозволяють застосовувати цифрове збільшення, додатково можуть використовуватися з вузькокутовим об'єктивом, що забезпечує 4–8 разове оптичне збільшення. Такі характеристики дозволяють виявити температурні аномалії ізоляторів реальне значення яких становить  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Сучасні тепловізори поставляються з програмним забезпеченням, необхідним для збереження та аналізу інфрачервоних зображень і для створення професійних звітів. Програмне забезпечення тепловізора дозволяє налаштовувати і змінювати основні параметри збереженого зображення (компенсацію відбитого тепла, палітру кольорів і так далі). Це не тільки підвищує зручність і достовірність обстеження тепловізором, але і позбавляє від необхідності повторного сканування устаткування.

Відомі світові виробники NEC, Fluke, Flir, Flex, Land Guide, IRISYS виготовляють багато типів тепловізорів (Додаток Г) з різними функціональними можливостями та призначенням. Модифікація тепловізора «Fluke TIR» має обмеження мальної температури вимірювання модель декілька градусів. Тепловізор «Fluke TIR» має температурне обмеження +100 °С, що дозволяє збільшити чутливість приладу. Ця модель може використовуватися для визначення місця витоку тепла в будівельних конструкціях. Випускаються спеціальні тепловізори для систем охорони, спеціалізовані тепловізори для військових тощо.

Тепловізори можуть бути оснащені вузько-кутовим об'єктивом для багатократного оптичного збільшення, системою мовного запису коментарів (мікрофон, Bluetooth), лазерним вказівником для уточнення місця дефекту тощо.

Окрім професіональних моделей тепловізорів для зменшення собівартості приладу випускаються інженерні тепловізори з певними функціональними обмеженнями. Основні технічні характеристики інженерного та професіонального тепловізорів представлені на прикладі тепловізорів фірми Fluke (США) в додатку Д.

### 3.2 Прилади реєстрації ультрафіолетового випромінювання

Поверхневі часткові та коронні розряди в ізоляції супроводжуються випромінюванням в ультрафіолетовому спектрі. Для реєстрації ультрафіолетового випромінювання часткових розрядів в енергетичному обладнанні використовуються спеціальні прилади – електронно-оптичні дефектоскопи для візуального виявлення дефектів високовольтного устаткування по оптичному випромінюванню розрядів.

Вони призначені для дистанційного контролю високовольтного енергетичного устаткування, яке знаходиться під напругою. В основі методу діагностування лежить визначення характеристик коронних (КР) та

поверхневих часткових розрядів (ПЧР), а також їх залежностей від величини напруги та ступеня забруднення ізоляції.

За допомогою ЕОД можливе дистанційне обстеження ізоляції і устаткування. Оптичний контроль, за допомогою цього приладу дозволяє з мінімальними витратами часу виявити і визначити:

- «нульові» ізолятори в підвісній фарфоровій ізоляції;
- джерела корони і поверхневих часткових розрядів;
- мікротріщини в опорно-стрижневих ізоляторах;
- оцінити поверхневу провідність на ізоляції.

Принцип роботи ЕОД ілюструється блок-схемою на рис. 3.3.

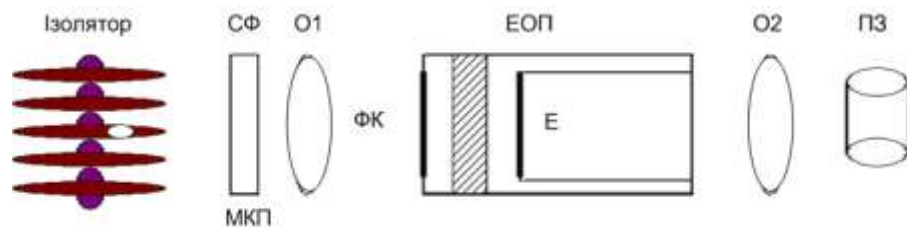


Рисунок 3.3 – Блок схема ЕОД

Оптичні зображення ізолятора, ПЧР і КР, проходячи через світло-фільтр (СФ) із смугою пропускання в короткохвильовій частині оптичного спектру, формуються вхідним об'єктивом (О1) на фотокатоді (ФК) електронно-оптичного підсилувача світла (ЕОП) з мікроканальною пластиною (МКП). Оптичні сигнали посилюються більш ніж в 20000 разів, їх можна спостерігати на екрані (Е) через окуляр (О2) або записувати яким-небудь з відповідних пристроїв запису (ПЗ). Перед вхідним об'єктивом можна встановлювати спеціальний фільтр, для оцінювання ступеня забруднення ізоляції.

Високий коефіцієнт підсилення яскравості світла дозволяє проводити діагностування з відстані в десятки метрів, що особливо важливо для профілактичного контролю устаткування під високою напругою. Розроблені методики дистанційного профілактичного контролю зовнішньої ізоляції різних

видів високовольтного енергетичного устаткування, які засновані на реєстрації характеристик оптичного випромінювання розрядних процесів, забезпечують високу продуктивність і безпеку контролю.

Електронно-оптичний дефектоскоп перетворює ультрафіолетове випромінювання розрядних процесів у видиме зображення і формує його разом із зображенням контрольованого об'єкту на екрані. Він дозволяє в польових умовах отримати і зареєструвати як миттєву, так і змінювану в реальному часі картину місця розташування ізолятора і розподіл розрядів по їх інтенсивності і частоті появи на поверхні ОСІ.

Пропонований оптичний спосіб спостереження, вивчення та реєстрації електричних розрядів в застосуванні для діагностування стану високовольтного устаткування відрізняється значно вищою чутливістю і роздільною здатністю, ніж існуючі електричні або акустичні методи. Чутливість камери настільки висока, що дозволяє виявляти з 5–7 метрів елементарний розряд в 1 пікокулон. Для досвідченого фахівця отримання подібної інформації більш ніж достатньо, щоб визначити дефект устаткування.

Ультрафіолетовий дефектоскоп виявляє такі дефекти, як:

- порушення цілісності жил проводів ПЛ;
- дефекти опорних ізоляторів і наявність поверхневих мікроскопічних тріщин фарфору;
- наявність і оцінювання ступеня забруднення будь-яких ОСІ;
- пробиті (нульові) фарфорові ізолятори в гірлянді;
- дефекти монтажу підвісок, внутрішньо-фазових розпірок ПЛ, контактних з'єднань і багато інших.

### 3.3 Прилади для проведення УЗНК

Для проведення УЗНК використовуються ультразвукові дефектоскопи – неруйнівний пристрій для контролю різних виробів з металевих та

неметалевих матеріалів з метою виявлення в них внутрішніх і поверхневих дефектів за допомогою УЗ-хвиль. Робота дефектоскопу заснована на реєстрації часткового відбиття та розсіювання ультразвукових хвиль порушеннями суцільності (тріщини, раковини) або однорідності матеріалу (зони змішування мас) контрольованого виробу. Ультразвукові дефектоскопи дозволяють також визначити час проходження сигналу в матеріалі.



Рисунок 3.4 – Коронні розряди на дефектах в нижньому та верхньому небезпечних перерізах опорно-стрижневих ізоляторів та на ізоляційних конструкціях з ОСІ, виявлені за допомогою «DayCor 11»

Як самі об'єкти, так і умови проведення контролю практично виключають можливість будь-якої механізації процесу вимірювань, не говорячи вже про автоматизацію.

Специфічною особливістю експлантаційного УЗНК ізоляторів є необхідність проведення контролю, як правило, одночасно двома операторами, незалежно від ваги і габаритів використовуваного приладу.

Специфіка об'єктів контролю потребує:

- розробки спеціальних ультразвукових перетворювачів (малогабаритні прямі сенсори з робочою частотою 5.0 МГц; мікрогабаритні похилі сенсори з кутами входження від 40° до 70° через 5°; сенсори з призматичною насадкою для вимірювання швидкостей розповсюдження «квазіголівних» та поверхневих ультразвукових коливань);

- зниження внутрішніх шумів приладу до рівня, при якому динамічний діапазон приладу дозволяє проводити вимірювання дуже малих по амплітуді «квазіголівних» хвиль;
- забезпечення широкого діапазону- вимірювання часових параметрів. оскільки протяжність об'єктів контролю у напрямі прозвучування може змінюватися в широких межах.

Специфіка умов проведення контролю (ручний, просто неба, на великій висоті, часто в труднодоступних місцях, з частою зміною налаштування режимів роботи) потребує звернути особливу увагу на реалізацію концепції зручності приладу для операторів, потребує пристосовуваності приладу до реальних можливостей операторів в конкретних умовах проведення контролю, для цього в приладі;

- забезпечено можливість вимірювання тимчасових параметрів сигналів незалежно від величини їх амплітуди;
- забезпечено можливість швидкого вимірювання часових і амплітудних параметрів, за рахунок введення відповідних ручних органів налаштування, із зручною можливістю «заморожування зображення»;
- процес налаштування приладу і проведення вимірювань максимально спрощений; при цьому забезпечено можливість високоякісного проведення всіх вимірювань, які передбачені методиками контролю ізоляторів;
- разом з функцією введення та збереження в пам'яті приладу параметрів під час налаштування, є ще одна функція – можливість швидкого ручного налаштування, що значно прискорює проведення контролю ряду типів ізоляторів, які вимагають багатократної зміни налаштування режимів роботи приладу; всі елементи налаштування відображаються на екрані приладу;
- прилад надійно захищений від пилу, води і електричних завад які присутні при роботі на діючих енергетичних об'єктах;

- передбачено можливість роботи приладу з кабелями-вставками завдовжки 5 м і 12 м, що дозволяє вести контроль як і з гідропідйомника, так і з драбин, а також реалізувати різні варіанти випробування резервних ізоляторів;

Сукупність вищевикладених особливостей, частина з яких в різних варіантах реалізована і в інших дефектоскопах загального і спеціального призначення, але без орієнтованої на специфіку контролю фарфорових ізоляторів повноти і послідовності, зумовлює якісне діагностування електротехнічного фарфору.

### 3.4 Прилади засновані на вимірюванні частоти власних коливань ОСІ

Методи неруйнівного контролю, засновані на вимірюванні частоти власних коливань (ЧВК), хоча і не знайшли до теперішнього часу такого широкого розповсюдження, як ультразвукова дефектоскопія, але сфера їх застосування останніми роками істотно розширилася. Відповідно до загальноприйнятої класифікації акустичних методів контролю ці методи розділяються на методи вільних коливань та методи вимушених коливань, які, у свою чергу, підрозділяються на локальні та інтегральні методи контролю.

Для реалізації цього методу найбільш широке розповсюдження в промисловості знайшли спеціальні прилади - вимірювачі частот власних коливань типу «Звук» двох модифікацій: «Звук-203М» (рис. 3.5), який заснований на методі вільних коливань, та «Звук-107» (рис. 3.6), заснований на резонансному методі вимірювань.



Рисунок 3.5 – Прилад «Звук-203М»



Рисунок 3.6 – Прилад «Звук-107»

Ці прилади мають повне метрологічне забезпечення. Вони працюють за методом вільних коливань, але із застосуванням спеціальної методики вимірювання і розшифровування спектру ЧВК, який змінюється в залежності від контрольованого виробу, або в залежності від виду дефекта. При цьому, прилади не можуть бути використані для контролю малогабаритних виробів.

В наш час закінчена розробка приладів «Звук» нового покоління, які працюють в комплекті з сучасними комп'ютерними засобами. Прилад "Звук-110М" складається з вимірювальної стійки та електронної плати, яка встановлюється в системний блок сучасного комп'ютера.

Вимірювання проводиться автоматично відразу після закріплення контрольованого виробу у вимірювальній стійці і запуску спеціальної програми, по якій здійснюється аналіз спектру ЧВК.

Прилад «Звук-203М» - це портативний прилад, який оператор легко утримує в руці. Прилад забезпечений вбудованим електричним мікрофоном для прийому акустичних коливань, рідкокристалічним дисплеєм для індикації результатів вимірювання та плівковою-клаватурою для управління роботою приладу. Практично миттєво після завдання удару по контрольованому виробу на дисплеї висвічується результат в одній із заданих оператором форм: ЧВК в Гц, приведена швидкість розповсюдження акустичних хвиль в м/с, звуковий індекс - градація цієї швидкості за певною шкалою або ступінь твердості виробів у вигляді літер (зокрема за міжнародною шкалою Нортон). Можлива індикація й інших фізико-механічних властивостей виробів, наприклад, модуля



Юнга, міцності, щільності, пористості та інших, при введенні в прилад відповідних кореляційних або аналітичних залежностей.

Живлення приладу здійснюється від акумуляторних батарей або від мережі з одночасним зарядженням батарей. В приладі передбачена можливість передачі даних на зовнішній пристрій по інтерфейсу *RS-232*.

Метод контролю, заснований на вимірюванні ЧВК, і прилади типу «Звук» знайшли достатньо широке застосування для контролю виробів з різних матеріалів, зокрема фарфорових виробів.

### 3.5 Пристрої для випробувань високовольтних фарфорових ізоляторів методом акустичної емісії

Метод акустичної емісії полягає в реєстрації акустичних сигналів, які генеруються при зростанні дефектів в механічно напруженому матеріалі, та визначенні по їх параметрах кількості та ступеня розвитку дефектів. В електротехнічному фарфорі розвиток небезпечної тріщини, яка здатна привести до руйнування ізолятора, може бути виявлений за допомогою ефекту Кайзера, який полягає в тому, що при двократному мехнічному навантаженні зумиллям, яке е переищує експлуатаційне, кількість сигналів у другому циклі навантаження дорівнює нулю в якісному ізоляторі, а в ізоляторі з тріщиною, яка розви-вається, досить велика [8].

Методика визначення дефектного ізолятора передбачає певну послідовність операцій. Два випробовуваних ізолятори встановлюються на раму та затягуються кріпильними болтами. На верхніх фланцях ізоляторів закріплюється блок навантаження. На боковій поверхні верхніх фанці установлюються акусичні перетворювачі. Поворо-том стяжної втулки до ізоляторів прикладається стяжне зусилля, яке реєструється динамометром.

Після прикладання зростаючого зусилля, протягом 4 секунд реєст-рується кількість імпульсів акустичної емісії. Якщо при першому навантаженні акустична емісія не спостерігається у всьому діапазоні навантажень, то ізолятор

вважається придатним. Якщо й при цьому навантаженні спостерігається акустична емісія, то виконується повто-рне навантаження із зусиллям меншим, ніж перше навантаження, По-ява при цьому акустичної емісії свідчить про ріст тріщини, і ізолятор вважається дефектним.

Дефект ізолятора визначається при його механічних випробуваннях навантаженням до 60 % від номінального навантаження, зазначеного в марці ізолятора. При цих випробуваннях дефектний ізолятор руйнується, або починає поширювати потріскування – імпульси акустичної емісії, які свідчать про ріст тріщин в тілі ізолятора або в цементному закладенні. Випробування проводяться на нових ізоляторах перед установкою та під час періодичного ремонту розподільчих установок 110 та 220 кВ. Вилучення дефектних ізоляторів з експлуа- тації дозволяє запобігти їх падінню та супутнім аваріям.

Серед приладів для виявлення дефектних опорно-стрижневих ізоляторів на діючих підстанціях методом акустичної емісії широко розповсюджений пристрій «УИФИ».

Зовнішній вигляд установки представлено на рис. 3.7 «УИФИ» складається з рами із кріпильними болтами для установки двох ізоляторів, блока навантаження з динамометром і стяжною втулкою; електронного двоканального блока реєстрації імпульсів акустичної емісії із двома акустичними перетворювачами.

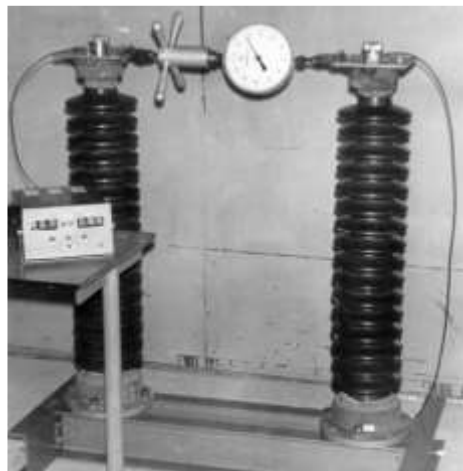


Рисунок 3.7– Прилад «УИФИ»

Акустично-емісійний контроль ізоляторів виконується також за допомогою апаратурно-методичного комплексу «ПАК-3М–УКИ-1». Комплекс складається з двоканального приладу акустико-емісійного контролю «ПАК-3М» з парою первинних перетворювачів акустичних коливань які підключають до приладу кабелями довжиною 5м.

Прилад призначений для контролю механічного стану одночасно двох опорно-стрижневих ізоляторів методом АЕ. При цьому по кожному з каналів приладу забезпечує:

- перетворення акустичних коливань поверхні ізолятора в електричні сигнали, їх обробку та індикацію поточної активності АЕ, число імпульсів в одиницю часу, при зростаючому навантаженні ізоляторів;
- вимірювання суми імпульсів АЕ при постійному навантаженні;
- автоматичний вимірювання суми імпульсів АЕ при постійному випробному навантаженні від пристрою зовнішнього запуску.

Прилад забезпечує формування вихідних сигналів «НОРМА» та «ДЕФЕКТ» за результатами вимірювань суми імпульсів при постійному навантаженні, здійснює автоматичне повторне вимірювання суми імпульсів АЕ у випадку високої активності АЕ хоча б в одному з каналів. Живлення приладу здійснюється від мережі 220 В або від вбудованого акумулятора.

Характерною особливістю цієї методики є відносно невелика величина випробного навантаження (44 % від номінального навантаження на вигин для даного типу ізолятора).

#### 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Основною метою застосування комплексного методу контролю є зменшення пошкоджень ОСІ в експлуатації, які в свою чергу можуть призвести до одного або декількох з наслідків:

- пошкодження високовольтних вимикачів внаслідок механічного руйнування ОСІ в складі їх конструкцій;
- пошкодження електрообладнання та його елементів, зокрема інших ОСІ, внаслідок механічного впливу на ошикування при падінні полюсів роз'єднувачів або шинних опор;
- пошкодження основного електрообладнання та його елементів внаслідок близьких коротких замикань при падінні ізоляторів;
- недовипуску електроенергії;
- нещасних випадків пов'язаних з падінням ізоляторів тощо.

В кожному конкретному випадку відмов економічні втрати будуть суттєво відрізнятися, в залежності від наслідків пошкодження. Результати розрахунку економічних втрат для деяких можливих наслідків при пошкодженні ізолятора та середні ціни обладнання, з врахуванням вартості транспортування, монтажу, пусконаладжувальних робіт та приймально-здавальних випробувань, які відповідають теоретично можливим втратам, наведено в таблиці 3.1 При ньому ціна високовольтних вимикачів включає вартість опорно-стрижневих ізоляторів, які входять до його складу.

Таблиця 3.1 - Економічні втрати для деяких можливих наслідків при пошкодженні одного ізолятора та ціна обладнання.

Можливі наслідки руйнування ОСІ	Ціна обладнання з врахуванням монтажу тощо, тис. грн.	Фактичні максимальні втрати викликані однією відмовою, тис. грн.	Середньорічні фактичні втрати, тис. грн
Деформування обмотки автотрансформатора 330 кВ або фази 750 кВ внаслідок близького короткого замикання	43700	3,5 (витрати на позапланові випробування)	0,23
Пошкодження елементів фази вимикача типу ВВ-330Б внаслідок тяжіння ошикування	1280	18 (витрати на заміну елементів вимикача)	1,2
Недовідпуск електроенергії	-	22	2,84
Пошкодження внаслідок механічного руйнування інших ОСІ типу:			
ИОС-35-1000 (КО-400)	1,53	174,4	14,6
ИОС-110-400 (АКО-110/400)	2,51	0	0
ИОС-110-600 (АКО-110/600)	2,9	20,3	1,9
ИОС-110-1250 (КО-1250)	3,61	7,2	0,7
ИОС-110-2000 (ОНС-2000)	4,28	8,6	0,9
Всього		174,4	22,37

Втрати від недовідпуску електроенергії розраховуються за рівнянням:

$$E_{\Delta W} = \Delta W \cdot C \quad (3.1)$$

де  $\Delta W$  -недовідпуск електроенергії, тис. кВ·год;

C- середній роздрібний тариф,  $C = 0,36$  грн./ кВт·год.

Теоретично, в разі пошкодження основного електрообладнання (автотрансформаторів, вимикачів, ТН, ТС тощо) внаслідок руйнування ОСІ, економічні втрати можуть бути в десятки разів більше. Окрім того, в даному розрахунку не враховується, що в ПЗЕС вже проведено комплексний контроль для більшої частини ОСІ, відмова яких могла викликати найбільш суттєві економічні втрати.

Необхідно встановити наступний пріоритет в черговості контролю, з точки зору матеріальних втрат при пошкодженнях ОСІ та ризику пошкодження в залежності від рівня механічного навантаження:

- ОСІ в складі повітряних вимикачів ВВБ 330-750 кВ;
- ОСІ в складі автотрансформаторних роз'єднувачів та їх шинних опор;
- поворотні колонки роз'єднувачів 330-750 кВ;
- роз'єднувачі 110 кВ та опорні колонки роз'єднувачів 330-750 кВ;
- шинні опори.

Математичне очікування вартості контролю комплексним методом розраховується за даними таблиці 3.14. За умови що всі енергосистемі укомплектовані засобами ІЧТ та біноклями для проведення ВК, а контроль здійснюється за всіма діагностичними параметрами комплексного методу, з рухуванням обмеження класом напруги та видом обладнання до складу якого входять ізолятори.

Математичне очікування вартості комплексного контролю для всіх ОСІ енергосистеми, складає 670 тис. грн.

Виходячи з фактичної статистики відмов, які сталися в ПЗЕС, термін окупності комплексного методу контролю ОСІ складає 30 років, тобто економічний ефект практично відсутній, однак, враховуючи можливість пошкодження іншого електрообладнання внаслідок руйнування ізоляторів, економічний ефект може скласти сотні тисяч гривень.

Виконаємо оцінку збільшення вірогідності контролю за помилкою 1-го роду при використанні комплексного методу контролю в порівнянні з I вірогідністю контролю, який вимагається діючими нормами.

Згідно з вимогами [13], в експлуатації проводиться візуальний контроль I ізоляторів при періодичних оглядах та ремонтах обладнання. Метод комплексного контролю, окрім цього, передбачає візуальний контроль протягом доби для умовно-придатних ізоляторів за результатами контролю засобами ІЧТ.

З практики контролю, більш детальний огляд цих ізоляторів дозволяє виявити приблизно в 1,3 рази більше ізоляторів з видимими тріщинами.

За результатами контролю ОСІ у відповідності з вимогами [19] на ПС-750 «Вінницька» засобами ІЧТ протягом 2009 року виявлено 32 дефектних ОСІ, в 2010 році - 25 ізоляторів. З врахуванням особливостей контролю ОСІ засобами ІЧТ, розглянутих в даній роботі та в розроблених нормах [2], в 2011 році виявлено 278 дефектних ізоляторів, що приблизно вії разів більше ніж в 2010 році. Витяг з журналу дефектних ОСІ за 2010 рік та протокол обстеження ОСІ в 2011 році наведено в додатку П.

Контроль методами ультразвукової структурометрії та дефектометрії в експлуатації діючими нормами практично не регламентований, оскільки відсутні граничні значення діагностичних параметрів методів. З врахуванням того, що Ще близько 35 % дефектних ізоляторів з явними ознаками дефектності, які можна виявити за допомогою УЗК без уточнення діагностичних параметрів, при розрахунку збільшення ефективності комплексного методу контролю, будемо бажати, що ймовірність виявлення дефектів за результатами УЗК збільшується втричі.

За припущення, що дефектні ізолятори спричиняють відмови з однаковою ймовірністю, оцінювати економічний ефект для варіанту пошкодження іншого обладнання будемо за формулою:

$$\Delta E = \sum_{l=1}^k C_l \cdot m_l \cdot (P' - P'_{mp}) \cdot P_{as} \cdot P_{відм} - C_{km} - C_{ocu} \cdot N \cdot (1 - P''), \quad 3.2$$

де  $C_l$  – ціна першого виду обладнання;

$m_l$  – кількість ОСІ;

$P'$ ,  $P_{mp}'$  – вірогідність за помилкою 1-го роду комплексного контролю та контролю традиційними методами;

$P_{ав}$  – умовна ймовірність пошкодження іншого енергетичного обладнання внаслідок пошкодження ОСІ, за умови відмови ізолятора;

$P_{відм}$  – ймовірність відмови ізолятора;

$C_{km}$  – вартість проведення комплексного контролю ОСІ енергосистеми;

$C_{osci}$  – середня ціна ізолятора;

$P''$  – вірогідність за помилкою 2-го роду;

$N$  – загальна кількість ОСІ.

При розрахунку економічного ефекту будемо вважати, що будь-який дефектний ізолятор може спричинити відмову з пошкодженням іншого обладнання з ймовірністю 0,001 (0,1 %). Ймовірність пошкодження іншого обладнання є добутком умовної ймовірності пошкодження іншого обладнання, за умови пошкодження ОСІ, на ймовірність пошкодження ізолятора.

Орієнтовне значення ймовірності пошкодження використовується в зв'язку з недостатністю статистичних даних для визначення її точного значення.

Запропонована методика розрахунку економічного ефекту не враховує моральні та економічні аспекти, які пов'язані з небезпекою виникнення нещасного випадку, внаслідок руйнування ізоляторів.

В таблиці 3.2 наведено дані для розрахунку економічного ефекту від впровадження комплексного методу контролю, в залежності від виду обладнання, яке може пошкодитись внаслідок руйнування ОСІ.

Таблиця 3.2 - Вартість обладнання та кількість ізоляторів, які можуть викликати його пошкодження



Вид обладнання, яке може пошкодитись внаслідок руйнування ОСІ	Середня ціна обладнання з врахуванням монтажу, тис. грн.	Кількість одиниць обладнання в енергосистемі, шт.	Кількість ОСІ, які можуть викликати пошкодження даного обладнання, ПГГ.
Фаза вимикача 750 кВ	2867	12	864
Фаза вимикача 330 кВ	1280	42	1008
Фаза АТ-750 кВ	45300	3	164
АТ-330 кВ	43700	18	1206
Фаза ТС-750 кВ	1153	18	864
Фаза ТС-750 кВ	480	123	2214
Фаза ТН-750кВ	1033	15	720
Фаза ТС-330 кВ	420	108	1944
Полюс роз'єднувача 750 кВ	215	126	3024
Полюс роз'єднувача 330кВ	35	2298	20682

Сумарний економічний ефект від впровадження комплексного методу контролю опорно-стрижневих ізоляторів в процесі експлуатації електрообладнання. з врахуванням помилок 2-го роду та вартості контролю складає 3315 тис. грн оскільки

для комплексного контролю всіх ізоляторів в Південно-Західній електроенергетичній системі необхідно близько 15 років, то середньорічний економічний ефект впровадження комплексного контролю складе 221 тис. грн, а термін окупності — 3 роки.

Висновки до розділу:

- При цьому необхідно враховувати особливості ізоляційних конструкцій для різних класів напруги.
- Різноманіття існуючих методів вимагає проведення безперервного і ретельного відбору та аналізу нових методів і технічних засобів контролю механічного стану ізоляторів.
- Існуючі методи, які потенційно можуть бути використані в експлуатації, необхідно піддати порівняльним випробуванням та оцінити адекватність результатів отриманих за їх допомогою.
- Оцінку економічної ефективності методу доцільно виконувати за економічними втратами від пошкодження основного обладнання, внаслідок руйнування ОСІ.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У випускній кваліфікаційній роботі розглянуто діагностування опорно-стрижневих ізоляторів. На електротехнічний персонал, який здійснює діагностування ізоляторів, впливають за ГОСТ 12.0.003-74 такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

### а) фізичні:

- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена рухомість повітря;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена та знижена вологість повітря у робочій зоні;
- недостатність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;
- підвищений рівень вібрації,

### в) психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (динамічні)
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

## 5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

### 5.1.1 Електробезпека

Відповідно до ГОСТ 12.1.013-78 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочому приміщенні є струмопровідною.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей

електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

Електропривод насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

#### 5.1.2 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

В установках напругою до 1 кВ огороження роблять суцільними. Безпечні відстані між огороженнями і не ізолюваними струмоведучими частинами регламентується ПУЕ і в установках до 1 кВ із суцільними огороженнями - 5см. Висота розміщення не огорожених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з електроустановками. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробоя і створити небезпеку при дотику людини до ізолюваних проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

Підготовка робочих місць і допуск до проведення вимірювань можуть провадитись тільки з дозволу оперативних працівників, а на підприємствах, де

таких працівників немає, з дозволу особи, яка видала наряд чи розпорядження за узгодженням з особою, відповідальною за електрогосподарство.

Забороняється змінювати передбачені нарядом (розпорядженням) заходи по підготовці робочих місць. В разі виникнення сумніву в достатності і правильності заходів з підготовки робочого місця і можливості безпечного виконання роботи, ця підготовка має бути припинена.

Підготовку робочих місць, як правило, виконують два працівники, які мають право на оперативні перемикання в даній електроустановці. Дозволяється виконувати підготовку робочого місця керівнику робіт з одним із членів бригади, якщо вони мають права на оперативні перемикання в даній електроустановці. Підготовку робочого місця може виконувати один працівник, крім встановлення переносних заземлень в електроустановках понад 1000 В і виконання перемикань, що здійснюються на двох і більше приєднаннях в електроустановках понад 1000 В, що не мають діючих пристроїв блокування роз'єднувачів від неправильних дій.

Допускач разом з керівником робіт повинні перевірити виконання технічних заходів по підготовці робочого місця. Якщо керівник робіт суміщує обов'язки допускача, то таку перевірку він виконує з одним із членів бригади, який має групу III. Допуск до роботи за нарядами та розпорядженнями слід провадити безпосередньо на робочому місці. Допуск провадиться після перевірки технічних заходів з підготовки робочого місця.

В цьому разі допускач має:

- перевірити, чи відповідає склад бригади зазначеному у наряді або розпорядженні, та наявність у членів бригади посвідчень про перевірку знань;
- провести інструктаж: ознайомити бригаду зі змістом наряду, розпорядження; зазначити межі робочого місця і підходи до нього; показати найближче до робочого місця устаткування та струмовідні частини приєднань, що ремонтуються, та суміжних, до яких забороняється наближатися незалежно від того, перебувають вони під напругою чи ні;

- довести бригаді, що напруга відсутня, показом встановлених заземлень та перевіркою відсутності напруги, якщо заземлення не видно з робочого місця, а в електроустановках 35 кВ і нижче (де дозволяє конструктивне виконання) з наступним дотиком рукою до струмопровідних частин, після перевірки відсутності напруги.

Після інструктажу допускача бригаду повинен проінструктувати керівник робіт щодо безпечного виконання робіт, використання інструменту, пристосувань, механізмів і вантажопідіймальних машин.

Без проведення інструктажу допуск бригади забороняється. Проведення інструктажу і допуску оформляються підписами допускача і керівника робіт (наглядача) в таблиці 3 наряду із зазначенням дати і часу. Допуск оформлюється в обох примірниках наряду, з яких один залишається у керівника робіт (наглядача), а другий - у допускача. Коли керівник робіт суміщує обов'язки допускача, допуск оформлюють в одному примірнику наряду. Під час роботи за розпорядженням час допуску реєструють в журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями.

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [16].

Мікроклімат цеху характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання.

Робота з обслуговування верстатного обладнання відноситься до категорії Пб по важкості праці.

Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1- Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху, X
Холодний	Пб	13-23	75	не більше 0,4
Теплий		15-29	70 при 25 °С	0,2-0,5

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м<sup>3</sup>.

При роботі технологічного обладнання виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [18] наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні верстатника

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

Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ГОСТу 12.1.004-91. ССБТ проектом передбачені наступні рішення [15]:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами , які встановлені безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

#### Природне освітлення

Підстанція знаходиться у Вінницькій області, система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт - середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». При боковому суміщеному освітленні КПО( $e_H$ ) = 0,9%.

Нормоване значення КПО для даного виробничого приміщення розраховуємо за формулою:

$$e_N = e_H \cdot m_N,$$

$m_N$  - коефіцієнт світлового клімату,  $m_N = 0,9$ .

Суміщене освітлення ( $e_H = 0,9\%$ ). Отже,  $e_N = 0,9 \cdot 0,9 = 0,8\%$ .

Природне освітлення одностороннє і здійснюється через вікна, які орієнтовані на північний схід.

#### Штучне освітлення

Правильна експлуатація установок природного і штучного освітлення відіграє важливу роль для створення високого рівня освітленості в приміщеннях і економії електроенергії, що витрачається на штучне електричне освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні занесені до таб. 5.2



Таблиця 5.3 - Норми освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк	
						Штучне освітлення	
						Комбіноване	Загальне
Середньої точності	Вище 0,5 до 1	IV	в	Середній, малий	Середній, темний	400	200

Для освітлення миючого відділу вибираємо світильники прямого світла ЛПО-02 з двома люмінесцентними лампами. Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

#### 5.2.4 Виробничий шум

На підприємстві джерелом шуму є обладнання, машини, механізми та верстати - механічний шум.

Шум - це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину.

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки - дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має кумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини. Процес нервово-психічних захворювань вищий серед осіб, що працюють у гомінких умовах, ніж у людей, що працюють у нормальних звукових умовах.

Відповідно до [11] рівень звука вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 10\lg(I/I_0) = 10\lg(p/p_0) = 10\lg(U/U_0) \quad (5.1)$$

де  $L$  - рівень шуму, дБ;

$p$  - звуковий тиск, Па;

$U_0$  - коливальна швидкість, 5-10 м/с;

$P_0$  - нульове значення звукового тиску, умовно прийняте рівним  $2 \cdot 10^5$  Па.

При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

-нормування за гранично допустимим спектром шуму;

-нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум - широкополосний з безперервним спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням - гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами СН 32.23-85 і наведені в таблиці 5.3 .

Таблиця 5.4 - Допустимі рівні звукового тиску

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

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

### 5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сідниці).

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів устаток і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

Таблиця 5.5 - Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

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

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

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи вузлової підстанції в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій — це підготовка та реалізація комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу (спостережень), експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій із метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків. З метою своєчасного захисту населення і територій від НС техногенного та природного характеру, запобігання та реагування на них відповідними центральними та місцевими органами виконавчої влади здійснюється: створення і підтримання в постійній готовності загальнодержавної і територіальних систем спостереження і контролю з включенням до них існуючих сил і засобів контролю; організація, збирання, опрацювання і передавання інформації про стан довкілля, забруднення харчових продуктів, продовольчої сировини, фуражу, води з радіоактивними, хімічними речовинами, мікроорганізмами та іншими біологічними агентами. Укриттю в захисних спорудах, у разі необхідності, підлягає населення

відповідно до його належності до груп (працююча зміна, населення, яке проживає в небезпечних зонах). Найважчий фонд захисних споруд використовується для господарських, культурних і побутових потреб населення. В умовах неповного забезпечення захисними спорудами в містах і інших населених пунктах, що мають об'єкти підвищеної небезпеки, основним засобом захисту населення є евакуація і розміщення його в зонах, які є безпечними для проживання людей і тварин. Евакуація проводиться із зон можливого катастрофічного затоплення, можливого небезпечного радіоактивного забруднення, хімічного ураження, в районах виникнення стихійного лиха, аварій і катастроф (якщо виникає безпосередня загроза життю і здоров'ю людей). Залежно від обстановки, яка склалася на час НС техногенного та природного характеру, може бути проведено загальну або часткову евакуацію населення тимчасового або безповоротного характеру.

5.3.1 Оцінка безпеки роботи вузлової підстанції в умовах дії іонізуючих випромінювань.

Техногенними джерелами іонізуючого випромінювання є підприємства ядерно-паливного циклу, прискорювачі заряджених часток, рентгенівські установки та інше. У природі існують стійкі і нестійкі хімічні елементи. Нестійкі елементи розпадаються на ядра атомів інших елементів. Процес спонтанного перетворення ядер атомів нестійких елементів називається радіоактивним розпадом. Цей самовільний розпад неможливо прискорити, сповільнити або зупинити. Розпад ядер супроводжується випромінюванням компонентами якого є альфа- ( $\alpha$ ), бета- ( $\beta$ ), гамма- ( $\gamma$ ) випромінювання та нейтрони. Основною властивістю іонізуючого випромінювання є його всепроникаюча здатність. Під час роботи з радіоактивними елементами значення має не їх маса, а кількість ядер, що розпадаються за секунду. Час, протягом якого кількість ядер внаслідок самочинних перетворень зменшується

вдвічі, називається періодом напіврозпаду. Позасистемна одиниця поглинутої дози – рад. На організм людини різні види іонізуючого випромінювання навіть при однаковій поглинутій дозі будуть чинити різну біологічну дію. Тому для оцінки ступеня опромінення людини необхідно знати не лише поглинуту дозу, а й вид випромінювання. Для оцінки біологічної дії радіації на організм людини вводиться поняття еквівалентної дози, що визначається як добуток поглинутої дози на коефіцієнт якості даного випромінювання. Організм людини не може відчувати навіть згубної дози переопромінення, без спеціальних приладів не може дізнатися про наявний рівень радіації.

В якості критерію оцінки безпеки даної системи можна використовувати граничне значення рівня радіації.

$$P_{zp} = K + P_{36} \frac{P_{ш}}{P_{одБ}}$$

Де  $P_{36}$  - рівень радіації, який відповідає початку зворотних змін в елементах;

$K$  - коефіцієнт надійності (приймаємо  $K = 0,95$ )

В таблиці (1) для кожного елемента наведені граничні значення потужності дози опромінення, при якій в елементах можуть виникнути зворотні процеси.

Таблиця 5.6 – Граничні значення експозиційних доз

№	Блоки (елементи)	Елементна база	$P_{36}$ , Р/год	$P_{zp}$ , Р/год
1	Блок живлення	Мікросхема КР 531 ЛР11	$10^5$	$10^4$
2	Блок керування	Тразистори КТ-814	$10^4$	
		Діоди Д220А	$10^4$	
		Конденсатори СП5-30-25	$10^7$	
		Резистори ПЕВР100-150 Ом	$10^7$	

3	Силові елементи	Трансформатор ТМН-6300 110/10	$10^7$
		Тиристори Т171-320-12	$10^5$
		Дросель ВЛМ	$10^5$

Проаналізувавши дані таблиці 1 ми визначили, що самим вразливим елементом системи з мінімальною дозою  $P_{ep} = 10^4 P$  є транзистори та діоди, а також елементи блоку живлення. Блок живлення в разі дії на нього іонізуючих випромінювань можна перенести в підвальне приміщення, що збільшить його стійкість. Тоді:

$$P_{ep} = 0,94 \cdot 10^4 = 9,5 \cdot 10^3 (P / \text{год})$$

Враховуючи коефіцієнт послаблення  $K_{осл} = 1$ , маємо:

$$P_{ep} = 0,94 \cdot 10^3 \text{ Ч} = 9,5 \cdot 10^3 (P / \text{год})$$

Визначимо допустимий час роботи в заданих умовах за формулою:

$$t_{\partial} = \frac{K_{Д_{ep}} \cdot K_{осл} + 2 \cdot \text{Ч}_{1\text{max}} \cdot \sqrt{t_n}}{2 \cdot \text{Ч}_{1\text{max}}}$$

$$t_{\partial} = \frac{10^4 \cdot \text{Ч} + 2 \cdot 4,8 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 4,8} = 2084,3 (\text{год}) = 0,23 (\text{роки})$$

Отже, безпечною робота даної системи буде в тому разі, коли граничне значення рівня радіації в умовах експлуатації не перевищуватиме  $P_{ep} = 9,5 \cdot 10^3 (P / \text{год})$

## ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто стан проблеми та задачі дослідження стосовно опорно-стрижневих ізоляторів, та зроблені такі висновки:

- Надійність роботи ОСІ в експлуатації недостатня, ізолятори залишаються найбільш вразливим елементом ВРУ.

- Переважна більшість дефектів опорно-стрижневих ізоляторів мають виробниче походження, що вимагає підвищеної уваги до культури виробництва ізоляторів, приведення вітчизняної нормативної документації, щодо вимог якості опорно-стрижневих ізоляторів, у відповідність до норм та здійснення обов'язкових приймально-здавальних випробувань ізоляторів в електроенергетичних системах.

- Пошкодження опорно-стрижневих ізоляторів майже завжди викликано втратою механічної міцності та руйнуванням ізоляторів, що зумовило спрямування більшості методів діагностування ОСІ в напрямку контролю механічного стану, а не електричних параметрів.

- Існують методи та засоби, які дозволяють суттєво підвищити ефективність виявлення дефектів ОСІ як на виробництві, так і в експлуатації, в порівнянні з традиційними методами контролю технічного стану ОСІ, які регламентуються [1].

- Метод тепловізійного діагностування ефективний для виявлення розвинених дефектів опорно-стрижневих ізоляторів, ймовірність відмов через які найбільша.

- Окрім впровадження «основних» ефективних методів, реєстрації сигналів акустичної емісії при силовому навантаженні ізоляторів та ультразвукового неруйнівного контролю, необхідно розглянути можливість комплексного використання «основного» та менш трудомісткого методу (тепловізійного



діагностування, віброакустичного методу тощо). При цьому необхідно враховувати особливості ізоляційних конструкцій для різних класів напруги.

- Різноманіття існуючих методів вимагає проведення безперервного і ретельного відбору та аналізу нових методів і технічних засобів контролю механічного стану ізоляторів.

- Існуючі методи, які потенційно можуть бути використані в експлуатації, необхідно піддати порівняльним випробуванням та оцінити адекватність результатів отриманих за їх допомогою.

- Оцінку економічної ефективності методу доцільно виконувати за економічними втратами від пошкодження основного обладнання, внаслідок руйнування ОСІ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лабзун М.П. Методи та засоби діагностування опорно-стрижневих ізоляторів/ О.Є. Рубаненко, В.М. Кутін –Вінниця: ВНТУ, 2010.-323с.
2. "Insulator Diagnostic Techniques: Past, Present, and Future" - В.М. Weedy, J.T. Pearson (1996) "Діагностичні техніки для ізоляторів: минуле, сьогодення та майбутнє" - Б.М. Віді, Дж.Т. Пірсон (1996)
3. "Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment" - R.E. James, Q. Su (2007) "Оцінка стану ізоляції високовольтного обладнання електроенергетичних систем" - Р.Е. Джеймс, К. Су (2007)
4. "Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair" - G. Chen, D. T. Yang (2004) "Електрична ізоляція обертових машин: проектування, оцінка, старіння, випробування та ремонт" - Г. Чен, Д.Т. Янг (2004)
5. "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment" - Н. О. Dieterich, J. S. Chang (2018) "Виявлення часткового розряду в високовольтному обладнанні" - Г. О. Дітеріх, Дж. С. Чанг (2018)
6. "Методи діагностики та оцінки технічного стану опорно-стрижневих ізоляторів електропередавальних ліній" - В. М. Бойко, О. П. Кузнєцов, Л. В. Сікорський (2011)
7. "Діагностика електроізоляції ізоляторів та кабельних ліній в електроенергетичних системах" - В. Г. Верба, В. П. Литовченко, Ю. Г. Овчаренко (2008)
8. "Діагностика ізоляції електроенергетичного обладнання" - В. В. Жук, В. І. Рубан (2006)
9. "Оцінка залишкового ресурсу електроізоляційних матеріалів та їх конструкцій" - М. О. Батрин, В. М. Горбач (2015)
10. Лесько В. О., Кравчук С.В., Сікорська О.В. Електричні апарати: Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 145 с

11. Методичні вказівки до виконання магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма – «Електричні системи і мережі») [Електронний ресурс] / уклад.: В. О. Комар, В. В. Тептя, Ю. В. Малогулко. – Вінниця: ВНТУ, 2023, (PDF, 96 с.)

**ДОДАТОК А**  
**ПРОТОКОЛ**  
**ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ**  
**ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: «Дослідження методів та засобів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

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

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність \_\_\_\_\_ Схожість \_\_\_\_\_

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вишневський С. Я.  
(прізвище, ініціали)

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

Автор роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

С. Д. Ладанюк.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

С. В. Матвієнко  
(прізвище, ініціали)

## ДОДАТОК Б

### Технічне завдання МКР

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

---

(підпис)

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2023 р.

### ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

**Дослідження методів та засобів діагностування опорно-стрижневих  
ізоляторів**

08-21.МКР.021.00.004 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н.

\_\_\_\_\_ С. В. Матвієнко

(

Магістр групи ЕС-22м

\_\_\_\_\_ С. Д. Ладанюк.

(

Вінниця 2023 р.

## **1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)**

а) актуальність досліджень та основним завданням на сьогодні є покращення існуючих методів і розробка нових для діагностики високовольтного обладнання в електроенергетичних системах. Діагностика спрямована на визначення стану електричного обладнання (справність, несправність, готовність до експлуатації тощо), виявлення місця та причин пошкоджень, визначення можливості подальшого використання, передбачення залишкового ресурсу та потреби у ремонті.

б) наказ ректора ВНТУ № 247 від 18 вересня 2023 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

## **2. Мета і призначення МКР**

а) мета – підвищення ефективності функціонування ОЕС України за рахунок дослідження методів та засобів діагностування опорно-стрижневих ізоляторів;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

## **3. Джерела розробки**

Список використаних джерел розробки:

1. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 194 с.

2. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.

3. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики України. Аналітична доповідь / О. М. Суходоля та ін. Київ, 2014. 112 с. [Електронний ресурс].

## **4. Технічні вимоги до виконання МКР**

Конструктивне виконання існуючих опорно-стрижневих ізоляторів; методи та засоби їх діагностування; нормативна документація; статистичні.

## **5. Економічні показники**

- Оцінку економічної ефективності методу доцільно виконувати за економічними втратами від пошкодження основного обладнання, внаслідок руйнування ОСІ.

### 6. Етапи МКР та очікувані результати

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	21.09.23	23.09.23	формування технічного завдання
2	Стан проблеми і задачі дослідження	24.09.23	29.09.23	аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
3	Методи виявлення дефектів фарфорової ізоляції	30.09.23	10.10.23	розділ 2 ПЗ
4	Обладнання для випробувань, контролю та діагностування опорно-стрижневих ізоляторів	11.10.23	28.10.23	розділ 3 ПЗ
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.10.23	05.11.23	розділ 4 ПЗ
6	Економічна частина	06.11.23	12.11.23	розділ 5 ПЗ
7	Оформлення пояснювальної записки	13.11.23	21.11.23	ПЗ
8	Виконання графічної/ілюстративної частини та оформлення презентації	22.11.23	27.11.23	пояснювальна записка
9	Перевірка МКР на плагіат. Попередній захист МКР	28.11.23	01.12.23	Результат перевірки на плагіат, відгук керівника
10	Рецензування МКР	01.12.23	04.12.23	Відгук опонента
	Захист МКР	Перша декада червня		Доповідь та відповіді на запитання

### 7. Очікувані результати

Підвищення ефективності контролю технічного стану опорно-стрижневих ізоляторів шляхом застосування комбінованого методу діагностування, а саме

засобів інфрачервоної техніки, приладів контролю проходження тестового ультразвукового сигналу та інших засобів періодичного неруйнівного контролю.

#### **8. Матеріали, що подаються до захисту МКР**

Пояснювальна записка МКР (паперовий екземпляр), ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук опонента, анотації до МКР українською та іноземною мовами, протокол перевірки МКР на наявність текстових запозичень.

#### **9. Порядок контролю виконання та захисту МКР**

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником та завідувачем кафедри ЕСС згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

#### **10. Вимоги до оформлення МКР**

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:2, 2021 р.

#### **11. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом**

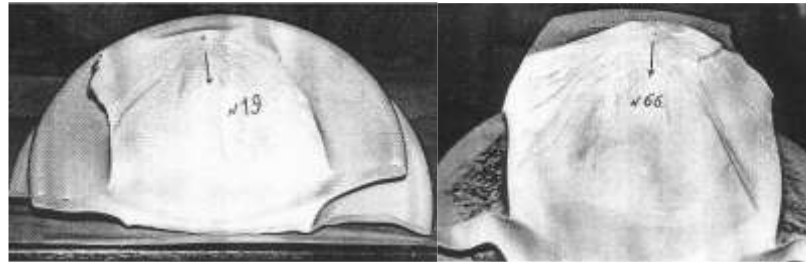
Відсутні.



**ДОДАТОК В. ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**Класифікація ізоляторів**

За призначенням	Лінійні			Станційно-апаратні				
				прохідні ізолятори та вводи		опорні		
по типу	штиреві	тарілчасті	стрижневі	форфорові	апаратні вводи	опорно-штиреві	опорно-стрижневі	опорні полімерні
за конструктивним виконанням	суцільні, склеєні	з конусною головкою, з циліндричною головкою	з фарфоровим ізолятором, з полімерним покриттям	з повітряною порожниною, без повітряної порожнини	паперово-бакелітові, масло-бар'єрні, паперово-масляні, з твердою ізоляцією	з закладенням арматури: -зовнішнім; -внутрішнім; -комбінованим	звичайні, зі збільшеною довжиною шляху витoku (з додатковими ребрами)	з склопластиковим стрижнем, з склопластиковим циліндром
за місцем установки	лінійні	лінійні	лінійні/апаратні	стаціонарні/апаратні	апаратні	стаціонарні	апаратні/стаціонарні	апаратні/стаціонарні
виконання за умовами експлуатації	зовнішні	зовнішні	зовнішні	внутрішні/зовнішньо-внутрішні	зовнішні(паперово-бакелітові; внутрішні/зовнішні)	внутрішні/зовнішні	внутрішні/зовнішні	внутрішні/зовнішні
по класу напруги(одиночні)	до 35 кВ включно	до 10 кВ включно	до 110 кВ включно	до 35 кВ включно	110 кВ і вище	до 35 кВ включно	до 110 кВ включно (іноді 220кВ, 330 кВ)	до 220 кВ включно

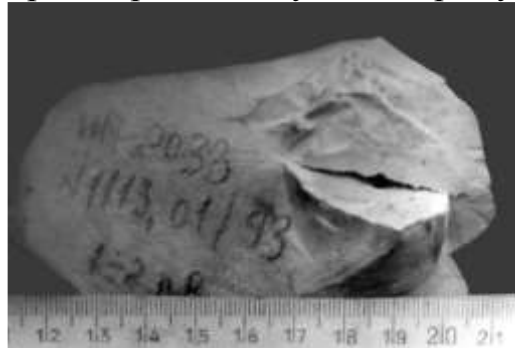
Фотографії місцевих дефектів різних видів



а) приповерхневі макроскопічні МД



б) крупний зосереджений дефект в опорно-стрижневому ізоляторі, зумовлений металевим (Fe) включенням



в) Крупний зосереджений дефект в опорно-стрижневому ізоляторі, зумовлений неметалевим включенням

## Порівняння ефективних методів контролю ОСІ в експлуатації

Метод	Переваги	Недоліки
Візуальний контроль зовнішнього стану	<ul style="list-style-type: none"> <li>- не трудомісткий;</li> <li>- не потребує відключення обладнання;</li> <li>- не потребує матеріальних затрат</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- дозволяє виявляти тільки явно видимі тріщини ОСІ, не дозволяє виявити внутрішні дефекти;</li> <li>- має найбільшу умовну ймовірність невиявленої несправності при контролі</li> </ul>
Контроль засобами ІЧТ (метод термографії)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- висока продуктивність (не трудомісткий);</li> <li>- не потребує відключення; дозволяє виявити внутрішні дефекти, пов'язані з ВМП;</li> <li>- не має обмежень по класу напруги обладнання</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- відносно висока умовна ймовірність невиявленої несправності;</li> <li>- вимагає зволоженого стану дефектних внутрішніх об'ємів ОСІ;</li> <li>- ефективний лише при незначних конвекційних потоках повітря;</li> </ul>
Метод акустичної емісії (АЕ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низька умовна ймовірність невиявленої несправності при контролі;</li> <li>- дозволяє виявити дефекти пов'язані з механічною втомою фарфору;</li> <li>- менш трудомісткий порівняно з УЗНК ;</li> <li>- не потребує спеціальної кваліфікації персоналу, який виконує випробування</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- обмеження використання методу типом та класом напруги обладнання;</li> <li>- вимагає відключення обладнання</li> <li>- необхідність багаторазового випробувального навантаження;</li> <li>- дефект ВМП виявляється лише при ушкодженні фарфору; виявляються тільки нестабільні тріщини, які зростають при механічному навантаженні.</li> </ul>
Метод фуксинової проби під тиском	<ul style="list-style-type: none"> <li>- дозволяє визначати критерії дефекту ВМП для інших методів контролю</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- руйнівний метод – не можливий без руйнування ізолятора</li> </ul>
Ультразвукова структурометрія та дефектометрія (УЗНК)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низька умовна ймовірність невиявленої несправності при контролі;</li> <li>- дозволяють виявити майже всі можливі види дефектів ОСІ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- вимагає відключення обладнання;</li> <li>- велика трудомісткість</li> <li>- виконується експлуатаційний контроль тільки небезпечних перерізів та армованих частин ізолятора, а не всього об'єму фарфорової частини</li> </ul>
вібро-акустичний метод	<ul style="list-style-type: none"> <li>- не трудомісткий</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- низька умовна ймовірність невиявленої несправності при контролі.</li> </ul>

## Моделі сучасних тепловізорів різних конструкцій та виробників



Flexcam Pro (Flex)



ThermaCAM P-65 (Flir System)



ThermaCAM E2 (Flir System)



MobIR M4 (Guide)



IR913 (Guide)



K6700 (NEC)



K6900 (NEC)



IR-InSight T

## ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто стан проблеми та задачі дослідження стосовно опорно-стрижневих ізоляторів, та зроблені такі висновки:

- Надійність роботи ОСІ в експлуатації недостатня, ізолятори залишаються найбільш вразливим елементом ВРУ.
- Переважна більшість дефектів опорно-стрижневих ізоляторів мають виробниче походження, що вимагає підвищеної уваги до культури виробництва ізоляторів, приведення вітчизняної нормативної документації, щодо вимог якості опорно-стрижневих ізоляторів, у відповідність до норм та здійснення обов'язкових приймально-здавальних випробувань ізоляторів в електроенергетичних системах.
- Пошкодження опорно-стрижневих ізоляторів майже завжди викликані втратою механічної міцності та руйнуванням ізоляторів, що зумовило спрямування більшості методів діагностування ОСІ в напрямку контролю механічного стану, а не електричних параметрів.
- Існують методи та засоби, які дозволяють суттєво підвищити ефективність виявлення дефектів ОСІ як на виробництві, так і в експлуатації, в порівнянні з традиційними методами контролю технічного стану ОСІ, які регламентуються [1].
- Метод тепловізійного діагностування ефективний для виявлення розвинених дефектів опорно-стрижневих ізоляторів, ймовірність відмов через які найбільша.
- Окрім впровадження «основних» ефективних методів, реєстрації сигналів акустичної емісії при силовому навантаженні ізоляторів та ультразвукового неруйнівного контролю, необхідно розглянути можливість комплексного використання «основного» та менш трудомісткого методу (теповізійного діагностування, віброакустичного методу тощо). При цьому необхідно враховувати особливості ізоляційних конструкцій для різних класів напруги.
- Різноманіття існуючих методів вимагає проведення безперервного і ретельного відбору та аналізу нових методів і технічних засобів контролю механічного стану ізоляторів.
- Існуючі методи, які потенційно можуть бути використані в експлуатації, необхідно піддати порівняльним випробуванням та оцінити адекватність результатів отриманих за їх допомогою.
- Оцінку економічної ефективності методу доцільно виконувати за економічними втратами від пошкодження основного обладнання, внаслідок руйнування ОСІ