

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

---

доцент Чепіжний А.В.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження системи контролю та  
діагностування стану силових трансформаторів»

Виконав

---

(підпис)

Майборода В. Г.  
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301м

(Науковий) керівник:

---

(підпис)

Сіренко В.Ф.  
(прізвище, ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

доцент \_\_\_\_\_ Чепіжний А.В.  
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**  
**ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Майбороді Віталію Григоровичу  
(прізвище, ім'я та по батькові)

**1. Тема роботи:** Дослідження системи контролю та діагностування стану силових трансформаторів

керівник роботи: Сіренко Віктор Федорович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» \_\_\_\_\_ 02 \_\_\_\_\_ 2024 р. № 572/ос

**2. Термін подання здобувачем закінченої роботи** «11» \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи** Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела

**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, що підлягають розробці):

1. Дослідження впливу експлуатаційних і зовнішніх факторів на технічний стан силових трансформаторів.

2. Аналіз автоматизованих систем діагностування та моніторингу трансформаторів.

3. Дослідження ефективності використання систем контролю та діагностування стану силових трансформаторів

4. Охорона праці

5. Економічне обґрунтування

Висновки та пропозиції

Список використаної літератури

Додатки

**5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

## КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4» та «Розділ 5»	до 21.10.2024 р.	
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_ (Майборода В. Г.)  
(підпис) (прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник  
дипломної роботи**

\_\_\_\_\_ (Сіренко В. Ф.)  
(підпис) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Дослідження системи контролю та діагностування стану силових трансформаторів: Дипломна робота / Майборода Віталій Григорович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 47 с.

Дипломна робота присвячена дослідженню системи контролю та діагностування стану силових трансформаторів, які є критичними елементами електроенергетичних мереж.

Об'єкт дослідження – силові трансформатори, які використовуються в електроенергетичних системах для передачі та розподілу електроенергії, а також системи їхнього контролю та діагностування технічного стану.

Мета роботи – дослідження ефективності застосування автоматизованої системи моніторингу та діагностики стану силових трансформаторів систем електропостачання.

У першому розділі розглянуто основні види пошкоджень трансформаторів, методи їх діагностування та контроль технічного стану на основі показань вимірювальних приладів. Другий розділ присвячений аналізу автоматизованих систем діагностування та моніторингу. Розглянуто переваги їх застосування, проведено огляд існуючих систем, таких як EcoStruxure Transformer Expert, та вибрано оптимальний варіант для впровадження.

У третьому розділі досліджено ефективність використання систем моніторингу. Проаналізовано результати моніторингу стану трансформаторів із використанням системи EcoStruxure Transformer Expert, яка продемонструвала високу точність діагностики та можливість зниження експлуатаційних витрат. Оцінено можливий економічний ефект від впровадження систем контролю.

**Ключові слова:** силові трансформатори, контроль технічного стану, діагностування, автоматизовані системи моніторингу, пошкодження трансформаторів.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ І ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ</b> .....	8
1.1. Види пошкоджень силових трансформаторів .....	8
1.2. Аналіз методів діагностування силових трансформаторів .....	12
1.3. Контроль за показаннями вимірювальних приладів .....	14
1.4. Аналіз пошкоджень внутрішньої ізоляції силових трансформаторів ...	16
1.5. Висновки до розділу 1.....	17
<b>2. АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ТРАНСФОРМАТОРІВ</b> .....	18
2.1. Переваги застосування автоматизованих систем діагностування та моніторингу трансформаторів.....	18
2.2. Аналіз існуючих автоматизованих систем діагностування та моніторингу.....	20
2.3. Вибір оптимального варіанту системи моніторингу.....	25
2.4. Висновки до розділу 2.....	26
<b>3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ</b> .....	27
3.1. Характеристика системи EcoStruxure Transformer Expert.....	27
3.2. Аналіз результатів моніторингу стану трансформаторів із застосуванням системи EcoStruxure Transformer Expert .....	31
3.3. Аналіз можливого ефекту від впровадження систем контролю.....	35
3.4. Висновки до розділу 3.....	36
<b>4. ОХОРОНА ПРАЦІ</b> .....	37
<b>5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ</b> .....	41
<b>ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ</b> .....	43
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	44
<b>ДОДАТКИ</b> .....	47

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність дослідження системи контролю та діагностування стану силових трансформаторів зумовлена важливістю забезпечення стабільної та безпечної роботи електроенергетичних систем. Силові трансформатори є ключовими елементами в енергетичних мережах, оскільки вони забезпечують передачу електроенергії на різні відстані з мінімальними втратами. Їхній несправний стан може призвести до серйозних аварій, перебоїв в енергопостачанні та значних фінансових втрат для підприємств і споживачів.

Зважаючи на те, що сучасні енергетичні системи зазнають значних навантажень через збільшення обсягів споживання електроенергії та впровадження відновлюваних джерел енергії, постає нагальна потреба у впровадженні ефективних методів моніторингу та діагностики силових трансформаторів. Використання сучасних технологій для виявлення ранніх ознак дефектів, таких як зміна характеристик ізоляції, перегрів або механічні пошкодження, дозволяє уникати аварійних ситуацій, оптимізувати витрати на обслуговування та продовжувати термін експлуатації обладнання.

Таким чином, дослідження у цій сфері спрямоване на розробку нових та вдосконалення існуючих методів контролю, що дозволяє підвищити надійність роботи енергетичних мереж та забезпечити енергетичну безпеку на національному та глобальному рівнях.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження ефективності застосування автоматизованої системи моніторингу та діагностики стану силових трансформаторів систем електропостачання.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- дослідити вплив експлуатаційних і зовнішніх факторів на технічний стан силових трансформаторів;
- провести аналіз автоматизованих систем діагностування та моніторингу стану силових трансформаторів;

- проаналізувати ефективність застосування автоматизованої системи діагностування та моніторингу стану силових трансформаторів;
- обґрунтувати застосування систем оцінки стану силових трансформаторів на підстанціях.

**Об’єктом дослідження** є силові трансформатори, які використовуються в електроенергетичних системах для передачі та розподілу електроенергії, а також системи їхнього контролю та діагностування технічного стану.

**Предметом дослідження** є методи, алгоритми та технічні засоби контролю й діагностування стану силових трансформаторів, спрямовані на підвищення ефективності моніторингу, виявлення дефектів і прогнозування їхнього розвитку для забезпечення надійності роботи електроенергетичних систем.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у створенні вдосконалених систем контролю та діагностування стану силових трансформаторів, що дозволяють підвищити надійність і безпеку їхньої експлуатації.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи висвітлено у двох тезах доповідях та обговорено на міжнародній науково-практичній конференції [1, 2].

# 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ І ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

## 1.1. Види пошкоджень силових трансформаторів

Силові трансформатори є ключовими компонентами у складі обладнання електростанцій, підстанцій та різних типів перетворювальних пристроїв. Їх конструкція, призначення, умови експлуатації та інші особливості зумовлюють необхідність застосування різних підходів до їх обслуговування та використання [3, 4].

У процесі експлуатації трансформаторів зазвичай виникають типові проблеми [3, 4, 5, 6]. Ефективність роботи цих пристроїв залежить від здатності своєчасно виявляти відхилення у функціонуванні, проводити профілактичні заходи та здійснювати якісний ремонт. Чим вищий рівень обслуговування та контролю за станом трансформатора, тим рідше виникають несправності.

Причинами порушень у роботі або пошкоджень можуть бути конструктивні недоліки, приховані дефекти виробництва, порушення під час транспортування, монтажу або експлуатації [3], а також неякісно виконані ремонтні роботи. У більшості випадків пошкодження розвиваються поступово під впливом тривалих несприятливих факторів. Завчасне виявлення дефектів дозволяє здійснити превентивні заходи, що сприяють збереженню працездатності трансформатора на тривалий термін.

Серед несправностей трансформаторів напругою 110 кВ найбільш розповсюдженою є пошкодження високовольтних вводів (рис. 1.1) [4]. Нині в експлуатації знаходяться герметичні та негерметичні маслонаповнені вводи, а також вводи з твердою ізоляцією.

У негерметичних вводах найбільш уразливим місцем є система захисту оливи від проникнення вологи. Якщо не здійснювати своєчасної заміни силікагелю, олива поступово зволожується, що погіршує її ізоляційні

властивості та може спричинити появу часткових розрядів. Це явище призводить до утворення на паперовій ізоляції так званих "повзучих" розрядів.



Рис. 1.1. Приклад пошкодження введів силового трансформатора

Вони виникають у вигляді обвуглених слідів, що поширюються від пошкоджених точок і створюють характерні деревоподібні візерунки. Такі пошкодження знижують міцність ізоляції, а за умови наближення цих розрядів до заземлених елементів може відбутися пробій, який викликає коротке замикання. Аналогічні дефекти можуть виникати й через недостатню просушку паперової ізоляції під час ремонту вводу.

Герметичні вводи, порівняно з негерметичними, демонструють вищу надійність. Проте й вони не є повністю захищеними від ушкоджень. Одним із поширених дефектів є порушення герметичності, яке часто трапляється в зоні кріплення верхньої контактної шпильки. Такі проблеми можуть виникати через помилки під час збирання, перевищення допустимого радіального навантаження гнучким спуском та інші подібні фактори. Втрата герметичності дозволяє волозі з навколишнього середовища проникати в оливу, що спричиняє зволоження ізоляції та подальше пошкодження обладнання.

Ще одним поширеним типом несправностей є дефекти пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН) (рис. 1.2.). Вони можуть бути викликані неправильним налаштуванням контактів, що сприяє утворенню на

їхній поверхні оксидної плівки в умовах рідкісного перемикання або несвоєчасного технічного обслуговування. Крім того, пошкодження можуть виникати через порушення у кінематичній схемі роботи пристрою [8].

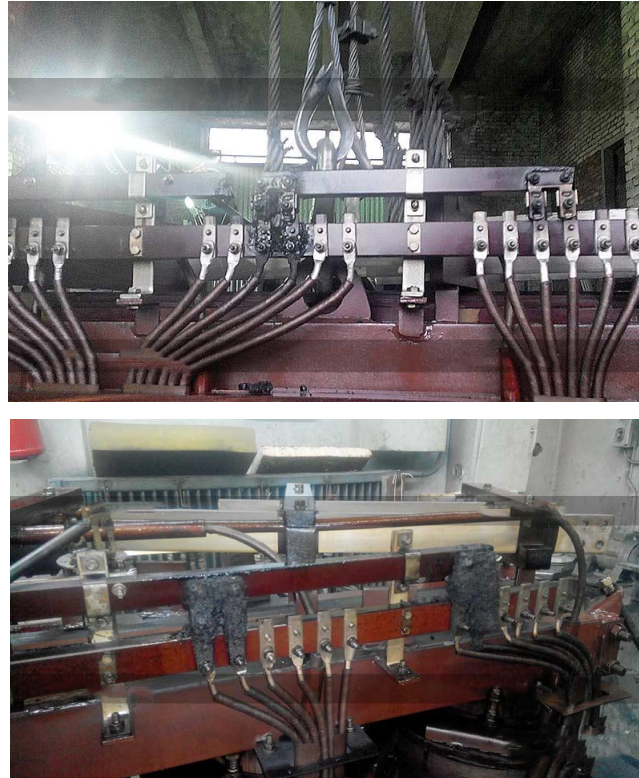


Рис. 1.2. Пошкодження пристрою РПН трансформатора

Перемикач РПН може зазнати пошкоджень, якщо трансформаторна олива не буде своєчасно замінена. Спрацьовування допоміжних і дугогасячих контактів контактора при перемиканні відбувається за лічені частки секунди. Якщо олива втрачає свої дугогасящі властивості, процес гасіння дуги може затягнутися, що спричиняє можливість короткого замикання в регулювальних обмотках трансформатора через електричну дугу замість дугогасящого резистора. Це може привести до серйозних аварій і порушення нормальних характеристик обмоток.

Ще одним чинником, який може викликати пошкодження РПН, є забруднення або вологість ізоляції його елементів, а також виробництво деталей з порушенням технічних вимог або ослаблення кріплень.

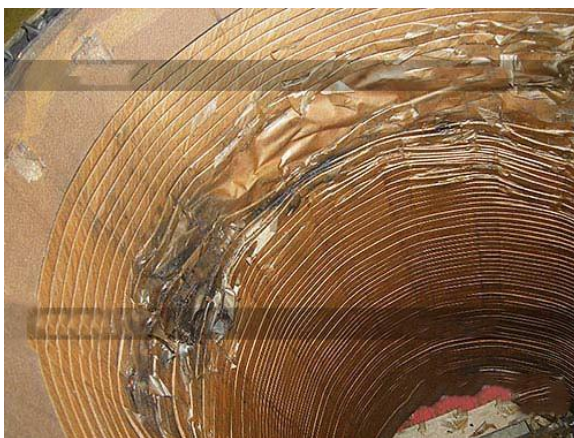
Найсерйозніші наслідки виникають при пошкодженні обмоток і головної ізоляції трансформаторів (рис. 1.3.). Погано просушена ізоляція або забруднене чи вологе масло може призвести до ослаблення твердих ізоляційних матеріалів, що спричиняє виникнення «повзучих» розрядів або їх відсутність, але з подальшим пробоем. Крім того, порушення технології виготовлення (наприклад, неправильні розміри між шарами електрокартону, дефекти намотки ізоляції), несправності в охолоджувальних системах, часті перевантаження трансформатора за струмом і напругою також можуть стати причиною аварійних ситуацій [9-12].



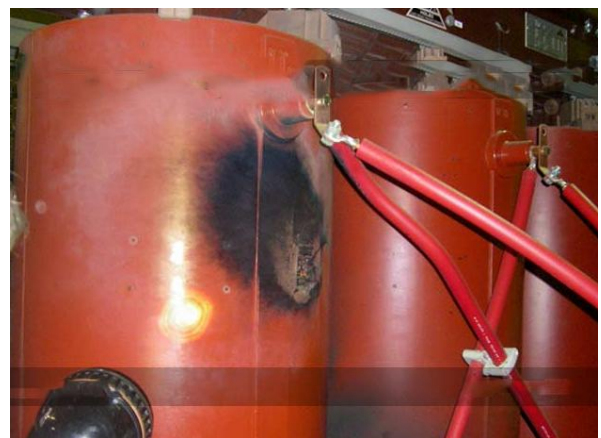
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.3. Пошкодження ізоляції обмоток трансформаторів: а), б) – стан ізоляції після короткого замикання; б) – пробій та механічне пошкодження ізоляції в результаті потужного КЗ; г) – КЗ обмотки в литій ізоляції

Зважаючи на різноманітність можливих причин і серйозні наслідки пошкоджень виткової та головної ізоляції, цим проблемам приділяється особлива увага в експлуатації трансформаторів.

Зі збільшенням енергетичних потужностей зростають і величини коротких замикань (КЗ). Це призводить до того, що підвищене значення КЗ, в поєднанні з ослабленою ізоляцією обмоток, може зробити їх електродинамічну стійкість недостатньою для витримування зовнішнього короткого замикання. У такому випадку обмотка може зазнати деформації чи руйнування, навіть якщо її ізоляція до цього була у хорошому стані.

Не менш важливим для надійної роботи трансформатора є стан його допоміжних елементів і систем. Наприклад, через поломку маслососа в трансформаторне масло можуть потрапити металеві частки та інші забруднення. У разі порушення герметичності ущільнень в масло може проникати волога. Якщо стрілочний масловказівник вийде з ладу, рівень масла може вийти за межі допустимих значень (мінімум чи максимум).

Аналіз основних типів пошкоджень показує, що більшість з них розвиваються поступово. Це означає, що за умови правильно розробленого плану перевірок стану трансформаторів можна вчасно виявити дефекти до того, як вони досягнуть критичних значень. У такому разі трансформатор можна вимкнути і відправити на ремонт, запобігши аварії або відмові, а також мінімізуючи витрати та час на відновлення обладнання і зменшуючи ризик перебоїв в постачанні електроенергії.

## **1.2. Аналіз методів діагностування силових трансформаторів**

З виникненням закритих масляних трансформаторів постала проблема ефективного контролю їхнього стану [4]. Для проведення огляду внутрішніх компонентів необхідно було вимкнути трансформатор, злити масло, виконати ревізію, а потім залити нове масло, суворо дотримуючись всіх процедур. У разі порушення цих правил, перед повторним запуском трансформатора

проводилась його додаткова сушка. На початку масового використання масляних трансформаторів ремонти з відкриттям виконувались часто, що створювало значні незручності, тому було необхідно знайти методи контролю, які не вимагали б відкриття трансформатора та зливу масла. Крім того, було виявлено, що часті відкриття трансформатора без необхідності збільшують ризик його пошкодження.

Зараз, відповідно до інструкцій виробників, капітальний ремонт силових трансформаторів напругою 110 кВ і вище має здійснюватися вперше не пізніше, ніж через 12 років після введення в експлуатацію. Надалі ремонти проводяться залежно від результатів профілактичних випробувань і стану обладнання (рис 1.4.).



Рис. 1.4. Стан активної частини трансформатора при правильній експлуатації протягом 50 років

Діагностика стану трансформаторів – це набір заходів, що включають використання різноманітних технічних засобів для перевірки та оцінки їхнього стану [3, 4].

Для діагностики використовуються прості механічні, фізичні, хімічні, візуальні методи або їх комбінації. Наприклад, виявлення вологи в трансформаторному маслі може здійснюватися за допомогою індикаторного силікагелю, який змінює колір, або через хімічний аналіз. Присутність часткових розрядів в маслі або твердих ізоляційних матеріалах можна

визначити за допомогою спеціальних індикаторів часткових розрядів або через аналіз газів, розчинених у маслі. Для початкової оцінки часто використовують прості методи, але для більш детального з'ясування місця та природи дефектів можуть бути застосовані більш складні дослідження.

Контроль стану трансформатора є складним і багатофазним процесом, який починається вже на етапі виробництва. На цьому етапі перевіряються якість ізоляційних та активних матеріалів, окремих компонентів і вузлів, а також точність складання. Після цього готовий трансформатор проходить повне тестування на випробувальній станції, що розташована на території заводу-виготовлювача, де є всі необхідні засоби для діагностики та вимірювань параметрів.

При транспортуванні трансформатора здійснюється контроль його герметичності, а також перевірка на наявність механічних пошкоджень, таких як удари. Після того, як трансформатор доставлений на місце, перевірки продовжуються. Вони також проводяться під час зберігання, монтажу та налаштування трансформатора, відповідно до технічних нормативів, зокрема «Трансформатори силові. Транспортування, розвантаження, зберігання, монтаж і введення в експлуатацію» [4].

Після завершення монтажу трансформатор проходить додаткові випробування для оцінки його стану перед введенням в експлуатацію, згідно з вимогами, викладеними в «Правилах улаштування електроустановок» (ПУЕ).

### **1.3. Контроль за показаннями вимірювальних приладів**

ПУЕ визначають обов'язкові інтервали для перевірки стану трансформаторів. Наприклад, працівники повинні проводити огляд трансформаторів з періодичністю від одного дня до одного місяця. Водночас показники вимірювальних приладів, які встановлюються на трансформаторі, можуть зніматися набагато частіше – від одного разу кожні 3 години до

кожних 10 хвилин, якщо необхідно детально перевірити конкретний елемент або ділянку обладнання.

Варто зазначити, що самі прилади, встановлені на трансформаторі, не є достатніми для оцінки його загального стану. Однак вони відіграють важливу роль у своєчасному виявленні перевантажень за струмом чи напругою. Правила технічної експлуатації, а також відповідні норми і інструкції від виробника визначають максимально допустимі перевищення напруги та струму над номінальними значеннями, а також максимальну тривалість таких перевищень. Наприклад, для трансформаторів допускається тривале підвищення напруги на 5 % більше номінального при номінальному навантаженні, а при малому навантаженні (до 25 % від номінального) – до 10 % понад номінальне значення.

У випадку аварійних режимів допускається короткочасне перевантаження струмом, зокрема [4]:

- перевантаження за струмом, %: 30, 45, 60, 75, 100;
- допустима тривалість, хв: 120, 80, 45, 20, 10.

Під час регулярних перевірок пристроїв РПН важливо звертати увагу на точність показань індикаторів у приводному механізмі та на щиті управління, а також на відповідність значень на різних фазах пристрою. Огляд трансформатора має включати перевірку всіх вимірювальних і контрольних засобів, оскільки вони можуть вказувати на наявність несправностей або потенційну загрозу дефектів.

Важливою частиною кожного огляду є вимірювання температури трансформаторного масла, при цьому показники температури мають бути зафіксовані. Якщо температура масла підвищується, необхідно встановити причини та вжити відповідних заходів для усунення проблем. Перш за все, перевіряється система охолодження трансформатора. Якщо система охолодження функціонує належним чином, то підвищення температури може свідчити про внутрішні пошкодження трансформатора, такі як утворення короткозамкнутого контуру, збільшення опору в контактних з'єднаннях,

зменшення відстані між масляними каналами через набряк ізоляції, потрапляння сторонніх предметів або вологість масла. У будь-якому разі, тривала робота трансформатора з підвищеною температурою масла є неприйнятною.

Якщо виявлені дефекти не можна усунути без відключення трансформатора, відповідне рішення приймається керівництвом електростанції, підприємства електричних мереж або головним енергетиком промислового підприємства. При виявленні внутрішніх пошкоджень, таких як викид газу, трансформатор має бути негайно відключений персоналом, а вищий черговий персонал має бути попереджений про ситуацію

#### **1.4. Аналіз пошкоджень внутрішньої ізоляції силових трансформаторів**

У процесі експлуатації силових трансформаторів важливо запобігти виникненню дефектів у внутрішніх компонентах, оскільки вони можуть призвести до серйозних пошкоджень обладнання. Як зазначалося раніше, основною причиною відмов маслонаповнених трансформаторів є зниження електричної міцності їх внутрішньої ізоляції. Пошкодження трансформаторів впливають не лише на якість електропостачання, а й можуть спричинити великі аварії.

З підвищенням класу напруги зростає ймовірність пошкоджень трансформаторів, і ця тенденція залишається актуальною протягом усього періоду їх експлуатації. Наприклад, трансформатори на 110 кВ і 220 кВ, як правило, мають більшу схильність до пошкоджень, особливо коли їх номінальна потужність збільшується. Пошкодження цих пристроїв починаються частіше через 12-17 років експлуатації. Одним із найбільш уразливих елементів є головна ізоляція, що становить близько 12–13% усіх випадків поломок. Порушення електричної міцності в головній ізоляції часто відбувається через пробій першого масляного каналу поблизу обмотки високої

напруги. Це пояснюється тим, що маслобар'єрна ізоляція має найбільшу напруженість електричного поля саме в цих каналах.

Пробій масляного каналу зазвичай є наслідком часткового розряду (ЧР) з інтенсивністю порядку  $10^{-8}$  Кл і більше, що призводить до незворотних пошкоджень твердої ізоляції, виражених у вигляді чорних гіллястих розрядів. Тому пробій масляного каналу часто розглядається як критерій порушення електричної міцності ізоляції. Основними факторами, які призводять до пошкодження головної ізоляції, є волога, забруднення та продукти старіння масла. Це дає можливість зменшити ймовірність серйозних дефектів, якщо вчасно проводити моніторинг цих параметрів.

### **1.5. Висновки до розділу 1**

У результаті проведеного аналізу було встановлено, що на технічний стан силових трансформаторів значний вплив мають як експлуатаційні, так і зовнішні фактори.

Аналіз методів діагностики показав, що для ефективного виявлення дефектів трансформаторів необхідно використовувати комплексні підходи, які включають як традиційні, так і сучасні методи моніторингу, зокрема, автоматизовані системи. Використання таких систем не лише підвищує точність діагностики, але й дозволяє зменшити людський фактор, автоматизуючи процес збору та аналізу даних. Вони здатні виконувати моніторинг в реальному часі та забезпечувати дистанційний доступ до інформації, що дозволяє операторам вчасно реагувати на потенційні проблеми. У результаті, автоматизовані системи контролю стану трансформаторів сприяють підвищенню надійності енергетичних систем і забезпечують ефективне управління технічним станом обладнання.

## **2. АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

### **2.1. Переваги застосування автоматизованих систем діагностування та моніторингу трансформаторів**

Автоматизовані системи контролю та діагностики силових трансформаторів є невід'ємною частиною сучасних енергетичних мереж, що постійно розвиваються. Силові трансформатори, як ключовий компонент електроенергетичних систем, забезпечують ефективну передачу електроенергії на різні відстані при мінімальних втратах. Проте, зважаючи на складність експлуатації, високі навантаження і суворі умови роботи, ці пристрої є вразливими до зносу і поломок. Для запобігання аваріям, мінімізації простоїв і збільшення терміну служби обладнання впровадження автоматизованих систем моніторингу стає критично важливим аспектом управління електромережами [13, 14].

Одним із найважливіших завдань автоматизованих систем є забезпечення безперервного моніторингу стану ізоляції трансформаторів. Силовий трансформатор залежить від якості ізоляції для забезпечення надійної роботи, оскільки погіршення її характеристик може призвести до короткого замикання або руйнування основних компонентів. Автоматизовані системи аналізують такі показники, як рівень вологи в ізоляційному маслі, вміст розчинених газів та різні фізико-хімічні характеристики рідин. Наприклад, метод хроматографії газів дозволяє виявляти гази, що виділяються при різних пошкодженнях внутрішніх компонентів трансформатора. Це дає можливість виявляти можливі проблеми на ранніх стадіях і вчасно реагувати.

Контроль за тепловими процесами також є невід'ємною частиною систем діагностики. Нагрівання є природним процесом під час роботи трансформатора, але перевищення допустимих температур може спричинити деградацію ізоляції, прискорення зносу компонентів і навіть аварійні ситуації.

Автоматизовані системи використовують термодатчики для безперервного вимірювання температури трансформатора в реальному часі. Крім того, передові системи можуть аналізувати температурні профілі з урахуванням навантаження, яке відчуває трансформатор, і прогнозувати можливість перегріву в майбутньому. У разі виявлення перегріву система може автоматично активувати охолоджувальні пристрої або сигналізувати про необхідність втручання персоналу.

Автоматизація процесів контролю дозволяє значно знизити витрати на експлуатацію та обслуговування обладнання. Традиційно, трансформатори проходили регулярні планові перевірки, що вимагало зупинки обладнання та викликала збої в роботі енергомереж. Використання автоматизованих систем діагностики дозволяє оптимізувати ці процеси. Тепер технічне обслуговування може здійснюватися тільки за потреби, на основі реальних даних, що забезпечує як економію ресурсів, так і підвищену ефективність роботи.

Ще однією важливою перевагою автоматизованих систем є можливість віддаленого моніторингу і діагностики. Обслуговуючий персонал може контролювати стан трансформаторів без необхідності фізичного доступу до них, що особливо важливо на великих енергетичних об'єктах або в небезпечних для людини зонах. Такі системи також можуть бути інтегровані в загальні диспетчерські системи керування електромережею, що дозволяє централізовано контролювати і керувати всією інфраструктурою.

Впровадження автоматизованих систем контролю та діагностики силових трансформаторів дозволяє значно підвищити надійність, ефективність і безпеку роботи енергетичних систем. Ці технології забезпечують довгострокову стабільність електропостачання, знижуючи ризики аварій та простоїв. У майбутньому ці системи стануть ще більш інтегрованими в загальні енергетичні мережі, що сприятиме подальшому розвитку «розумних» мереж (Smart Grid) і нових інноваційних рішень у сфері електроенергетики.

## 2.2. Аналіз існуючих автоматизованих систем діагностування та моніторингу

Автоматизовані системи діагностування та моніторингу силових трансформаторів відіграють ключову роль у сучасних енергосистемах, забезпечуючи своєчасне виявлення несправностей, запобігання аварійним ситуаціям і оптимізацію експлуатаційних витрат. Їх впровадження стало важливим елементом модернізації енергетичної інфраструктури в умовах зростаючих навантажень і вимог до надійності. Ринок таких систем представлений продукцією провідних світових компаній, серед яких General Electric (GE), ABB, Siemens, Schneider Electric, OMICRON Electronics і Qualitrol Corporation, які пропонують широкий спектр рішень для моніторингу та діагностики.

General Electric відома своїми системами на кшталт Perception Transformer Monitoring System Kelman DGA900 PLUS (рис. 2.1.), які забезпечують всебічний контроль за станом трансформатора [15]. Ці рішення включають моніторинг основних параметрів, таких як температура обмоток, рівень масла та концентрація газів, що утворюються під час старіння ізоляції (рис. 2.2). Завдяки цьому можна вчасно ідентифікувати критичні зміни в роботі обладнання.



Рис. 2.1. Загальний вигляд Kelman DGA900 PLUS

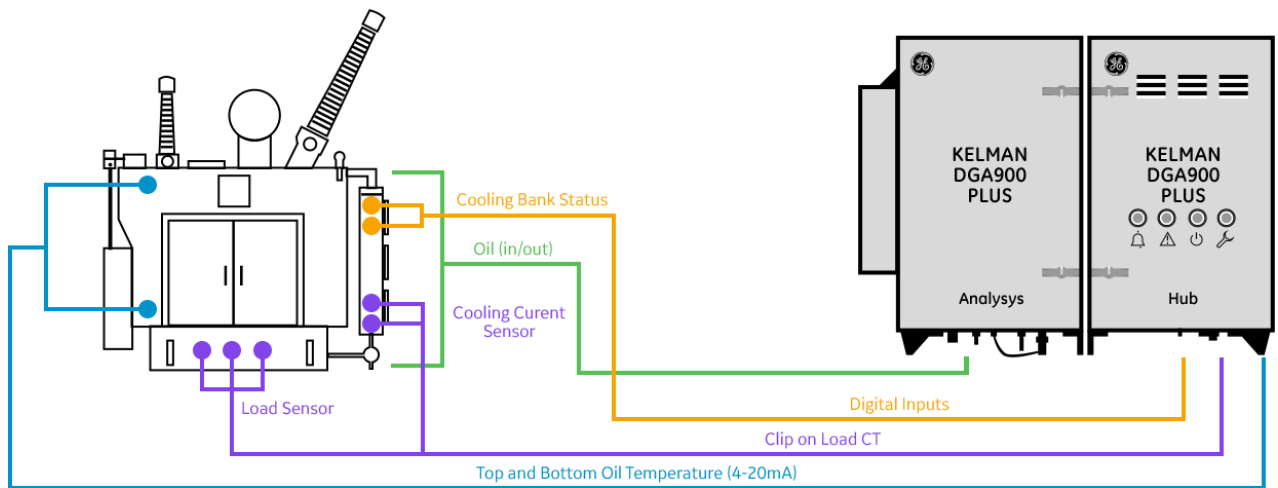


Рис. 2.2. Вимірювальні контури моніторингу параметрів силового трансформатора системи Kelman DGA900 PLUS

Перевагами є висока точність аналізу та надійність роботи системи, однак вартість таких рішень може бути значною, що є стримуючим фактором для невеликих підприємств.

ABB пропонує систему Transformer Intelligence (рис. 2.3), яка характеризується модульною структурою та можливістю налаштування під потреби конкретного замовника [16]. Це дозволяє інтегрувати нове обладнання з існуючими трансформаторами, забезпечуючи збереження інвестицій у стару техніку.

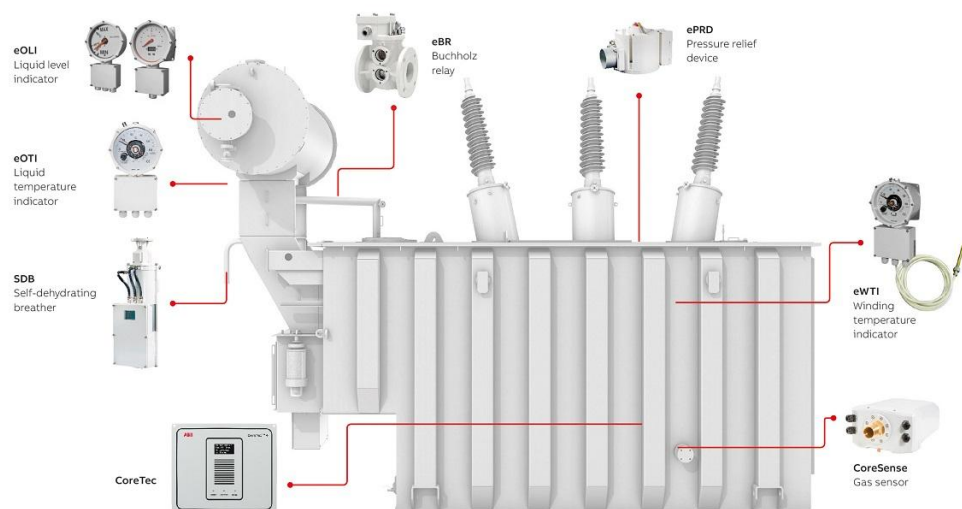


Рис. 2.3. Структура системи Transformer Intelligence ABB

Простота у використанні Transformer Intelligence АВВ, адаптивність і гнучкість є важливими перевагами, але тривалий час, необхідний для інтеграції, може створювати труднощі.

Siemens розробила рішення SIPROTEC Transformer Monitoring (рис. 2.4), яке спеціалізується на аналізі стану ізоляції, вимірюванні температури і моніторингу змін навантаження [17]. Основною перевагою є інтеграція з іншими системами захисту Siemens, що дозволяє створювати єдиний комплекс автоматизованого управління.



Рис. 2.4. SIPROTEC Transformer Monitoring

Водночас система SIPROTEC Transformer Monitoring вимагає високого рівня кваліфікації персоналу, що може збільшувати витрати на її впровадження та обслуговування.

Schneider Electric пропонує рішення EcoStruxure Transformer Expert (рис. 2.5), яке вирізняється використанням штучного інтелекту для прогнозування можливих несправностей [18]. Ці системи підтримують роботу в хмарних середовищах, забезпечуючи доступ до даних у реальному часі через зручний інтерфейс. Важливою перевагою є здатність прогнозувати несправності та зменшувати час простоїв. Однак залежність від стабільного інтернет-з'єднання може бути недоліком у регіонах з ненадійною мережею.

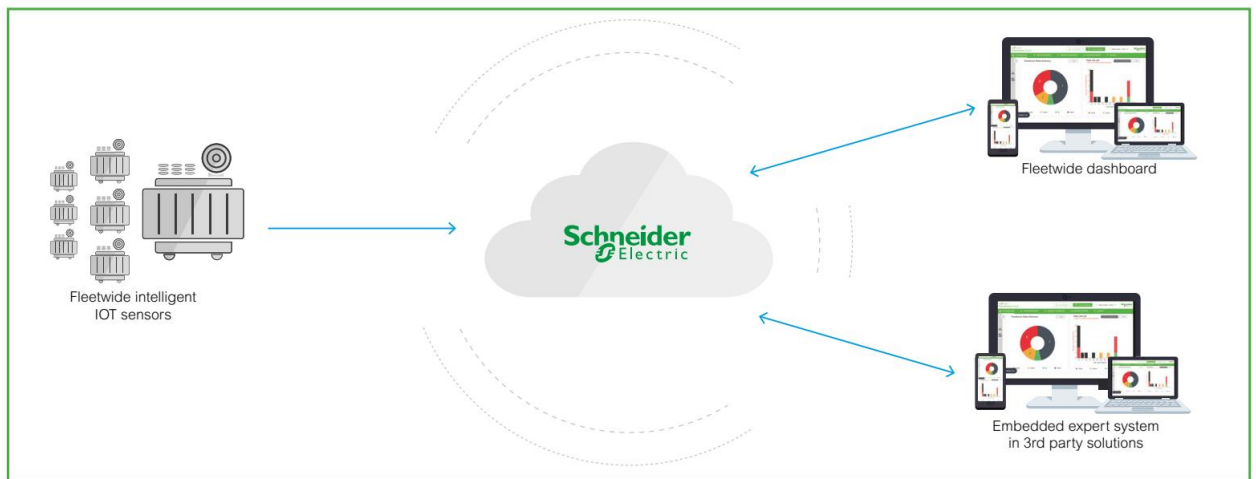


Рис. 2.5. Структура системи EcoStruxure Transformer Expert від Schneider Electric

OMICRON Electronics спеціалізується на високоточному аналізі часткових розрядів, що є критично важливим для оцінки стану ізоляції трансформаторів. Їхнє обладнання, наприклад MONCABLO (рис. 2.6.), пропонує портативність і високу точність, що особливо цінно для діагностики на місці [19].



Рис. 2.6. Система онлайн моніторингу MONCABLO

Проте функціональні можливості системи MONCABLO часто обмежуються лише аналізом окремих параметрів.

Qualitrol Corporation пропонує рішення SmartSensor Series (рис. 2.7), які відзначаються багатофункціональністю та широкими можливостями інтеграції з різними типами обладнання. Ці системи підходять як для невеликих об'єктів, так і для масштабних енергомереж, забезпечуючи надійний моніторинг ключових параметрів трансформаторів. Вони вирізняються довговічністю компонентів, але для ефективної експлуатації може знадобитися додаткове навчання обслуговуючого персоналу.



Рис. 2.7. Модуль SmartSensor Series від Qualitrol Corporation

Сучасні автоматизовані системи діагностування та моніторингу силових трансформаторів мають численні переваги, включаючи точність аналізу, здатність до прогнозування несправностей і інтеграцію з автоматизованими системами управління. Вони дозволяють значно скоротити витрати на технічне обслуговування, мінімізувати аварійність і забезпечити безперебійну роботу енергосистеми. Однак їх впровадження часто пов'язане з високими початковими витратами, потребою в кваліфікованому персоналі та залежністю від технологічної інфраструктури, зокрема доступу до інтернету. Попри це, автоматизовані системи моніторингу є невід'ємною складовою сучасної енергетики, сприяючи підвищенню її надійності та ефективності.

### 2.3. Вибір оптимального варіанту системи моніторингу

Для використання в системі моніторингу та діагностики силових трансформаторів доцільно обрати рішення EcoStruxure Transformer Expert від Schneider Electric [18]. Це вибір обґрунтовано кількома важливими перевагами, які роблять цю систему ефективним інструментом для сучасних енергетичних підприємств.

Перш за все, EcoStruxure Transformer Expert забезпечує моніторинг у реальному часі та використовує штучний інтелект для прогнозування несправностей. Це дає змогу запобігати аварійним ситуаціям, оскільки система здатна заздалегідь аналізувати динаміку змін параметрів, таких як температура обмоток, рівень масла та концентрація газів, що утворюються під час деградації ізоляції. Прогнозування дозволяє підприємствам краще планувати технічне обслуговування, мінімізуючи витрати та час простоїв обладнання.

Ще однією важливою перевагою є підтримка хмарних технологій, що дає змогу легко інтегрувати систему з існуючими цифровими платформами управління енергомережами. Дистанційний доступ до даних через інтуїтивно зрозумілий інтерфейс значно спрощує процес моніторингу, що є особливо цінним для великих або географічно розподілених підприємств.

Крім того, EcoStruxure Transformer Expert добре адаптується до роботи як з новими, так і зі старими трансформаторами, що дозволяє оптимізувати витрати на модернізацію обладнання. Система відома своєю енергоефективністю та високою надійністю, що робить її привабливим вибором навіть у регіонах зі складними умовами експлуатації.

Однак слід зазначити, що основним недоліком може бути залежність від стабільного інтернет-з'єднання для роботи з хмарними платформами. У разі недостатньої цифрової інфраструктури на підприємстві це може потребувати додаткових інвестицій. Попри це, переваги системи, такі як автоматизація

процесів, висока точність аналізу і передбачуваність несправностей, значно перевершують можливі обмеження.

Таким чином, вибір EcoStruxure Transformer Expert є обґрунтованим завдяки її гнучкості, сучасним функціональним можливостям і здатності покращити ефективність експлуатації енергетичних систем, що відповідає вимогам сучасних стандартів енергетичної галузі.

#### **2.4. Висновки до розділу 2**

Проведено детальний аналіз автоматизованих систем діагностування та моніторингу трансформаторів, що дозволило визначити їхні основні переваги, оцінити існуючі рішення на ринку та обґрунтувати вибір оптимальної системи.

Встановлено, що ринок таких систем представлений продукцією провідних світових компаній, серед яких General Electric (GE), ABB, Siemens, Schneider Electric, OMICRON Electronics і Qualitrol Corporation, які пропонують широкий спектр рішень для моніторингу та діагностики.

У результаті дослідження було визначено найбільш доцільний варіант системи моніторингу, враховуючи її технічні характеристики, економічну доцільність та відповідність сучасним вимогам. Для використання в системі моніторингу та діагностики силових трансформаторів доцільно обрати рішення EcoStruxure Transformer Expert від Schneider Electric. Це вибір обґрунтовано кількома важливими перевагами, які роблять цю систему ефективним інструментом для сучасних енергетичних підприємств.

### **3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

#### **3.1. Характеристика системи EcoStruxure Transformer Expert**

EcoStruxure Transformer Expert – це рішення для управління параметрами трансформаторів, яке забезпечує моніторинг стану трансформаторів у реальному часі. Рішення збирає дані з інтелектуальних IoT-сенсорів, аналізу газів в олії, конфігурації трансформатора, а також попереднього та прогнозованого навантаження обладнання. Використовуючи цю інформацію, інтелектуальні алгоритми виконують аналіз тенденцій, прогнозування та оцінку ризиків. Ці дані використовуються для надання аналітики та рекомендацій щодо трансформатора.

EcoStruxure Transformer Expert використовує інтегровані сенсори (температури, вологості, часткових розрядів, вібрації та водню) та інтелектуальні алгоритми, розроблені на основі стандартів IEEE і CIGRE, а також наукових досліджень, для виявлення аномалій у стані трансформатора [18].

Рішення складається з двох частин: сенсора та панелі керування.

На рис. 3.1 представлена схема функціонування EcoStruxure Transformer Expert. Система складається з чотирьох джерел даних: сенсори IoT, офлайн-аналіз газів в оливі (DGA), конфігурації трансформатора та навантаження трансформатора. Усі ці дані передаються в центральну панель керування (Dashboard), яка обробляє інформацію за чотирма ключовими напрямками: вимірювання, моніторинг, прогнозування та аналіз, а також рекомендації.

Вимірювання включають вміст води в оливі, температуру оливи зверху та знизу, тренди часткових розрядів, тренди вібрації та наявність водню. Моніторинг зосереджується на вмісті води в паперовій ізоляції, температурі гарячих точок і пробивній напрузі оливи.

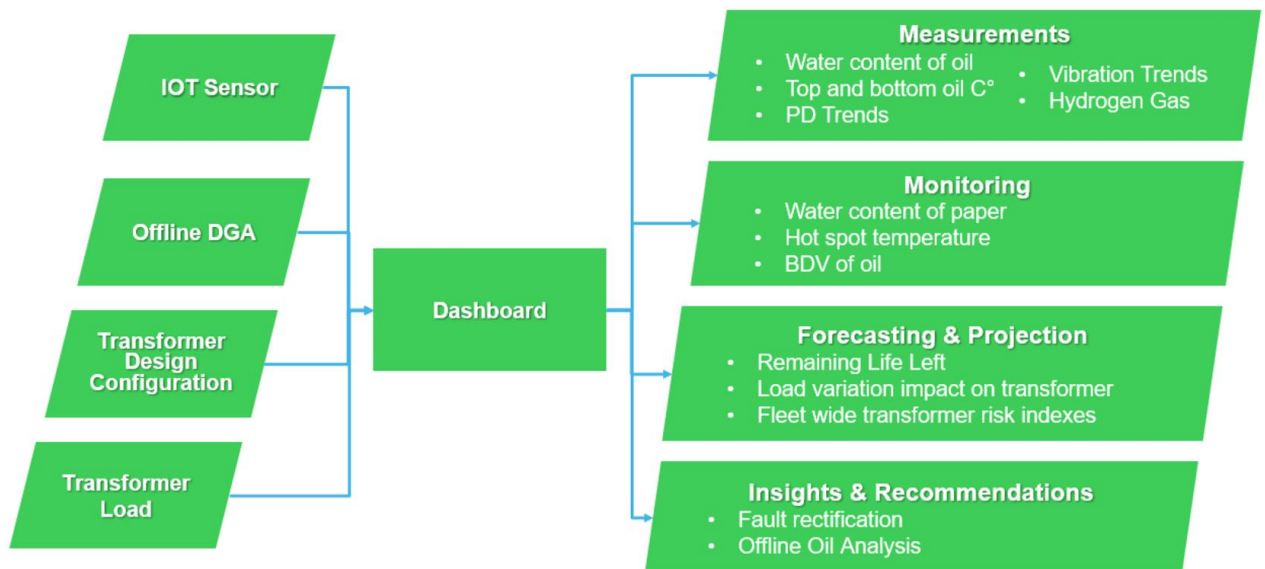


Рис. 3.1. Схема функціонування EcoStruxure Transformer Expert

Прогнозування та аналіз охоплюють оцінку залишкового ресурсу, вплив змін навантаження на трансформатор і показники ризику для всього парку трансформаторів. Рекомендації включають виправлення несправностей та офлайн-аналіз оливи.

Основним елементом на нижчому рівні системи автоматизації є сенсори (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Вимірювальний сенсор системи EcoStruxure Transformer Expert

Апаратне забезпечення EcoStruxure Transformer Expert здатне вимірювати ключові параметри трансформатора та передавати інформацію на панель керування, де вона аналізується та відображається у графічному форматі. У зонді пристрою інтегровано п'ять різних сенсорів, які вимірюють:

- активність води;
- температуру;
- часткові розряди;

- вібрацію;
- водень (опціонально).

Детальна характеристика сенсорів наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Технічні параметри сенсорів системи EcoStruxure Transformer Expert

EcoStruxure Transformer Expert Probe measurements	Water Activity (AW) (Relative Humidity)	Measurement Range: 0 – 100 % Accuracy: < 2.0 % (20 – 95 % AW) at 0 to 100 °C
	Oil Temperature Sensor	Measurement Range: -20 to 125 °C Accuracy: < ±0.5 °C at 0 to 110 °C, < ±2 °C otherwise
	Partial Discharge (PD) Activity	Correlated multi-band Ultra-high frequency (UHF), targeting PD activity inside tank
	Vibration / Acoustic	50 – 2400 Hz (Tank and connected components)
External Temperature Sensor measurements	Tank Temperature	Measurement Rang: -20 to 100 °C Accuracy: < ±0.3 °C 10 M cable supplied
Measurement period		5 minutes
Data storage		8 GB
Connectivity		3G / 4G all available networks (standard)
Probe length		315 mm 400 mm
Sensor power supply		18 – 30 V DC < 5 W 5-pin male M12 all-weather connector Fuse, MOV and reverse polarity protected
Low voltage mains din power supply option (included with standard product)		Single width DIN rail mount 24V, 15 Watt 110 – 370 V DC 85 – 264 V AC
Lightning protection		Fuse/MOV/TVS Diode
Weather rating (excluding low voltage mains din power supply)	Ambient Temperature Wise Nominal Sensor Oil Pressure Humidity Maximum Elevation Environment	-20 to 60°C 19 PSI, 1.3 bar 0 - 100 % Relative humidity (RH) non-condensing 3000 m Indoor and outdoor
Low voltage cable		10 m low voltage cable with 5-pin female M12 all-weather connector
EcoStruxure Transformer Expert Adapter		Double O-ring seal with integrated oil sample valve ¼" male BSPP/ NPT thread
Hardware warranty		Life-long replacement on failure Under subscription

Сенсори EcoStruxure Transformer Expert монтуються безпосередньо на трансформаторі в ключових точках для збору даних про його стан. Сенсор для вимірювання температури встановлюється на баку трансформатора для фіксації температури зверху та знизу олії. Сенсор для активності води інтегрується в систему охолодження або в бак олії для точного вимірювання вологості. Сенсор часткових розрядів розміщується в місцях ізоляції для моніторингу аномалій, які можуть свідчити про деградацію ізоляційних матеріалів. Сенсор вібрації монтується на корпусі трансформатора для аналізу

механічного стану та виявлення можливих дефектів у конструкції. Сенсор водню, якщо використовується, інтегрується в систему олії для моніторингу концентрації газу, що може сигналізувати про внутрішні пошкодження. Приклади місця установки сенсорів показано на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Приклади місця установки сенсорів

Схема живлення сенсора наведена на рис. 3.4.

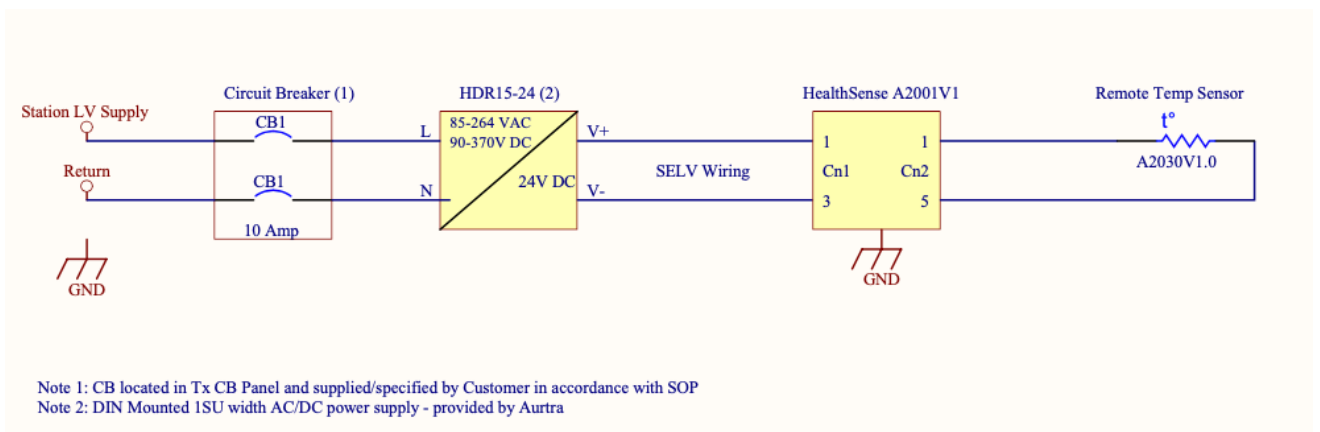


Рис. 3.4. Схема живлення сенсора

Сенсор EcoStruxure Transformer працює при напрузі 18-42 В постійного струму (DC) (рис. 3.4). Стандартно він постачається з адаптером живлення 110/240 В змінного струму (AC) до 24 В постійного струму (DC), який монтується на DIN-рейці. Для встановлення цього пристрою необхідно визначити відповідне джерело живлення. Schneider Electric надає 10 м кабелю низької напруги з попередньо встановленим 5-контактним роз'ємом M12 для підключення до реєстратора.

### 3.2. Аналіз результатів моніторингу стану трансформаторів із застосуванням системи EcoStruxure Transformer Expert

Система EcoStruxure Transformer Expert встановлена на одній із трансформаторних підстанцій ПС 110/6 кВ м. Суми для контролю та діагностики силового трансформатора серії ТРДН 25000/110, технічні характеристики якого наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Параметри трансформатора ТРДН 25000/110

Характеристики трансформатора ТРДН-25000/110		Значення	
Номінальна потужність кВА	обмотка ВН	25000	
	обмотка НН	12500	
Потужність при відключенні обдуву, кВА	ВН	17000	
	НН	8500	
Схема та група з'єднання обмоток			
Номінальна частота, Гц		50	
Вид переключення відпайок		РПН	
Спосіб охолодження		Д	
Напруга короткого замикання, %		10,68	
Втрати короткого замикання, кВт		121,81	
Втрати холостого ходу, кВт		32,7	

Дані, що збираються за допомогою сенсорів, поділяються на три основні групи: параметри часткових розрядів (ЧР), параметри введів і загальні

характеристики. Серед них можна виділити такі показники, як потужність імпульсів ЧР, вимірювана у мВт, рівень вологості у відсотках, а також температурні параметри. Температура вводів відповідає температурі трансформатора у верхній точці, додатково враховується температура в нижній частині та температура повітря. Ці дані дають змогу відстежувати динаміку змін параметрів упродовж визначеного періоду часу.

Результати замірів динаміки вологості, інтенсивності та амплітуди імпульсів часткових розрядів за період з січня по травень 2024 року наведено на рис. 3.5 та рис. 3.6.

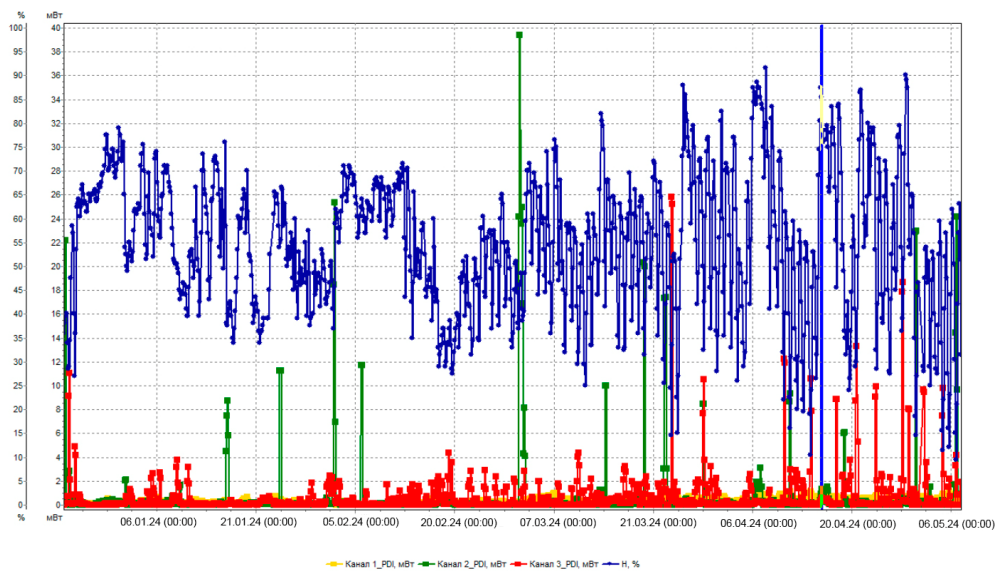


Рис. 3.5. Часові залежності вологості та інтенсивності імпульсів

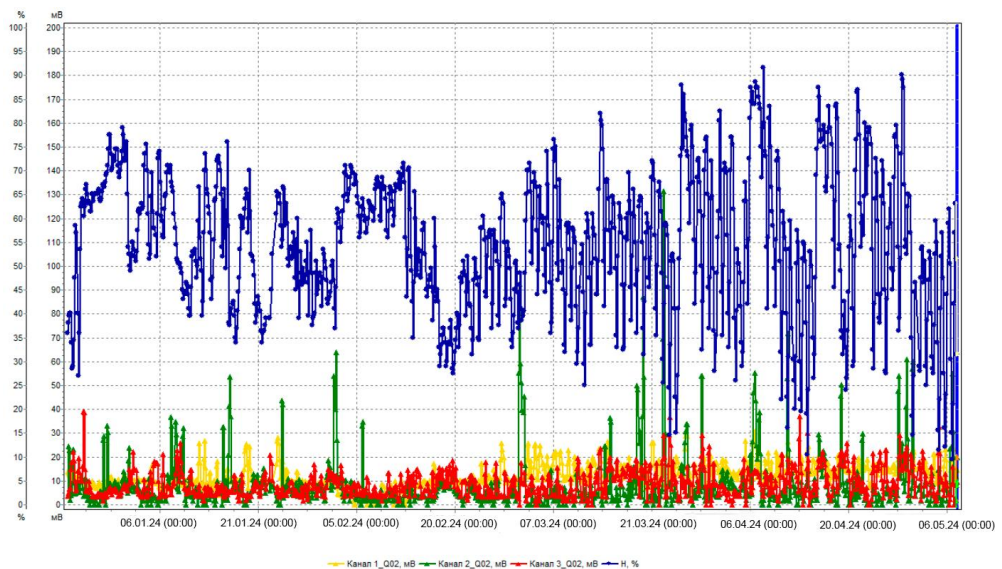


Рис. 3.6. . Часові залежності вологості та амплітуди імпульсів

На основі отриманих залежностей можна відмітити, що зі збільшенням вологості повітря інтенсивність та амплітуда імпульсів зростає.

Результати замірів динаміки температури вводу, інтенсивності та амплітуди імпульсів часткових розрядів за період з січня по травень 2024 року наведено на рис. 3.7 та рис. 3.8.

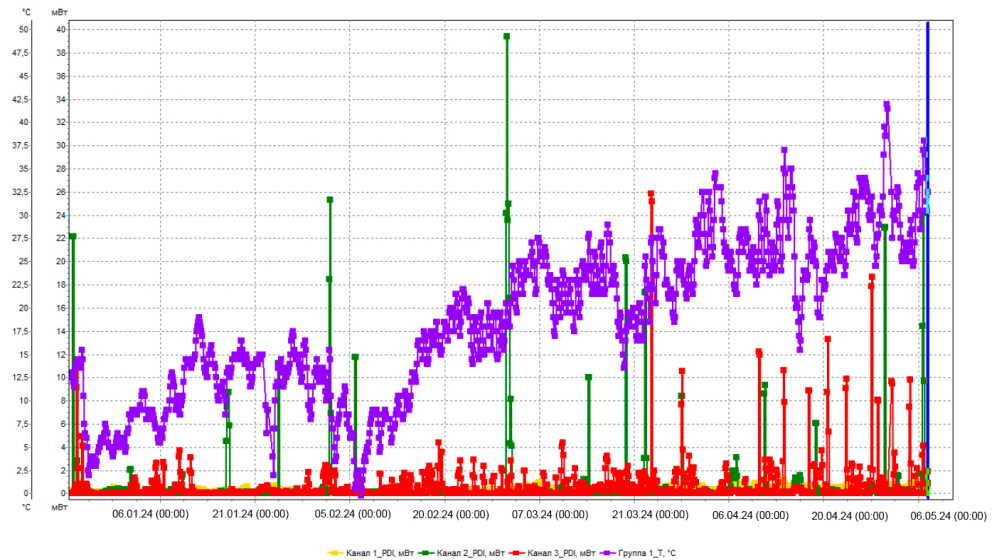


Рис. 3.7. Часові залежності інтенсивності імпульсів та температури вводу

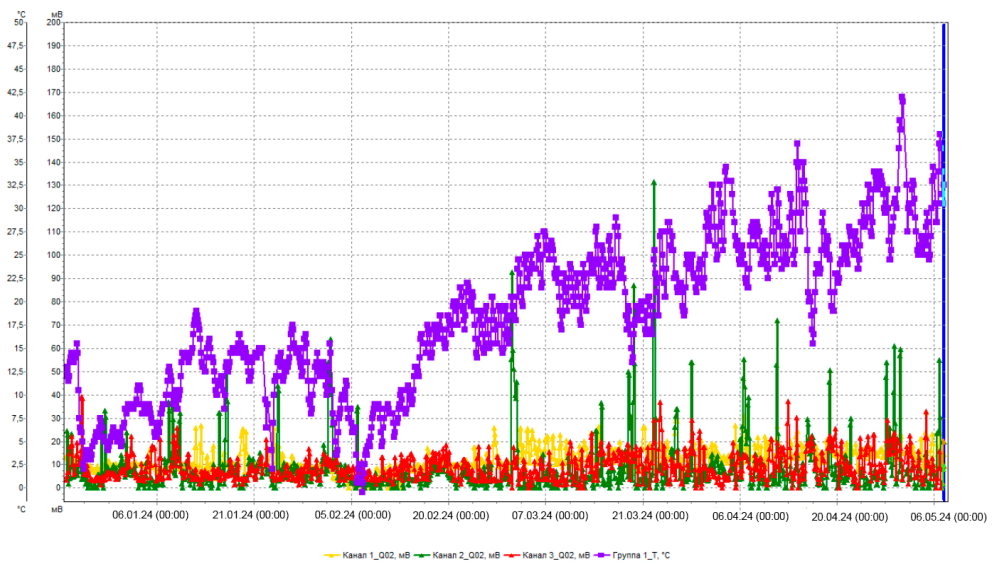


Рис. 3.8. Часові залежності амплітуди імпульсів та температури вводу

Аналіз графічних залежностей рис. 3.7 та рис. 3.8 показує, що зі зростанням температури вводів (температури оливи у верхній частині

трансформатора) спостерігається підвищення частоти імпульсів часткових розрядів у внутрішній ізоляції трансформатора. Амплітуда імпульсів також зростає. Очевидно це пояснюється підвищенням температури навколишнього середовища. Результати замірів динаміки температури навколишнього повітря, інтенсивності та амплітуди імпульсів часткових розрядів за період з січня по травень 2024 року наведено на рис. 3.9 та рис. 3.10.

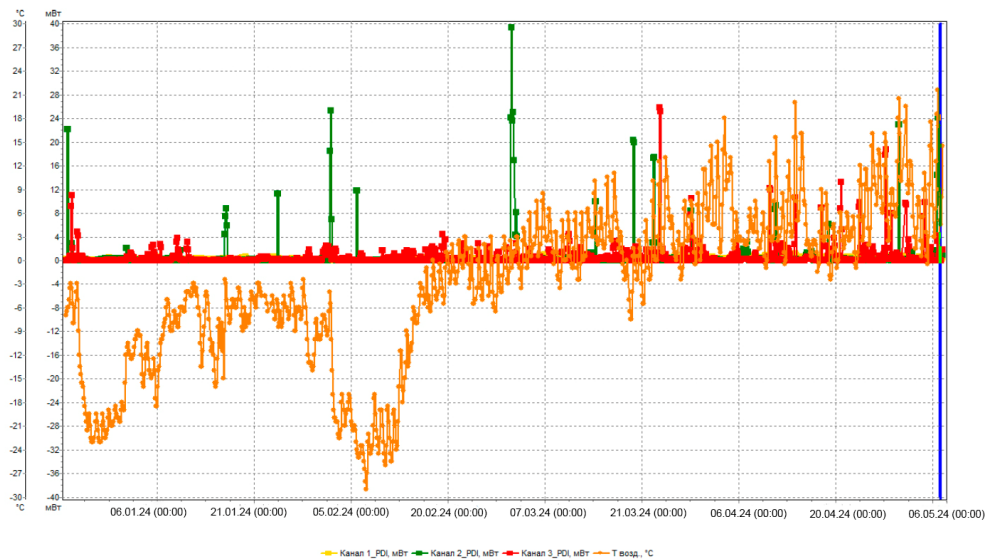


Рис. 3.9. Часові залежності інтенсивності імпульсів та температури навколишнього середовища

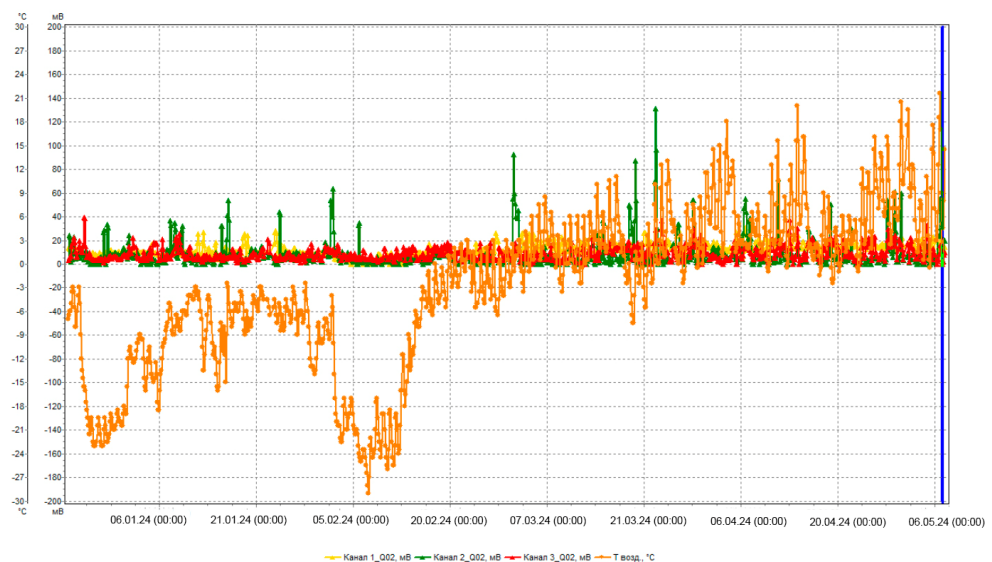


Рис. 3.10. Часові залежності амплітуди імпульсів та температура навколишнього середовища

### 3.3. Аналіз можливого ефекту від впровадження систем контролю

Використання автоматизованих систем моніторингу та діагностики для силових трансформаторів приносить численні переваги, серед яких:

- зниження кількості аварійних ситуацій, що дозволяє скоротити витрати на ремонт;
- уникнення позапланових відключень електроенергії завдяки можливості контролю стану обладнання без його зупинки;
- своєчасне планування ремонтних робіт, що мінімізує ризик аварій, зменшує витрати на відновлення та скорочує час простою техніки.

Швидке виявлення дефектів дає змогу оперативно їх усунути. Деякі несправності, такі як пошкодження вводів, несправності насосів чи радіаторів, розгерметизація, витоки оливи або засмічення охолоджувальних трубок, можна усунути без демонтажу обладнання. Проте серйозні проблеми, як-от перегрів сталі, дефекти зварювання чи порушення пресування, вимагають транспортування трансформатора на завод для капітального ремонту.

У випадках, коли пошкодження ізоляції обмоток вчасно не виявлене і призводить до дугових розрядів, витрати на ремонт можуть зрости більше ніж удвічі. Тому своєчасна діагностика є критично важливою для оцінки стану трансформатора та організації ремонтів у такі строки, які мінімізують втрати від простоїв.

Особливо корисною є багатопараметрична діагностика для трансформаторів, які експлуатуються понад 12–17 років. У цей період ризик виникнення несправностей значно зростає, і важливо використовувати системи, здатні виявляти дефекти на ранніх стадіях.

Автоматизовані системи базуються на використанні передових вимірювальних технологій та обчислювальних алгоритмів. Вони аналізують параметри, шукають кореляції між різними показниками, застосовують регресійний аналіз та інші математичні методи для оцінки стану обладнання.

Складні вимірювальні прилади, такі як системи акустичного та радіочастотного моніторингу часткових розрядів і дугових розрядів у трансформаторному баку, а також системи контролю концентрації розчинених газів в оливі, дозволяють суттєво зменшити ризик аварійного виходу з ладу.

Практика закордонних компаній, зокрема в США, демонструє високу економічну ефективність таких систем. Енергетичні підприємства заощаджують у 3–6 разів більше коштів, ніж витрачають на впровадження та експлуатацію автоматизованих систем контролю, включаючи періодичну перевірку відключеного обладнання.

### **3.4. Висновки до розділу 3.**

У розділі досліджено ефективність використання сучасних систем контролю та діагностики стану силових трансформаторів на прикладі системи EcoStruxure Transformer Expert. Проведений аналіз функціональних можливостей цієї системи підтвердив її здатність забезпечувати високий рівень надійності та точності моніторингу, що дозволяє своєчасно виявляти потенційні дефекти та запобігати аварійним ситуаціям.

Результати моніторингу, отримані за допомогою EcoStruxure Transformer Expert, продемонстрували значну інформативність даних щодо поточного стану обладнання, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень стосовно експлуатації та технічного обслуговування трансформаторів. Застосування таких систем дозволяє знижувати витрати на позапланові ремонти, мінімізувати ризик відмов обладнання та забезпечувати стабільність енергопостачання.

Це сприяє не лише покращенню точності оцінки технічного стану трансформаторів, але й підвищує швидкість та ефективність роботи обслуговуючого персоналу. Результати аналізу дозволяють підвищити загальну надійність електрообладнання, а також коригувати графіки планових ремонтів відповідно до фактичного стану техніки.

#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

**Організація охорони праці при роботі з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів.** Організація охорони праці під час роботи з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів є ключовим аспектом забезпечення безпеки персоналу та ефективності роботи. Відповідальність за охорону праці під час виконання ремонтних та обслуговувальних робіт на підстанції покладається на керівників підприємства, начальників відповідних підрозділів і безпосередніх виконавців робіт. Зокрема, керівники відповідають за розробку інструкцій з охорони праці, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) та контролюють дотримання правил безпеки на робочих місцях [20, 21].

Працівники, що залучені до ремонту та обслуговування обладнання, повинні проходити обов'язкові інструктажі з охорони праці: вступний, первинний на робочому місці, повторний, позаплановий і цільовий. Вступний інструктаж проводиться для ознайомлення з основними положеннями законодавства про охорону праці, правилами поведінки у разі аварійної ситуації, а також специфікою роботи на підприємстві. Первинний інструктаж проводять безпосередньо на робочому місці перед початком виконання робіт, щоб пояснити конкретні правила безпеки під час роботи з обладнанням. Повторні інструктажі необхідні для оновлення знань і проводяться, як правило, раз на пів року. Додатково працівники повинні проходити навчання з охорони праці, періодичну перевірку знань і професійне навчання, якщо це передбачено посадовими обов'язками. Особливу увагу приділяють навчанням з надання першої медичної допомоги постраждалим, роботі у вибухо- та пожежонебезпечних зонах, а також роботі з електрообладнанням під напругою. Суворо регламентується використання засобів індивідуального захисту, таких як діелектричні рукавички, взуття, каски, спеціальний одяг та захисні окуляри. Перед початком робіт обов'язково перевіряється технічний

стан інструментів та обладнання, а також наявність захисних пристроїв. Дотримання всіх вимог є обов'язковим, оскільки навіть найменше порушення правил охорони праці може призвести до серйозних наслідків [20].

**Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів.** При роботі з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів виникає ряд шкідливих та небезпечних факторів, які можуть впливати на безпеку працівників та ефективність роботи обладнання. Одним із основних небезпечних факторів є електричний струм. Під час виконання обслуговування та ремонту трансформаторів на підстанціях є ризик ураження електричним струмом, особливо під час роботи з обладнанням, яке перебуває під напругою. Порушення правил безпеки, недотримання вимог із заземлення або відсутність відповідних засобів індивідуального захисту можуть призвести до серйозних травм або навіть летальних випадків.

Ще однією небезпекою є вплив високої температури. При роботі з трансформаторами відбувається виділення тепла, що може призвести до перегріву обладнання та виникнення пожежі. Надмірне нагрівання елементів системи може спричинити їх пошкодження, що в свою чергу впливає на загальний стан трансформатора та безпеку роботи персоналу. Також існує ризик виникнення вибухонебезпечної ситуації через витік горючих газів або рідин, що використовуються в системах охолодження трансформаторів.

Шум також є суттєвим шкідливим фактором. Високий рівень шуму від працюючого обладнання може мати негативний вплив на здоров'я працівників, викликаючи стомлення, втрату слуху, головний біль та інші порушення, пов'язані з нервовою системою. Шум у поєднанні з іншими факторами, такими як вібрація або високі навантаження на організм, може погіршувати загальний стан працівників, знижуючи їх працездатність і здатність до швидкої реакції в разі надзвичайної ситуації.

Вібрація також становить небезпеку для здоров'я працівників. Під час роботи з трансформаторами можуть виникати вібраційні навантаження, які впливають на суглоби, кістки та м'язи, що з часом може призвести до розвитку професійних захворювань, таких як вібраційна хвороба.

Не менш важливими є психологічні фактори. Робота з автоматизованими системами контролю вимагає високої концентрації та уваги до деталей, що може призводити до перевантаження нервової системи, стресу та втоми. Психоемоційний стрес може стати причиною нещасних випадків, оскільки працівник може не вчасно помітити критичну ситуацію або не зреагувати належним чином на зміни в роботі обладнання. Відсутність належної вентиляції в приміщеннях, де працюють трансформатори, також може становити загрозу для здоров'я працівників. Низька якість повітря або надмірна вологість можуть сприяти розвитку респіраторних захворювань, а також погіршувати загальний стан людини.

**Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів.** Впровадження безпечних умов праці при роботі з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів вимагає комплексного підходу, що включає як технічні, так і організаційні заходи. Одним із основних напрямків є забезпечення належного рівня електробезпеки. Для цього необхідно регулярно проводити технічне обслуговування та перевірку заземлення, а також впровадити систему автоматичного вимкнення обладнання в разі порушень параметрів, що можуть призвести до ураження електричним струмом. Ще однією важливою складовою є забезпечення нормальних температурних умов. Всі трансформатори та інші елементи системи повинні бути обладнані ефективними системами охолодження, які дозволяють підтримувати оптимальну температуру. Це допоможе запобігти перегріву трансформаторів і виникненню пожежонебезпечних ситуацій. Також важливо організувати

регулярні перевірки стану охолоджувальних систем і застосовувати сучасні методи моніторингу температурних показників.

Задля зменшення впливу шкідливих факторів, таких як шум та вібрація, необхідно використовувати спеціалізоване обладнання, що дозволяє знижувати рівень вібрації в обладнанні та застосовувати шумопоглинаючі матеріали у приміщеннях, де працюють трансформатори. Всі працівники повинні бути оснащені відповідними засобами захисту від шуму, наприклад, навушниками чи берушами. Це допоможе зберегти слух і знизить рівень стресу та втоми. Важливим аспектом є також психофізіологічна підготовка працівників. Оскільки робота з автоматизованими системами контролю та діагностики вимагає постійної концентрації, необхідно створити комфортні умови праці, що включають адекватне освітлення, вентиляцію та організацію робочих місць з урахуванням ергономічних вимог.

Особливу увагу слід приділити навчанням і підвищенню кваліфікації працівників. Персонал повинен проходити регулярні тренування з охорони праці, а також бути обізнаним щодо можливих небезпек, зокрема щодо роботи з електричним обладнанням, першої медичної допомоги, а також правильних дій у разі виникнення аварійних ситуацій. Після кожного випадку нещасного випадку чи інциденту необхідно проводити розслідування та впроваджувати коригувальні заходи для запобігання подібним ситуаціям у майбутньому.

**Висновки.** Впровадження безпечних умов праці при роботі з автоматизованими системами контролю та діагностики стану силових трансформаторів є ключовим для запобігання нещасним випадкам та забезпечення ефективної роботи обладнання. Це вимагає комплексного підходу, включаючи регулярне технічне обслуговування, використання засобів індивідуального захисту, зменшення шкідливих факторів, підвищення кваліфікації персоналу та постійний моніторинг умов праці. Тільки за умови дотримання всіх заходів безпеки можна гарантувати надійну та безпечну експлуатацію обладнання.

## 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Використання автоматизованих систем контролю та діагностики стану силових трансформаторів є важливим напрямом підвищення ефективності енергетичних систем. Економічна доцільність впровадження таких систем визначається їх здатністю зменшувати експлуатаційні витрати, мінімізувати аварійні простої та оптимізувати процеси технічного обслуговування. Силові трансформатори є одним із найважливіших елементів енергосистем, і їхній вихід з ладу може призвести до значних фінансових втрат, зупинки підприємств і навіть порушення енергопостачання цілих регіонів [22].

Одним із головних економічних ефектів автоматизованих систем є зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт. Традиційний підхід до обслуговування передбачає регулярні профілактичні роботи, які, хоча і знижують ймовірність несправностей, часто є надмірними і не завжди ефективними. Перехід до стратегії обслуговування за станом, що забезпечується автоматизованими системами, дозволяє виконувати ремонт лише за потреби. За оцінками досліджень, це може скоротити обсяг профілактичних робіт до 20–25% [23]. Наприклад, якщо раніше обслуговування трансформатора передбачало щорічні перевірки всіх компонентів, то система моніторингу дозволяє виявляти лише ті вузли, які дійсно потребують уваги.

Ще однією важливою перевагою є запобігання аварійним ситуаціям. Аварійний ремонт трансформатора, як правило, вимагає значно більших витрат, ніж планове технічне обслуговування. Наприклад, своєчасне виявлення перегріву обмоток або зниження рівня масла дозволяє уникнути серйозних пошкоджень, економлячи до 30–40% витрат на ремонт [23, 24]. Це також знижує фінансові ризики, пов'язані з компенсаціями за недопоставлену електроенергію споживачам.

Крім того, автоматизовані системи сприяють зменшенню втрат електроенергії внаслідок постійного контролю за такими параметрами, як

струм, напруга, температура, стан ізоляції тощо. Наприклад, зменшення втрат активної потужності в трансформаторі на 5–10% може забезпечити значну економію енергоресурсів у масштабах енергетичної компанії [25]. Це особливо актуально для старих трансформаторів, де контроль параметрів дозволяє уникати перевантаження і пов'язаних із цим енергетичних втрат.

Досвід впровадження таких систем в Україні також демонструє їхню ефективність. Наприклад, на підстанціях однієї з енергетичних компаній після встановлення системи моніторингу онлайн було зафіксовано зменшення кількості позапланових ремонтів на 35%, а витрати на технічне обслуговування скоротилися на 22% [5, 6]. Крім того, завдяки підвищенню надійності роботи обладнання, вдалося уникнути штрафних санкцій за порушення графіка постачання електроенергії.

Автоматизовані системи також дозволяють подовжити термін експлуатації силових трансформаторів. Постійний контроль параметрів, таких як вологість ізоляції або наявність розчинених газів у маслі, дозволяє запобігти критичним пошкодженням, що значно знижує вартість заміни обладнання. Згідно з оцінками, подовження терміну служби трансформаторів на 5–10 років може забезпечити економію капітальних витрат на рівні 15–20% [22].

**Висновок.** Таким чином, автоматизовані системи контролю та діагностики стану силових трансформаторів є не лише технічною необхідністю, але й економічно вигідним рішенням. Вони дозволяють значно знизити витрати на обслуговування, підвищити надійність електропостачання, мінімізувати втрати електроенергії та збільшити тривалість експлуатації обладнання.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Дипломна робота присвячена дослідженню системи контролю та діагностування стану силових трансформаторів, які є ключовими елементами електроенергетичної інфраструктури. У роботі розглянуто вплив експлуатаційних і зовнішніх факторів на технічний стан трансформаторів, що дозволило детально проаналізувати причини пошкоджень, їх характер і специфіку впливу на надійність обладнання. Проаналізовано сучасні методи діагностування, які охоплюють різні аспекти контролю, включаючи використання вимірювальних приладів для моніторингу параметрів та оцінку стану внутрішньої ізоляції.

Вагома увага приділена дослідженню автоматизованих систем діагностування та моніторингу, які забезпечують своєчасне виявлення несправностей і мінімізують ризик аварій. Проведено порівняльний аналіз існуючих систем, їх технічних можливостей і ефективності. Зокрема, проаналізовано систему EcoStruxure Transformer Expert, яка дозволяє здійснювати комплексний моніторинг технічного стану трансформаторів. Результати використання цієї системи продемонстрували значне підвищення точності діагностування, оперативності прийняття рішень та економічної ефективності завдяки зниженню витрат на ремонт і обслуговування.

У результаті проведених досліджень було розроблено рекомендації щодо використання сучасних систем діагностування та контролю, які сприятимуть підвищенню надійності, ефективності та довговічності силових трансформаторів. Отримані результати мають значну практичну цінність і можуть бути використані в подальших розробках інноваційних рішень для моніторингу стану енергетичного обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сіренко, В. Ф., Лисенко В. В., Майборода В. Г. Автоматизовані системи контролю та діагностики силових трансформаторів. *Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції, Ч.2.* (с. 69-70). 21-23 жовтня, 2024. Суми, Україна: СНАУ.
2. Сіренко, В. Ф., Лисенко В. В., Майборода В. Г. Аналіз методів діагностування та моніторингу стану силових трансформаторів. *Інноваційні технології в Індустрії 5.0: Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції, Ч.2.* (с. 85-87). 21-23 жовтня, 2024. Суми, Україна: СНАУ.
3. Brown, R. P., & Smith, A. L. (2019). *Power transformers: Design and applications.* Wiley.
4. Яцун М. А. (2013). *Експлуатація та діагностування електричних машин і трансформаторів: навч. посіб.* Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 180.
4. Грищенко, І. (2020). Автоматизація систем діагностики силових трансформаторів. *Технічна електродинаміка*, (3), 25–28.
5. Іванченко, О. (2019). Сучасні методи контролю електротехнічного обладнання. *Вісник енергетики*, (4), 31–34.
6. Коваленко, П. (2021). Оптимізація витрат на обслуговування електрообладнання. *Науково-технічний журнал*, 5(12), 44–47.
7. Петренко, В. (2022). Досвід впровадження систем моніторингу в Україні. *Енергетична стратегія*, (6), 50–52.
8. Chauhan, A. S., & Jain, S. K. (2020). Application of artificial intelligence in condition monitoring of power transformers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(2), 957–965. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2913198>

9. Kumar, R., & Kaur, S. (2018). A review on diagnostic techniques for monitoring power transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 98, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.010>
10. Smith, J., & Johnson, M. (2021). Monitoring and diagnostics of power transformer insulation. *Electrical Engineering*, 103(2), 395–404. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01059-w>
11. Zhang, Y., & Zhou, L. (2017). Condition monitoring of transformers using partial discharge signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), 20–26. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005529>
12. Bhattacharya, S., & Gupta, M. (2020). Smart transformers: Recent trends and future challenges. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3567–3574. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2947269>
13. Yang, J., & Wei, Y. (2018). Advanced monitoring systems for power transformer diagnostics. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 13(5), 1715–1723. <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.5.1715>
14. Gupta, R., & Sharma, P. (2019). Condition-based monitoring of power transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.09.015>
15. Perception Transformer Monitoring System Kelman DGA900 PLUS. (2024). Available at: <http://surl.li/zhigbm>.
16. The ABB Ability™ Power Transformer sets new industry standards. (2019). Available at: <http://surl.li/uaukuy>.
17. SIPROTEC 4 7UT6 Differential Protection Relay for Transformers, Generators, Motors and Busbars. Available at: <http://surl.li/qnltza>.
18. Schneider Electric. (2021). EcoStruxure Transformer Expert: Optimizing transformer reliability and performance. Available at: <http://surl.li/snufuc>.
19. Permanent on-line partial discharge (PD) monitoring system for power cables MONCABLO. Available at: <http://surl.li/gbwjme>.
20. Закон України "Про охорону праці" від 14 жовтня 1992 р. (Редакція станом на 20.01.2018).

21. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНПАОП 0.00–1-1.21-98. К.: АТ «Київська книжкова фабрика».
22. Журило, І. В., & Полтавець, М. М. (2017). Економіка та організація виробництва: Методичні вказівки до вивчення курсу для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Кропивницький: ЦНТУ.
23. Tian-Qing, S., Xiao-Hua, W., & Ma, X. (2009). Relationship between the economic cost and the reliability of the electric power supply system in city: A case in Shanghai of China. *Applied Energy*, 86(10), 2262–2267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.008>.
24. Yang, W., Liu, S., & Gao, D. (2020). Predictive maintenance strategies for reducing downtime and cost in electrical networks. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15(3), 1012–1020. <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00311-9>.
25. Zhang, Y., Wang, Q., & Liu, X. (2021). Implementation of IoT-based diagnostics for transformers in power grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111053>.

## **ДОДАТКИ**