

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

для виконання лабораторних та практичних робіт  
з дисциплін:

«Моніторинг технічного стану електрообладнання енергоємних  
виробництв»

для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
усіх форм навчання

Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з дисциплін «Моніторинг технічного стану електрообладнання енергоємних виробництв» для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка усіх форм навчання / Укл.: доц., к.т.н. О.А. Сахно, ст. викл. Л.С. Скрупська – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 52 с.

Укладачі:

О.А. Сахно, доц., к.т.н.  
Л.С. Скрупська, ст. викладач

Рецензент:

П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.

Відповідальний  
за випуск:

П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.

Затверджено  
на засіданні кафедри  
«Електричні та електронні апарати»  
Протокол № 12  
від 09 червня 2025 р.

Затверджено НМК ЕТФ  
Протокол № 10  
від 22 травня 2025 р.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	3
МЕТА ТА ЗАДАЧА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ .....	4
Лабораторна робота № 1.	
Контроль температурних параметрів та діагностування стану обладнання за температурними характеристиками .....	7
Лабораторна робота № 2.	
Контроль характеристик часткових розрядів в ізоляції, та діагностування стану.....	10
Лабораторна робота №3.	
Діагностування обладнання за Результатами проб масла.....	15
Лабораторна (практична) робота №4.	
Побудова сучасної системи діагностування енергооб'єктів на базі автоматизованого безперервного контролю за технічним станом електричних апаратів (екскурсія на виробництво виробництва) .....	22
Лабораторна робота №5.	
Діагностування апаратів з конденсаторною ізоляцією .....	25
Лабораторна (практична) робота №6.	
Прогнозування зносу ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатору .....	35
Перелік екзаменаційних (залікових) питань .....	47
Перелік питань для самостійного вивчення .....	49
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## МЕТА ТА ЗАДАЧА ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Технічний стан, фактичне напрацювання парку високовольтного устаткування та сучасні тенденції до модернізації та інтелектуалізації електроенергетики ставлять ряд нових завдань для експлуатаційної діагностики: зниження експлуатаційних витрат з підвищенням технічної стійкості енергосистеми; оцінка поточного стану та прогноз залишкового ресурсу устаткування, для планування розподілу фінансових активів, в умовах старіння парку устаткування в Україні та по всьому світу; автоматизація діагностування для створення підстанцій (ПС) без постійного обслуговуючого персоналу та створення інтелектуальних електроенергетичних систем в Україні.

У рамках курсу студенти зможуть отримати сучасні та актуальні знання в галузі діагностування та оцінки технічного стану обладнання, дізнатись про сучасні засоби діагностування, набути практичних навичок, здобути знання з основ оцінки та прогнозування ресурсу обладнання, що є дуже актуальним в умовах необхідності скорочення витрат на експлуатацію електричних та електронних апаратів.

Курс відповідає завданням діючій державній науково-технічній програмі «Ресурс», яка вимагає створення системи підготовки, підвищення кваліфікації та атестації фахівців з питань забезпечення надійності і безпечної експлуатації споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж, оцінки та діагностики технічного стану об'єктів.

Мета курсу - набуття компетентностей щодо знань, навичок та вмінь, які дозволять використовувати здобуті знання з конструкції електричних та електронних апаратів для діагностування їх технічного стану, оволодіння спеціальними знаннями теорії та практики діагностування високовольтного обладнання електричних станцій та підстанцій, а також методиками щодо оцінки їх залишкового ресурсу.

Завдання – полягають у вивченні елементної бази засобів діагностування, типових дефектів та відказів обладнання, підвищення рівня знань з експлуатації, та процесів деградування та руйнування високовольтного електромеханічного обладнання, розширення знань з сучасних методик та методів діагностування високовольтної техніки.

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувачі вищої освіти набувають загальних компетенцій, фахових та наступних програмних результатів навчання.

Загальні компетентності :

- здатність до абстрактного мислення, критичного аналізу, оцінки та синтезу нових та складних ідей;
- здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми і задачі;
- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- здатність використовувати державну та іноземні мови для здійснення науково-технічної та/або професійної діяльності;
- здатність приймати обґрунтовані рішення;
- здатність працювати самостійно та у команді;
- здатність продукувати нові ідеї, проявляти креативність, здатність до системного мислення;
- здатність виявляти зворотні зв'язки та корегувати свої дії з їх врахуванням.

Фахові компетентності:

- здатність застосовувати отримані теоретичні знання, наукові і технічні методи та відповідне програмне забезпечення при вирішенні науково-технічних, проектно-конструкторських та технологічних проблем, що виникають в процесі розробки, виробництва та експлуатації об'єктів електроенергетики, електротехніки та електромеханіки;
- здатність застосовувати існуючі та розробляти нові методи, методики, технології та процедури для вирішення інженерно-технічних задач в процесі розробки, виробництва та експлуатації об'єктів електроенергетики, електротехніки та електромеханіки;
- знання і розуміння закономірностей, механізмів та наслідків відмов об'єктів електроенергетики, електротехніки та електромеханіки в процесі експлуатації;
- здатність оцінювати технічний стан та ефективність функціонування об'єктів електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, а також розробляти та впроваджувати заходи з їх покращення;
- здатність використовувати сучасне програмне забезпечення для проектування оптимальних конструкцій електричних та електронних апаратів, а також сучасних технологій їх виробництва, випробування та прогнозування ресурсних показників;

- здатність демонструвати знання і розуміння математичних принципів і методів, необхідних для проведення наукових досліджень, випробувань та діагностування електричних та електронних апаратів в процесі розробки, виробництва та експлуатації;

- володіти технологічними методами досліджень, випробувань та діагностування електричних та електронних апаратів, а також здатність застосовувати відповідні технічні засоби та обладнання;

- здатність науково обґрунтовувати вибір методів технічної діагностики, а також вузлів та параметрів для проектування технічних засобів та систем діагностування електричних та електронних апаратів.

Програмні результати навчання:

- вільно (усно та письмово) спілкуватись державною та іноземною мовами з сучасних науково-технічних проблем електроенергетики, електротехніки та електромеханіки;

- володіти методами системного аналізу, а також математичного та фізичного моделювання об'єктів та процесів в електричних та електронних апаратах з використанням сучасного технічного та програмного забезпечення;

- знаходити варіанти підвищення енергоефективності та надійності електроенергетичного, електротехнічного та електромеханічного обладнання й відповідних електричних та електронних апаратів;

- брати участь у міжнародних наукових конференціях та семінарах, присвячених сучасним проблемам в області електроенергетики, електротехніки та електромеханіки співпрацюючи з іноземними науковцями та фахівцями;

- ставити і вирішувати інноваційні наукові та інженерно-технічні завдання з використанням методів системного аналізу і моделювання об'єктів електроенергетики, електротехніки та електромеханіки та відповідних процесів;

- виявляти та аналізувати похибки вимірювань, причини їх виникнення, а також знати та вміти використовувати методи їх зменшення застосовуючи інструментарії кореляційного та регресійного аналізу, методів інтерполяції, згладжування та апроксимації;

- знати та вміти критично оцінювати методи, структуру та технічні засоби експериментальних та випробувальних установок, а також систем діагностування електричних та електронних апаратів;
- розробляти технічні засоби, програми та методики випробувань та діагностування електричних та електронних апаратів, а також складати відповідні протоколи за їх результатами;
- планувати та здійснювати експериментальні дослідження, випробування та діагностування електричних та електронних апаратів, оцінювати їх результати та приймати відповідні рішення щодо їх якості.

Вивченню цієї дисципліни мають передувати дисципліни, що вивчаються на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти, та на другому (магістерському) рівні вищої освіти, а саме: українська мова (за професійним спрямуванням), іноземна мова професійного спрямування; теоретичні основи електротехніки, апарати високої напруги, теоретичні основи електричних апаратів, обчислювальна техніка та програмування (програмне забезпечення за фахом), теорія надійності та ефективності електромеханічних пристроїв та систем.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

### **КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Мета роботи: здобуття практичних навичок з використання методів контролю температури електрообладнання.

#### **1.1 Загальні відомості**

Температура це один з найбільш важливих показників стану електричних та електронних апаратів. Величезна кількість дефектів зв'язана з зростанням температури. Контроль температури необхідно проводити для розрахунку інших діагностичних параметрів, вологовмісту або тангенсу кута діелектричних втрат, наприклад. Під впливом температури і ряду інших чинників фізико-хімічні властивості твердої ізоляції з плином часу зазнають змін, при цьому ізоляція стає крихкою. Швидкість старіння ізоляції залежить від

температури, а досягнутий ступінь старіння - від температури і часу її впливу. Для розрахунку здатності навантаження потрібно розрахувати температуру в найбільш нагрітих місцях обмотки, визначити залежність швидкості старіння ізоляції від температури і температуру, при впливі якої трансформатор працюватиме заданий, економічно виправданий термін.

На даному етапі для визначення температури електрообладнання застосовуються:

- термопари;
- терморезистори;
- пірометри;
- тепловізори;
- контактні оптичні датчики.

## 1.2. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка включає в себе бак заповнений водою, що імітує бак апарата, заповнений маслом, з нагрівальним елементом, що імітує обмотку або струмопровід та металевий відвід, що імітує електричний ввід.

У якості вимірювальних приладів в роботі використовуються:

- пірометр;
- тепловізор (опціонально);
- терморезистор з характеристикою Pt100;
- термопара хромель-капель.

## 1.3 Завдання

1. Ознайомитися з інструкціями по експлуатації вимірювальними приладами.

2. Провести досліди та записати отримані дані:

а) виміряти температуру по висоті моделі об'єкта в 8 точках за допомогою наявних засобів вимірювання.

б) виміряти температуру на поверхні води за допомогою наявних засобів вимірювання.

3. Розрахувати температуру обмотки моделі за спрощеною формулою:

$$T_o = T_{всм} + Hgr \cdot K_n^y,$$

де  $T_{\text{всм}}$  – температура верхніх слоїв масла (виміряна за дослідом №2),

$H_{gr}$  – проектне перевищення температури обмотки над температурою масла;

$K_n$  – коефіцієнт навантаження;

$u$  – показник обмотки (приймається для трансформатору з системою охолодження «М» - 1,30).

Таблиця 1.1. – Вихідні данні

Варіант	$H_{gr}$	Номінальний струм
1	30	10
2	35	7
3	40	5
4	45	3

4. Побудувати графічні залежності розподілу температури по висоті моделі для досвіду.

5. Зробити висновок для обох дослідів, який з використаних методів вимірювання температури є найбільш точним для кожного випадку. Розрахувати абсолютні похибку для інших методів та побудувати графічні залежності похибок цих методів контролю температури по висоті конструкції.

6. Оформити звіт з наступним змістом:

6.1. Опис кожного методу вимірювання

6.2. Схема випробувального стенду

6.3. Результати експериментів.

6.4. Висновки по точності кожного методу.

6.5. Висновки щодо адекватності використовуваної моделі (як моделі силового маслonaповненого трансформатора).

6.7. Рекомендації щодо методів контролю температур маслonaполненого трансформатора.

#### 1.4. Контрольні запитання

1. Який принцип роботи вимірювальних приладів використаний в роботі?

2. Як розподіляються значення температури по висоті маслonaповненого обладнання з природною циркуляцією масла?

3. Який метод вимірювання температури найбільш придатний для контролю температури трансформаторного вводу під робочою напругою?

4. Який метод вимірювання температури верхніх слоїв масла найбільш інформативний?

5. Методи визначення температури обмотки маслonaповненого обладнання?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 КОНТРОЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ В ІЗОЛЯЦІЇ, ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ**

Мета роботи: здобуття практичних навичок з використання методів контролю часткових розрядів та аналізу стану обладнання на підставі виконаних замірів.

### **2.1 Загальні відомості**

Часткові розряди (ЧР) в основній ізоляції в багатьох випадках є первопричиною зміни технічного стану апаратів. Тому, було б логічно контролювати інтенсивність, рівень і сумарну потужність часткових розрядів. Однак, використання цього параметра в умовах експлуатації ускладнене із-за високого рівня експлуатаційних завад (коронні розряди, ВЧ-зв'язок, комутаційні перенапруги та інші). ЧР мають, як правило, велику інтенсивність тому створення вимірювальних пристроїв з необхідною чутливістю не викликає труднощів. Однак, можливість виявлення дефектів в ізоляції, методом реєстрації ЧР в експлуатації визначається не чутливістю апаратури, а здатністю фільтрації зовнішніх перешкод, тобто з усуненням перешкод або зниженням їх рівня. Перешкоди при контролі ЧР можуть викликатися процесами в мережі, пов'язаними з різкими змінами струму, а також джерелами високочастотних напруг. При вимірах часткових розрядів в умовах експлуатації джерела перешкод, як правило, не можуть бути усунені. Додаткові перешкоди можуть створювати радіопередавачі, ЧР в сусідньому обладнанні, розряди між шинами, розряди між елементами струмопроводів, розряди на загострених кряях арматури або на кінцях ножів відключених роз'єднувачів та ін. Основним

джерелом непереборних завад при вимірах в експлуатаційних умовах є коронні розряди на проводах, арматурі і устаткуванні (так званий основний рівень перешкод), які мають характеристики схожі з характеристиками ЧР при реєстрації електричними методами. Вібрація обладнання створює перешкоди при реєстрації акустичними методами. Тому, основною проблемою при вимірюванні в умовах експлуатації є селекція часткових розрядів. Фільтрація перешкод виробляється на кількох стадіях, починаючи з вибору частотного діапазону апаратури, що реєструє, аналізу амплітудно-фазових діаграм (АФД) сигналів і їх тимчасових залежностей і закінчуючи зіставленням сигналів різних каналів (електричних, акустичних і електромагнітних).

Фільтрація перешкод по частотному діапазону – це правильний вибір частотного діапазону. Частотний діапазон визначається виходячи з міркувань максимального фільтрування завад при досить гарній реєстрації сигналів ЧР від дефектів ізоляції. Основними елементами вимірювача уявного заряду є: підсилювач, вимірювальний перетворювач (типу амплітудного імпульсного вольтметра) і відліковий пристрій. Відповідно до ДСТУ EN 60270:2016 рекомендується застосування пристроїв контролю з можливістю реєстрації електричного сигналу у діапазоні частот до 1МГц. Але практика показує, що використання таких частотних діапазонів в умовах експлуатації неможливе із-за великого рівня перешкод в цих діапазонах. Останнім часом на ринку з'являється обладнання, що дозволяє працювати в більш високому діапазоні частот. Оскільки верхня гранична частота складових перехідних процесів, викликаних ЧР у місцях дефектів в паперово-масляної ізоляції, досягає сотень мегагерц (в в елегазі - до декількох ГГц), а більша частина сигналів перешкод має частотний діапазон нижче за 10 МГц, має сенс реєструвати сигнали з частотою 10 МГц та більше (зазвичай смуга складає 500 – 2000кГц ). Також є пристрої реєстрації ЧР з частотним діапазоном, що досягає 2,5ГГц, однак, за наявними даними сигнали з частотами понад 100МГц сильно послаблюються всередині самого обладнання (крім КРУЕ, що мають коаксіальну структуру) . Тому, з точки зору захисту від зовнішніх завад, найбільш кращим діапазоном для вимірювання електричних сигналів ЧР всередині силового обладнання в умовах експлуатації представляється частотний діапазон 8-30 МГц.

Для виділення імпульсів ЧР з імпульсних сигналів перешкод можуть використовуватися методи аналізу амплітудних спектрів ЧР, метод фазових діаграм. Перевагою методу амплітудних спектрів є можливість виявлення дефектів, не виділяючи сигналів ЧР із загального спектра імпульсних сигналів, що включає перешкоди. Таким же достоїнством володіє і метод фазових діаграм, що добре зарекомендував себе при діагностиці кабелів, електричних машин. На жаль, для трансформаторного обладнання поки що відсутні достатні дані за видами фазових діаграм для характерних видів дефектів.

Додаткову можливість для відстройки від перешкод дає "прив'язка" всіх імпульсів до синусоїди живлячої мережі, з розбивкою всіх імпульсів за деякими фазовим зонам. Для цього реєстрація всіх імпульсів проводиться з урахуванням фази робочої напруги в контрольованому високовольтному пристрої. Аналіз амплітудно-фазових діаграм дозволяє більш ефективно провести аналіз стану ізоляції.

Аналіз АФД дозволяє відфільтрувати сигнали корони, які мають дуже характерну форму і легко розпізнаються по АФД. Звичайно, сигнали корони можуть маскувати сигнали ЧР від дефектів ізоляції з тією ж амплітудою і фазою, однак діапазон фазових кутів, в яких спостерігаються сигнали корони, невеликий, і ймовірність повного збігу АФД сигналів від дефекту і корони мала. При достатній статистикою (при сумуванні даних вимірювань більш ніж за 500 періодів мережі) вдається зміряти сигнали ЧР, амплітуди яких в 10-100 разів менше, ніж у імпульсів корони. Сигнали від іскрових розрядів в елементах магнітопроводу теж мають дуже характерну АФД, однак, амплітуда і інтенсивність цих сигналів можуть бути великі. На їх фоні виділити сигнали ЧР від дефектів високовольтної ізоляції досить важко. На щастя, такі дефекти спостерігаються досить рідко, і їх спостереження є одним із завдань діагностики. Крім того, сильна вібрація призводить до досить характерною залежності АФД цих сигналів від часу, яка дозволяє ідентифікувати дефекти такого типу.

При ефективному усуненні зовнішніх перешкод електричний метод реєстрації дозволяє вимірювати з високою чутливістю параметри внутрішніх ЧР, визначати зону їх виникнення, а також природу ЧР. Вимірювання можуть проводитися одночасно за кількома схемами (у різних точках трансформатора), що полегшує визначення

місця ЧР. Останньою стадією розділення сигналів ЧР у високовольтній ізоляції і перешкод є порівняння сигналів електричного каналу з сигналами акустичного та електромагнітного каналів реєстрації.

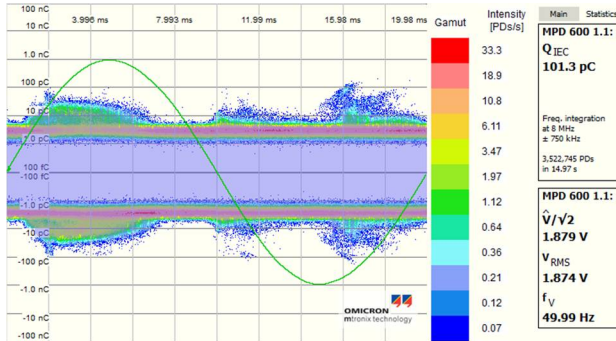


Рисунок 2.1 – Приклад АФД масло наповненого трансформатору струму з частковими розрядами в ізоляції

## 2.2. Опис лабораторної установки

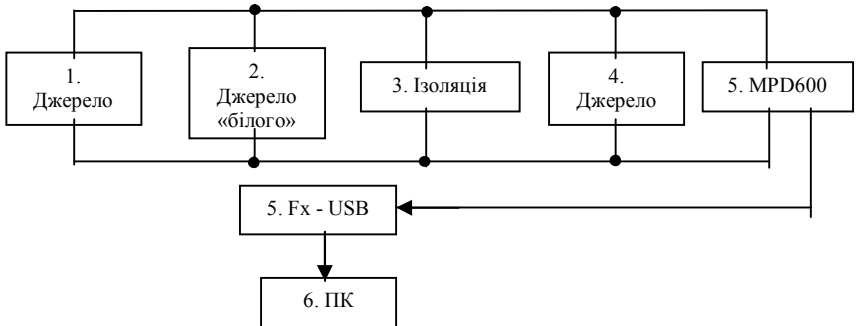


Рисунок 2.2 – Опис лабораторної установки

Лабораторна установка включає в себе:

- фізична модель частини ізоляції обладнання (3);
- генератор-імітатор джерела робочої напруги 50Гц (1);
- генератор-імітатор часткових розрядів Omicron (4);
- генератор-імітатор «білого» шуму (2);

- комплект прибору для реєстрації часткових розрядів Omicron MPD600 (5);
- персональний комп'ютер з програмним забезпеченням Omicron MPD600 (6).

### 2.3. Завдання

1. Зібрати схему випробувальної установки.
2. Встановити частоту пропускання фільтра  $500 \pm 500$  кГц.
3. Записати загальний рівень шумів.
4. Подати з імітатора (4) рівень ЧР на ступень вище загального рівня шумів. Виконати калібрування приладу.
5. Провести вимірювання ЧР на всіх рівнях, які видаються імітатором (10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 пКл).
6. Включити генератор «білого» шуму з налаштуванням -20дБ.
7. Виконати вимірювання ЧР на всіх ступенях імітатора (4).
8. Включити генератор «білого» шуму з налаштуванням -10дБ.
9. Виконати вимірювання ЧР на всіх ступенях імітатора (4).
10. Включити генератор «білого» шуму з налаштуванням 0дБ.
11. Виконати вимірювання ЧР на всіх ступенях імітатора (4).
12. Установити частоту пропускання фільтра  $1 \pm 1,5$  МГц.
13. Виконати пункти 6-11.
14. Установити частоту пропускання фільтра  $10 \pm 1,5$  МГц.
15. Виконати пункти 6-11.
16. Оформити звіт. Звіт повинен містити:
  - короткий опис методики контролю, досліджуваної в лабораторній роботі;
  - опис застосовуваної апаратури;
  - схема лабораторної установки;
  - результати вимірювань в табличній формі;
  - розрахунок і графік похибки калібрування.
  - розрахунки і графіки похибки вимірювань на трьох частотах;
  - висновки по діагностичним можливостям методу контролю технічного стану ізоляції високовольтних машин і апаратів в умови лабораторії і в умовах експлуатації.

## 2.4. Контрольні запитання

1. Який існують методи вимірювання часткових розрядів в експлуатації?
2. Які існують методи фільтрації завод при вимірювання ЧР в експлуатації?
3. Що таке частковий розряд та які його головні характеристики?
4. Які головні проблеми виникають при вимірюванні ЧР в експлуатації?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРОБ МАСЛА

Мета роботи: здобуття практичних навичок з оцінки стану обладнання та виявлення дефектів в обладнанні на підставі даних аналізу концентрацій газів, розчинених в маслі.

### 3.1 Загальні відомості

За допомогою аналізу контролю розчинених газів (АРГ) у маслі високовольтного обладнання можна виявити дві основні групи дефектів (МЕК 60599):

Група 1. Перегріву струмопровідних сполук та елементів конструкції (перегрів олії та паперово-масляної ізоляції). Характерні гази:  $H_2$ ,  $CH_4$  та  $C_2H_6$ .

Група 2. Електричні розряди в маслі (часткові розряди, іскрові та дугові розряди). Характерні гази:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$  та  $C_2H_6$ .

Слід зазначити, що водень і метан мають найнижчу температуру утворення і з'являються в маслі при всіх видах дефектів, починаючи від часткових розрядів до дугових, дані гази не чутливі тільки до розкладання целюлози та порушення герметичності бака.

На рисунку 3.1 представлена інформація щодо можливості діагностування різних типів дефектів за концентраціями основних діагностичних газів.

За статистикою ефективності методів діагностування на основі аналізу розчинених газів, наведеної відомим канадським ученим – професором Мішелем Дювалем найбільш ефективним методом, є «Трикутник Дюваля», метод дає найбільшу достовірність визначення типу дефекту.

Дефект / Газ	CO	CO <sub>2</sub>	<u>H<sub>2</sub></u>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	<u>CН<sub>4</sub></u>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Пошкодження целюлози	■	■							■
Пошкодження масла			■	■	■	■	■		
Негерметичність баку, прокладок, зварних швів		■						■	■
Термічні дефекти в целюлозі	■	■	■		■			■	
Термічні дефекти в маслі 150°С-300°С			■		■		■		
Термічні дефекти в маслі 300°С-700°С			■		■		■		
Термічні дефекти в маслі 700°С			■	■	■	■			
Часткові розряди			■		■				
Дуга			■	■	■	■			

Рисунок 3.1 – Види дефектів та характерні гази

На даний момент М. Дювалем розроблено більше десятка таких трикутників, для уточнення виду дефекту для основного баку, для баків РПН, для різних типів масел тощо.

Метод передбачає обов'язкову наявність дефекту і встановлює його тип, тобто перед застосуванням методу необхідно переконатися, що дефект присутній. Наявність дефекту з'ясовують наступним чином: хоча б один газ з групи C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> або H<sub>2</sub> повинен мати концентрацію не менше L1 і швидкість росту не менше G1, або обладнання повинно знаходитися в стані «3» за IEEE C 57104 і мати швидкість росту концентрації G2.

Таблиця 3.1 – Дефекти за методом «Трикутник Дюваля»

Позначення	Тип дефекту	Ключові діагностичні гази	Причини
<b>PD</b>	Часткові розряди	H <sub>2</sub> , можливе зростання CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO	Тріщини, включення в ізоляції через старіння і перенапруги
<b>D1</b>	Розряди (іскріння) малої енергії	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , можливе зростання, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO	Порожнини в целюлозної ізоляції з вуглецевими каналами, а також частки вуглецю в маслі внаслідок поганого заземлення екранів або баків обладнання
<b>D2</b>	Розряди високої енергії (дуга)	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> і ключовий газ для цього виду дефектів - C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO - в разі розкладання целюлози.	Поганий контакт струмоведучих частин, ослаблення ізоляції внаслідок старіння, експлуатаційних впливів або перегріву, коксування масла.
<b>T1</b>	Перегриви з температурою менш 300 °С	H <sub>2</sub> , CO	Перевищення номінальних навантажень, несправності системи охолодження, неякісні контактні з'єднання, паразитні струми що циркулюють або магнітні потоки.
<b>T2</b>	Перегриви з температурою від 300 °С до 700 °С	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
<b>T3</b>	Перегриви з температурою вище 700 °С	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> в великих кількостях	

При наявності росту водню і CO або CO<sub>2</sub> – причину дефекту необхідно встановлювати не по трикутнику Дюваля, а по співвідношенню CO<sub>2</sub> / CO. Відношення окислів вуглецю може вказувати на пошкодження целюлозної ізоляції. У разі термічного пошкодження паперу з температурою в зоні дефекту, меншою ніж 150 °С, це відношення більше 10, а за температур, більших ніж 250 °С – менше 3. Відношення дає достовірні результати за достатньо високих концентрацій цих газів – не менше ніж 5000 ppm CO<sub>2</sub> та 500 ppm CO. Процес пошкодження целюлозної ізоляції супроводжується утворенням сполук ряду фурану. Обидва гази в не меншій кількості, ніж у разі пошкодження паперу, можуть утворюватись за термічного

окиснення масла, особливо в негерметичному обладнанні з вільним доступом  $O_2$ .

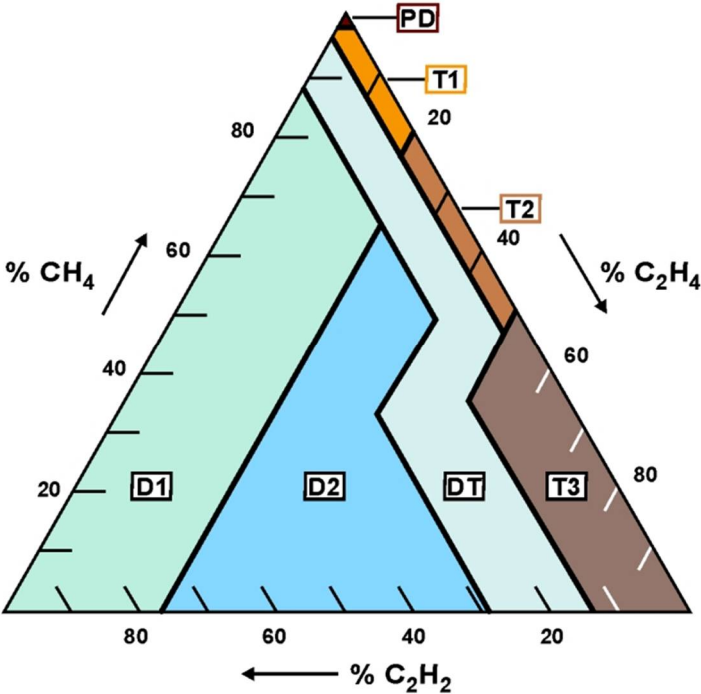


Рисунок 3.1 – Трикутник Дюваля

Таблиця 3.2 – Граничні критерії застосування методу «Трикутник Дюваля»

	Межа, L1, ppm	Швидкість G1 (ppm в місяць)	Швидкість G2 (ppm в місяць)
$H_2$ водень	100	10	50
$CH_4$ метан	75	8	38
$C_2H_2$ ацетилен	3	3	3
$C_2H_4$ етилен	75	8	38
$C_2H_6$ етан	75	8	38
CO угарний газ	700	70	350
CO <sub>2</sub> вуглекислий газ	7000	700	3500

Якщо умови для застосування Трикутника Дюваля виконуються, то алгоритм застосування трикутника полягає в наступному:

- проводиться розрахунок процентного вмісту кожного ключового газу за формулою (на прикладі метану):

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{TG} \times 100 ,$$

де  $CH_4$  - концентрація метану,

TG - сумарна концентрація  $TG=CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2$ .

Далі наносяться отримані дані на відповідні шкали на трикутнику і визначається зона, відповідна дефекту. Лінії необхідно проводити паралельно лініям шкали по кожній стороні трикутника.

На наступному етапі виконується розрахунок змін концентрацій ключових газів від останнього результату контролю та його результати наносяться на трикутник у відповідності до методики, наведеної вище. Якщо обидва результату в одній зоні, то робиться висновок про дефект. Якщо результати в різних зонах, то робиться висновок на основі більш «жорсткого» результату.

Таблиця 3.3 - Приклад: результати АРГ

Газ	Концентрації газів, ppm		Зміна концентрацій, ppm
	01.03.2025	01.04.2025	
$CH_4$	142	192	50
$C_2H_4$	84	170	86
$C_2H_2$	4	7	3

Таблиця 3.4 – Розрахунок відносних концентрацій для прикладу (табл.3.3)

Параметр	Відносні концентрації	
	на 01.04.2025	Зміна
TG	369	139
$\%CH_4$	52	36
$\%C_2H_4$	46	46
$\%C_2H_2$	2	2

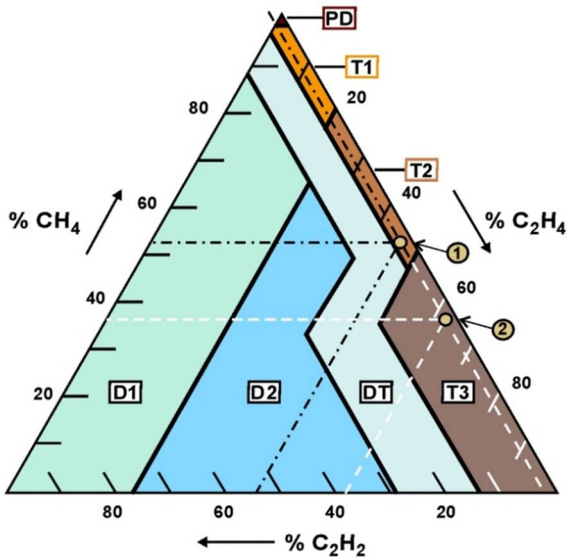


Рис. 5.4 - Трикутник Дюваля - приклад

На підставі наведеного прикладу робиться висновок про наявність перегрівів в трансформаторі з температурою вище 700 °С.

### 3.2. Завдання

1. Виконати діагностування стану обладнання за методом «Трикутник Дюваля» за наведеними даними АРГ, згідно заданих варіантів.

2. Оформити звіт. Звіт повинен містити:

- опис існуючих методів АРГ;
- результати перевірки можливості застосування методу «Трикутник Дюваля» для аналізу типу дефекту;
- результати розрахунків за варіантом;
- графічні результати у вигляді трибунка з розрахунковими точками дефекту;
- висновки про тип дефекту.

Таблиця 3.5 – Варіанти завдання

Варіант	Концентрація, ppm									
	Газ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.04.2025	H <sub>2</sub>	176.07	162.27	110.01	163.32	6.32	148.99	7.84	4.54	2.73
	CH <sub>4</sub>	5.33	5.25	5.34	1.63	6.28	0.56	82.40	150.77	78.10
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5.80	7.67	1.06	6.47	4.28	2.44	7.54	1.50	7.51
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.90	0.54	9.99	4.10	0.98	9.79	5.96	7.04	2.73
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.02	5.92	6.76	4.13	5.61	0.61	8.33	9.29	6.74
	CO	577.23	456.11	80.10	147.15	584.60	113.71	77.13	285.91	233.80
	CO <sub>2</sub>	358.87	2038.37	1995.93	4091.58	3895.14	1863.75	897.77	3465.92	2104.33
01.05.2025	H <sub>2</sub>	327.96	296.08	142.54	238.11	9.04	229.75	12.05	6.04	4.04
	CH <sub>4</sub>	9.55	8.34	7.38	3.10	10.53	0.64	136.53	165.16	97.98
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	7.96	15.24	1.38	8.16	6.44	4.73	11.64	2.38	10.06
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5.68	1.02	19.47	7.32	1.48	16.20	10.89	8.24	2.85
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.65	7.27	13.39	5.69	8.21	0.92	9.01	17.90	9.99
	CO	609.70	773.16	112.26	189.78	791.24	158.11	91.94	313.91	281.97
	CO <sub>2</sub>	699.64	4035.99	2551.35	7853.29	5472.03	2063.87	1507.28	5004.31	3923.60

Таблиця 3.6 – Варіанти завдання

Варіант	Концентрація, ppm									
	Газ	10	11	12	13	14	15	16	17	18
01.04.2025	H <sub>2</sub>	5.89	3.45	4.28	6.14	7.46	9.45	5.58	6.75	1.88
	CH <sub>4</sub>	116.00	142.24	112.05	81.15	146.30	118.28	145.05	9.05	8.97
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	9.28	9.23	33.25	82.32	4.57	98.93	52.71	72.63	26.60
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.31	5.38	6.19	8.08	9.03	3.48	4.41	4.17	162.84
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.43	4.06	4.90	2.03	7.46	1.04	6.93	1.23	7.71
	CO	673.44	515.29	206.51	270.36	305.82	384.36	111.04	281.29	431.05
	CO <sub>2</sub>	6526.14	2428.16	3731.07	848.36	2025.61	6832.55	2361.46	1190.76	2812.57
01.05.2025	H <sub>2</sub>	7.93	4.88	6.77	7.21	13.45	13.03	5.86	10.19	2.98
	CH <sub>4</sub>	133.32	241.14	152.78	85.06	248.14	165.09	220.19	12.73	17.32
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	13.73	10.88	62.38	141.16	6.48	126.78	92.61	80.34	40.36
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4.04	7.66	9.15	12.38	15.66	5.23	7.94	5.32	216.62
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	10.82	6.27	5.83	3.16	9.53	1.19	9.18	2.02	14.40
	CO	761.27	935.09	347.78	328.96	414.87	583.18	219.06	520.13	542.71
	CO <sub>2</sub>	6714.65	3741.59	6519.74	1245.39	2903.62	13428.44	4260.70	1783.73	3542.55

Таблиця 3.7 – Варіанти завдання

Варіант	Концентрація, ppm									
	Газ	19	20	21	22	23	24	25	26	27
01.04.2025	H <sub>2</sub>	1.79	2.43	0.79	6.93	5.82	4.25	1.10	5.83	0.93
	CH <sub>4</sub>	3.47	9.40	8.95	5.04	7.29	5.73	2.91	7.49	5.42
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	43.49	60.49	87.62	1.83	1.45	0.50	3.99	4.56	4.15
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	156.16	99.52	119.12	103.87	2.58	5.48	5.59	9.04	0.73
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	8.41	6.33	9.00	4.71	154.12	174.26	105.96	103.14	115.69
	CO	523.62	602.86	352.10	535.69	237.39	591.80	267.08	257.78	671.40
	CO <sub>2</sub>	586.93	3147.78	5882.51	5771.21	3966.13	5735.87	5930.95	2161.02	4193.29
01.05.2025	H <sub>2</sub>	2.39	3.03	0.94	7.68	9.09	5.35	1.89	10.26	1.50
	CH <sub>4</sub>	5.93	12.96	11.88	5.10	8.78	6.73	4.82	11.83	5.90
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	57.07	84.51	123.83	2.11	1.75	0.85	5.61	7.33	4.92
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	280.89	151.92	137.31	143.07	3.52	5.57	10.90	11.47	0.94
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	9.68	8.04	14.58	5.60	242.50	233.35	174.37	155.55	117.87
	CO	834.13	953.23	387.10	1060.42	319.10	1001.66	404.92	462.36	773.85
	CO <sub>2</sub>	1148.17	3807.87	7088.70	10804.39	6061.15	6369.04	7255.47	4013.90	5954.95

### 3.3. Контрольні запитання

1. Який існують методи інтерпретації результатів АРГ?
2. Коли можна застосовувати метод «Трикутник Дюваля»?
3. Що дозволяє з'ясувати про стан обладнання метод «Трикутник Дюваля»?

### ЛАБОРАТОРНА (ПРАКТИЧНА) РОБОТА №4 ПОБУДОВА СУЧАСНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ НА БАЗІ АВТОМАТИЗОВАНОГО БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ЗА ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ (ЕКСКУРСІЯ НА ВИРОБНИЦТВО)

Мета роботи – набути практичних навичок з побудови систем автоматизованого безперервного контролю стану обладнання, ознайомлення з сучасним виробництвом програмно-апаратних комплексів для діагностування стану обладнання під робочою напругою.

## 4.1 Загальні відомості

Старіння парку електрообладнання, прагнення до зниження експлуатаційних витрат і до підвищення надійності електропостачання споживачів вимагають реорганізації підходу до експлуатаційної діагностики технічного стану високовольтного електрообладнання електричних станцій, підстанцій та мереж, а також обладнання енергоємних виробництв. Планово-попереджувальний підхід до діагностики та технічного обслуговування та ремонту (ТОіР) високовольтних електричних машин та апаратів, що діє на даний момент в Україні, не відповідає сучасним умовам.

Безперервний експлуатаційний контроль (моніторинг) технічного стану високовольтного електрообладнання є оптимальним розв'язанням задачі реорганізації експлуатаційної діагностики. Автоматизований безперервний контроль має низку переваг перед періодичним, такі як: скорочення міжконтрольного періоду, відсутність людського фактора, облік впливу експлуатаційних факторів, накопичення діагностичної інформації, віддалене надання інформації різного рівня та ін. Впровадження автоматизованого моніторингу дозволить планувати ремонти обладнання та за необхідності проводити термінове відключення обладнання, що знаходиться у перед аварійному стані, а також здійснити перехід від застарілої системи періодичного обслуговування до обслуговування за реальним технічним станом об'єкта

Традиційно система безперервного контролю (СБК) має трирівневу структуру: нижній рівень - первинні датчики і пристрої (встановлюються на контрольованому обладнанні), середній рівень - блок моніторингу (встановлюється, як правило, в безпосередній близькості до контрольованого обладнання), верхній рівень - видача інформації (локальним і віддаленим користувачам, системам).

## 4.2 Завдання

1. Відвідати з викладачем підприємство по виробництву засовів автоматизованого моніторингу (безперервного контролю) технічного стану обладнання.

2. Ознайомитися з сучасними рішеннями, датчиками та обладнанням для моніторингу стану обладнання.

3. Ознайомитися з апаратної частиною реалізації блоків моніторингу.

4. Ознайомитися з функціями програмного забезпечення систем безперервного контролю.

5. Оформити реферат на задану тему згідно варіанту.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдання

№ варіанту	Тема
1.	Сучасні засоби моніторингу температури найбільш нагрітої точки обмотки силового трансформаторного обладнання
2.	Сучасні засоби безперервного контролю концентрацій розчинених газів в трансформаторному маслі
3.	Сучасні засоби для моніторингу стану вимірювальних трансформаторів з конденсаторною ізоляцією
4.	Сучасні засоби та методи діагностування обладнання за допомогою реєстрації характеристик часткових розрядів під робочою напругою
5.	Сучасні засоби діагностування стану трансформаторних вводів під робочою напругою
6.	Побудова систем неперервного контролю обладнання підстанції
7.	Особливості контролю вологовмісту твердої ізоляції маслонаповненого обладнання під робочою напругою
8.	Моніторинг стану силового трансформаторного обладнання

### 4.3. Контрольні запитання

1. Яка структура систем неперервного контролю?
2. Які переваги та недоліки має неперервний контроль стану обладнання?
3. Які основні елементи блоку моніторингу обладнання?
4. Які датчики та з якою метою можуть застосовуватися у складі систем неперервного контролю?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 ДІАГНОСТУВАННЯ АПАРАТІВ З КОНДЕНСАТОРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Мета роботи – набути практичних навичок вимірювання та розрахунку характеристик ізоляційної конструкції обладнання ( $\text{tg}\delta_1$  і  $C_1$ ) диференційним методом за допомогою сучасного цифрового осцилографу.

### 5.1 Загальні відомості

Значення тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta_1$ ) і ємності ( $C_1$ ) основної ізоляції – це найбільш важливі діагностичні критерії так як вони безпосередньо пов'язані з основними характеристиками ізоляційного матеріалу - діелектричними втратами і діелектричної проникністю. Діелектрична проникність визначається ступенем поляризації діелектрика. Для ізоляційної конструкції замість неї прийнято розглядати пропорційну їй ємність між електродами. Оскільки при поляризації відбувається переміщення електричних зарядів, на це витрачається енергія поля, частина цієї енергії розсіюється в обсязі діелектрика - це і є діелектричні втрати. Саме вони і особливо їх зміна характеризують стан діелектрика. Діелектричні втрати - це потужність, яка залежить не тільки від характеристик діелектрика і частоти прикладеного до нього напруги, але і від об'єму ізоляції. Тому для оцінки стану ізоляції прийнято використовувати тангенс кута діелектричних втрат, який майже не залежить від розмірів ізоляційної конструкції. Величина  $\text{tg}\delta_1$  дає усереднену об'ємну характеристику стану діелектрика, так як активна складова струму, викликана діелектричними втратами в місцевому дефекті відноситься до загального ємнісного току об'єкта. Саме зміна  $\text{tg}\delta_1$  дає можливість зафіксувати дефект на ранній стадії розвитку і можливість прогнозування відмови обладнання. Вимірювання ємності здатне зафіксувати грубий дефект, такий як перекриття частини ізоляції апарату, на завершальне стадії ушкодження, для негайного аварійного його відключення.

Дефекти в ізоляції можуть розвиватися за строк до двох тижнів, тому періодичний контроль  $\text{tg}\delta_1$  не завжди дозволяє його зафіксувати, це диктує необхідність, використовувати безперервний контроль

характеристик ізоляції. Він забезпечує підвищення ефективності контролю при зниженні трудовитрат на випробування, насамперед за рахунок:

- скорочення періоду між випробуваннями;
- використання робочого напруги;
- підвищення безпеки персоналу і зниження людського фактора за рахунок застосування стаціонарних схем вимірювань;
- накопичення даних, необхідних для вдосконалення системи діагностики;
- зниження експлуатаційних витрат, за рахунок зниження кількості періодичних контролів і переходу від застарілої системи періодичного ТОіР до обслуговування за технічним станом.

Одним з найбільш поширених принципів безперервного контролю, сьогодні, є нерівноважно-компенсаційний або балансовий метод. Наукові публікації з обґрунтування даного методу з'явилися ще наприкінці 60-х років минулого сторіччя. Метод базується на тому припущенні, що характеристики ізоляції всіх трьох контрольованих об'єктів, трифазної групи, не можуть змінитися одночасно в рівній мірі. При виникненні практично будь-якого дефекту в ізоляції одного, або двох, об'єктів 3-х фазної групи завжди виникає струм небалансу. Величина струму небалансу кількісно характеризує ступінь розвитку дефекту в ізоляції, а кут струму небалансу вказує на те, в якому з трьох об'єктів відбулися зміни. Практична реалізація даного методу досить різноманітна, від пристроїв КИВ-500 (контроль ізоляції вводів) в яких початкова балансування векторів струму виконувалася зміною числа витків первинних обмоток підсумовуючого трансформатора струму, який складався з 3-х первинних і однієї вторинної обмотки, до сучасних мікропроцесорних пристроїв. У енергокомпаній є багатий досвід експлуатації приладів КИВ та інших, заснованих на цьому принципі. Однак у більшості випадків він негативний, основна причина цього те, що такий пристрій може прийняти впливу режимів роботи енергосистеми на взаємні кути між векторами фазних напруг енергосистем, всі зміни цих кутів, що відбулися після балансування схеми, автоматично призводять до погрішностей в розрахунках і до необґрунтованих діагностичних висновків. Також існує небезпека синхронного старіння об'єктів трифазної групи, при якому даний метод залишиться нечутливим. Другим негативним фактором балансового методу, є те, що пристрої на його основі, не здатні

помітити дефект ізоляції навіть на небезпечній стадії розвитку, так як передаварійною уставкою у таких пристроїв являється значення - 3%, а 5-7% аварійної, від номінального струму комплексної провідності ізоляції. Більш низькі значення уставок в таких пристроях призводять до невиправданих відключень обладнання та вводять в оману експлуатаційний персонал на підстанціях.

Аналогічним недоліком володіє і другий за поширеністю метод - вимір комплексної провідності. Норми дозволяють виконувати контроль двома методами: виміром комплексної провідності  $Y$  або через вимірюванням  $\text{tg}\delta_1$  і  $C_1$ . Не можна погодитися, що пропонувані методи рівноцінні, так як контроль комплексної провідності придатний для відстеження змін ємності, але не придатний для контролю зміни  $\text{tg}\delta_1$ , тому зміна  $\text{tg}\delta_1$  на 0,6%, викличе збільшення струму комплексної провідності всього на 1,4 мкА для трансформатора струму 330 кВ з ємністю 700пФ. Контроль такої зміни струму комплексної провідності вимагає високоточного обладнання, а по-цьому неможливий в реальних умовах експлуатації через впливів характеристик елементів самої вимірювальної схеми (зволоження поверхні і корозія резисторів, розрядників та інших елементів, температурна нестабільність елементів вимірювальної схеми), а також перешкод і різних струмів впливу. Метод придатний лише для контролю аварійного зміни ємності. Наступним методом є диференціальний контроль  $\text{tg}\delta_1$  і  $C_1$  мостом змінного струму (міст Шеринга). Основною проблемою для даного метода є необхідність достовірного опорного об'єкта (трансформатор струму, ввід, конденсатор зв'язку або трансформатор напруги). Застосування мостової схеми дозволяє отримати високоточні результати. Недоліком даного методу є висока ціна моста, необхідність його обслуговування та обов'язкової періодичної повірки, складність автоматизації рівноваження моста.

В лабораторній роботі пропонується виконати вимірювання  $\text{tg}\delta_1$  і  $C_1$  диференційним методом за допомогою сучасного цифрового осцилографу.

## 5.2. Опис лабораторної установки

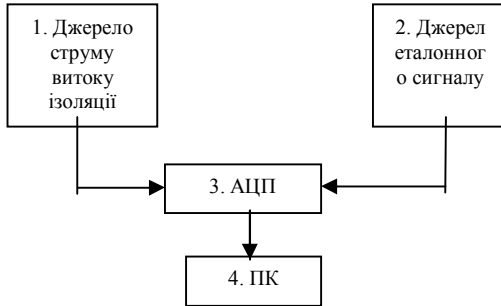


Рисунок 5.1 – Опис лабораторної установки

Лабораторна установка включає в себе:

- генератор-імітатор джерела струму виточу ізоляції 50Гц (1);
- генератор-імітатор еталонного сигналу (2);
- цифровий осцилограф (АЦП) (3);
- персональний комп'ютер з програмним забезпеченням осцилографа (4).

## 5.3 Завдання

1. Провести настройку осцилографа, для зручної роботи з заданими сигналами за допомогою правої панелі налаштувань.

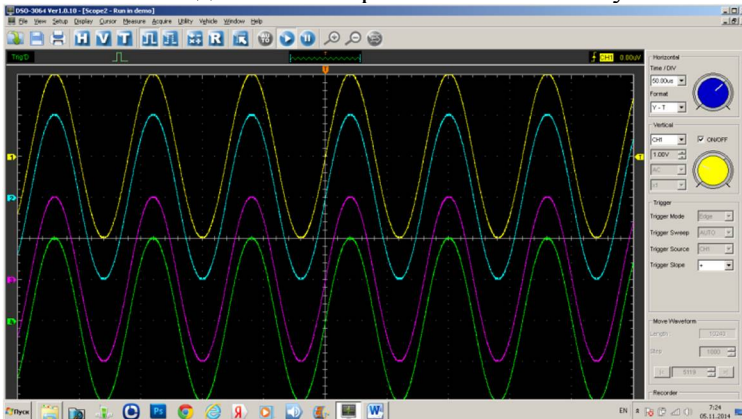


Рисунок 5.2 – Налаштування

2. У меню Setup \ Math Побудувати функцію швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) для обох сигналів. Зберегти дані в текстовому і графічному видах.

3. Побудувати функцію  $A / B$ , зберегти дані.

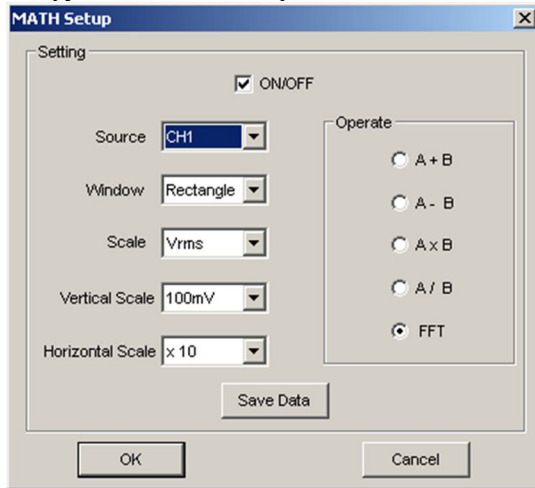


Рисунок 5.3 – Математичні функції осцилографа

4. За допомогою меню Measure\Edit options розрахувати всі можливі характеристики обох сигналів. Зберегти результати.

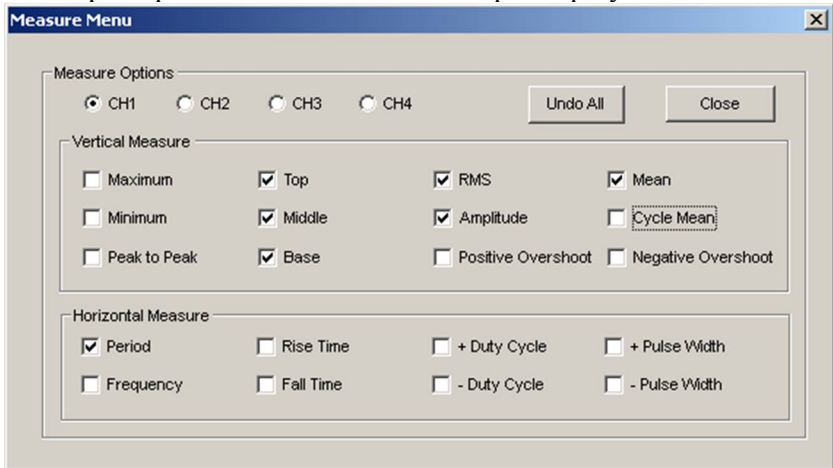


Рисунок 5.4 – Математичні параметри осцилографа

5. За допомогою меню File\Save Dat зберегти дані по всіх каналах в текстовому вигляді.

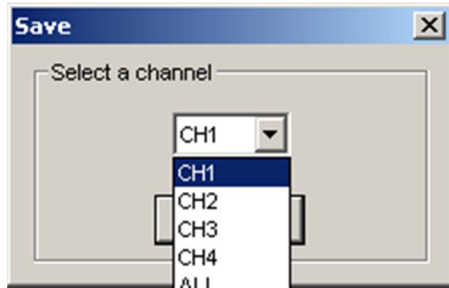


Рисунок 5.5 – Збереження даних

6. На основі отриманих даних, прийнявши, що перший сигнал - еталонний сигнал від вимірювальної обмотки трансформатора напруги, з первинною лінійною напругою згідно варіанту, знятий з його вторинної обмотки через дільник  $R_3=1\text{МОм}$  на  $R_4=33\text{кОм}$ , а другий сигнал - струм витoku вводу, знятий як падіння напруги на резисторі (опір згідно з варіантом), розрахувати ємність і тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції вводу. Номінальна вторинна лінійна напруга вимірювального трансформатора напруги – 100В.

Таблиця 5.1 – Варіанти завдання

Варіант	Клас напруги вводу ( $U_{\text{ном}}$ ), кВ	Опір вимірювального резистора $R_2$ , Ом
1	110	100
2	220	50
3	330	20
4	500	100
5	750	50

Для початку розрахунку треба знайти діюче значення робочої напруги  $U_1$ :

$$U_1 = \frac{V_1}{R_4} \cdot (R_3 + R_4) \cdot k_{Tr1};$$

де  $k_{Tr1}$  – коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги:

$$k_{Tr1} = \frac{U_{nom}}{100}.$$

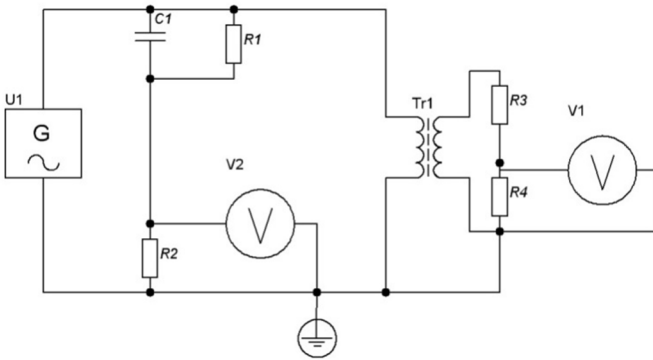


Рисунок 5.6 – Принципова схема:

$C_1$ ,  $R_1$  – заступна схема ізоляції апарату;  $R_2$  – вимірювальний резистор;  $R_3$ ,  $R_4$  – дільник напруги;  $Tr1$  - вимірювальний трансформатор напруги.

Далі знаходиться струм витoku ізоляції, за умови, що  $R_1 \gg Z_{C1}$  опір  $R_1$  при розрахунку не враховується:

$$i = \frac{V_2}{R_2}.$$

Реактивний опір ізоляції:

$$Z_{C1} = \frac{1}{\omega \cdot C_1};$$

або:

$$Z_{C1} = \frac{U_{nom}}{i}.$$

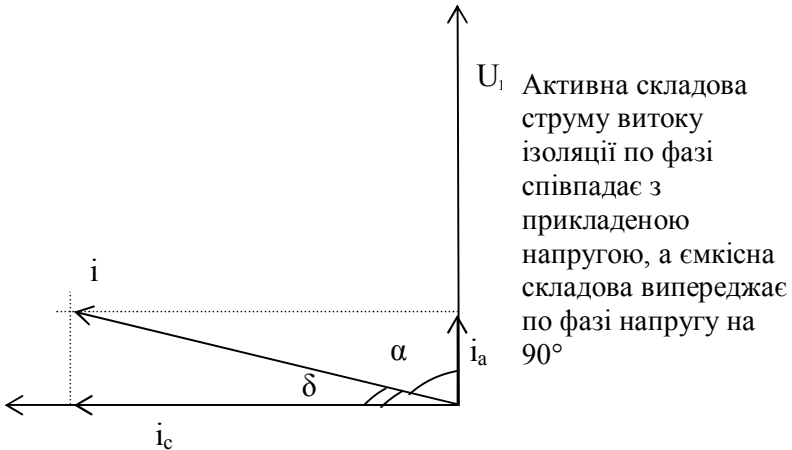
Тоді ємність ізоляції розраховується за формулою:

$$C_1 = \frac{i}{U_{nom} \cdot \omega}$$

Пошук значення тангенсу кута діелектричних втрат пропонується проводити за допомогою векторного методу. Метод ґрунтується на синхронному запису струму провідності ізоляції об'єкту контролю та прикладеної до нього напруги, з використанням математичного обчислення кута між векторами цих струмів (рис. 3.6).

Тобто для пошуку діелектричних втрат треба знайти початкові фази двох сигналів записаних осцилографом, та розрахувати формулу:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - (\varphi_{V2} - \varphi_{V1}).$$




$i_c$  — ємнісна складова струму провідності контрольованого й об'єкту;  $i_a$  — активні складових струмів провідності контрольованого й еталонного об'єктів;  $\alpha$  - розрахований кут між двома векторами: струму комплексної провідності та напруги;  $\delta$  - кут діелектричних втрат об'єкта

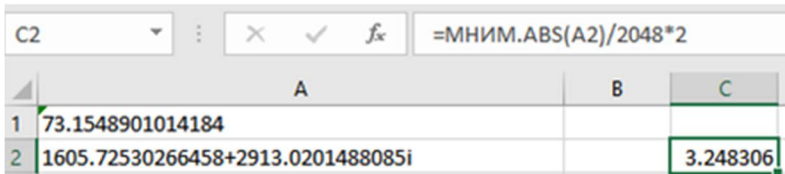
Рисунок 5.7- Векторна діаграма для обчислення кута діелектричних втрат

Пошук початкових фаз необхідно здійснювати за допомогою чисельного методу швидкого перетворювання Фур'є дискретно заданої функцій. У формулі використовувати виключно фази перших гармонік сигналів.

Функцію перетворення Фур'є можна використовувати з відомих математичних САД програм, або за допомогою самостійно зроблених програм. Один з можливих варіантів - **розрахунок характеристик першої гармоніки дискретних сигналів за допомогою функції «Аналіз Фур'є» у Microsoft Excel**

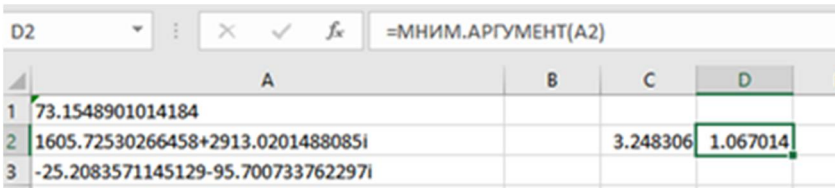
Обрати вкладку «Дані», кнопка  «Аналіз даних», у окні, що з'явиться обрати – «Аналіз Фур'є». Далі потрібно у вікні «Вхідний інтервал» обрати 2048 значень своєї осцилограми, або заданої викладачем осцилограми, згідно свого варіанту (сигнал V1), вибрати вивід результатів – на новий робочий аркуш та натиснути «ОК».

Розрахувати значення амплітуди та фази першої гармоніки сигналу.



	A	B	C
1	73.1548901014184		
2	1605.72530266458+2913.0201488085i		3.248306

Рисунок 5.8 – Приклад розрахунку амплітуди першої гармоніки сигналу.



	A	B	C	D
1	73.1548901014184			
2	1605.72530266458+2913.0201488085i		3.248306	1.067014
3	-25.2083571145129-95.700733762297i			

Рисунок 5.9 – Приклад розрахунку фази першої гармоніки сигналу.

Зробити аналогічні розрахунки для другого сигналу - V2 свого варіанту на 2048 значень.

Перенести результати на один окремий лист та розрахувати тангенс кута діелектричних втрат:

	A	B	C	D
1	-8.55784214418867	V1	3.248306	1.067014
2	-181.47078599664+97.218499668222i	V2	0.201046	2.649775
3	2.98900068967626-3.23754055257037i			
4	1.12595786583139-1.751570979536i			
5	0.567438988858066-1.17325988873345i		tgd=	-0.01196

Рисунок 5.10 – Приклад розрахунку кута діелектричних втрат

Далі необхідно зробити аналогічні розрахунки, починаючи зі строки 2005 (+2048 точок), потім 4005, потім 6005.

Розрахувати середні значення за розрахунками чотирьох періодів, та використовувати їх у подальших розрахунках, за методичними вказівками.

7. Оформити звіт. У звіті привести форми вихідних сигналів, результати автоматизованих і ручних розрахунків. Навести схему та розрахунки, що відповідають завданню у п.6.

#### 5.4. Контрольні запитання

1. Які існують методи вимірювання ємності та тангенсу кута діелектричних втрат основної ізоляції високовольтних апаратів?
2. Чому ємність і тангенс кута діелектричних втрат основної ізоляції вважаються головними характеристиками?
3. Як вологовміст целюлози впливає на значення ємності і тангенсу кута діелектричних втрат основної ізоляції вводу та чому?
4. Як можливо діагностувати технічний стан головної ізоляції високовольтних уродів?

## ЛАБОРАТОРНА (ПРАКТИЧНА) РОБОТА №6

### ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ РЕСУРСУ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРУ

Мета роботи – набути практичних навичок та освоїти методику практичного розрахунку температури найбільш нагрітої точки обмотки силового трансформаторного, для оцінки можливості перевантаження та прогнозування вичерпання ресурсу його целюлозної ізоляції.

#### 6.1 Загальні відомості

Питання здатності навантаження трансформаторів - це найважливіше питання експлуатації, без урахування якого неможливе проектування, експлуатація, діагностування трансформаторів. Розміри капітальних вкладень і економічність роботи підстанції також знаходяться в прямій залежності від обліку здатності навантаження трансформаторів. Тому однією з задач діагностики стає розрахунок навантажувальної здатності трансформатору та оцінка вичерпання ресурсу при заданих режимах навантаження.

В експлуатації при зростанні навантаження підстанції та неможливість заміни в даний час трансформаторного обладнання більш потужними може виникнути необхідність у навантаженнях встановлених трансформаторів, більших ніж вказано в їх технічній документації. Отримавши від заводу-виготовлювача інформацію за значеннями, що вимагаються для розрахунку параметрів розглянутого трансформатора, інженер-діагност може визначити безпечні межі таких перевантажень з урахуванням конкретних режимів та умов експлуатації, виконавши відповідні розрахунки по тій чи іншій методиці в залежності від наявних можливостей і бажаної точності. Такі ж розрахунки можуть бути виконані і при реконструкції трансформаторів, наприклад, при посиленні системи охолодження (СО) або в інших подібних випадках.

В даний час понад 80% електроенергії, вироблюваної на електростанціях України, по шляху до шин споживачів 0,4-10 кВ зазнає від однієї до восьми трансформацій. В кожному ступені

трансформації на кіловат потужності передачі доводиться встановлювати 1,5-2,5 кВА трансформаторної потужності.

Силові трансформатори загального призначення, особливо розподільні, як правило, працюють з нерівномірним навантаженням, при цьому відхилення миттєвого значення струму навантаження від середньодобового можуть іноді досягати 50% і більше зазвичай з певною періодичністю як протягом доби, так і по сезонах року. Температура охолоджуючої середовища також коливається в широких межах. Перевантаженням трансформатор може піддаватися систематично, та умовою їх допустимості є збереження нормального терміну служби ізоляції трансформатора.

В аварійній ситуації головним завданням є безперебійне електропостачання споживачів. Тому при відключенні одного з паралельно працюючих трансформаторів (наприклад, при виході його з ладу) трансформатори, що залишилися у роботі повинні допускати певну перевантаження. В цьому випадку можна допустити певне зниження терміну служби трансформатора. Розрахунок здатності та пропорційного їй зниження ресурсу є задачею технічної діагностики.

В основі розрахунку здатності навантаження лежить теплової знос ізоляції трансформатора. Під впливом температури і ряду інших чинників фізико-хімічні властивості твердої ізоляції з плином часу зазнають змін, при цьому ізоляція стає крихкою. Хоча електрична міцність її практично не знижується, вона більше не здатна витримувати механічні навантаження від вібрацій або коротких замикань. Цей незворотний процес називається старінням. Швидкість старіння ізоляції залежить від температури, а досягнутий ступінь старіння - від температури і часу її впливу. На швидкість і досягнуту ступінь старіння ізоляції впливають також волога, кисень повітря і інші чинники, однак при існуючому рівні знань строгий облік цих факторів не може бути виконаний.

Для розрахунку здатності навантаження потрібно розрахувати температуру в найбільш нагрітих місцях обмотки, визначити залежність швидкості старіння ізоляції від температури і температуру, при впливі якої трансформатор працюватиме заданий, економічно виправданий термін (можливе скорочення терміну служби трансформатора з інших причин, наприклад через недостатню електричної міцності ізоляції, недостатньою електродинамічної стійкості, дефектів конструкції, не враховується).

Розрахунок температур найбільш нагрітих точок також може бути корисним при діагностуванні ефективності роботи системи охолодження та в інших випадках коли можна на базі порівняння дійсних та розрахункових температур здійснити діагностування трансформатору.

Розрахунок температури найбільш нагрітої точки обмотки зводиться до розрахунків перевищення температури верхніх шарів масла над температурою охолоджуючої середовища і перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки над температурою масла при несталих режимах нагрівання, а також такий незмінною температури охолоджуючої середовища, яка була б еквівалентна природно змінюється.

Залежність швидкості старіння ізоляції від температури визначають експериментально на зразках і моделях ізоляції, використовуючи при цьому ті чи інші фізичні або хімічні критерії.

Температуру ізоляції, при впливі якої трансформатор працюватиме заданий термін, визначають за результатами ресурсних випробувань достатньої кількості трансформаторів або моделей при більш високих, ніж робітники, температурах. Результати випробувань екстраполюють в область робочих температур на основі певної залежності швидкості старіння ізоляції від температури.

У зв'язку з тим що перераховані питання є дуже складними і не мають точних рішень, для розробки прийнятних для практики керівництв по навантаженню трансформаторів доводиться приймати ряд спрощують положень та умов, що забезпечують в кінцевому підсумку певні запаси.

Найбільш точна модель для розрахунку температури найбільш нагрітої точки та характеристик термічного старіння ізоляції представлена у документі IEC 60076-7 «Loading guide for oil immersed power transformers».

## 6.2 Методика розрахунку

Таблиця 6.1 – Вхідні данні для методики

Позначення	Найменування
$T_{OIL1}$	Температура верхніх слоїв масла (ВСМ), °С
$T_{AIR}$	Температура повітря, °С
$T_{HS1}$	Стартове значення температури найбільш нагрітої точки (ТННТ), °С
CoolCap	Ефективність роботи системи охолодження, %
$T_{HS-MAX}$	Максимальна допустима ТННТ, °С
$L_1$	Заплановане навантаження – перший рівень, %
$L_2$	Заплановане навантаження – другий рівень, %
$dT_{HS}$	Проектне перевищення температури ВСМ над температурою повітря, °С
$P_{XX}$	Втрати холостогоходу, Вт
$P_N$	Втрати при номінальному навантаженні, Вт
$k_{OIL}$	Показник ступеню масла
$k_{HS}$	Коефіцієнт ТННТ (1,3 для великих трансформаторів, для всіх варіантів контрольної роботи)
Hgr	Градієнта температури обмотки (обмотка - масло), °С
$k_W$	Показник ступеню обмотки
$t_{OIL}$	Температурна стала масла, год
$t_W$	Температурна стала обмотки, год

Таблиця 6.2 – Значення коефіцієнтів

Коефіцієнт	Тип СО			
	М	Д	ДЦ	Ц
$k_{OIL}$	0.80	0.80	1.00	1.00
$k_W$	1.30	1.30	1.30	2.00
$k_{11}$	0.50	0.50	1.00	1.00
$k_{21}$	2.00	2.00	1.30	1.00
$k_{22}$	2.00	2.00	1.00	1.00
$t_{OIL}$	3.50	2.50	1.50	1.50
$t_W$	0.1666	0.1166	0.1166	0.1166

Початковий тепловий стан трансформатору описується параметрами:

- початкове перевищення ТННТ:

$$HS_1 = T_{HS1} - T_{OIL} \quad (6.1)$$

- початкове перевищення температури ВСМ:

$$T_{OIL1} = T_{OIL} - T_{AIR} \quad (6.2)$$

Відношення втрат при номінальному струмі до втрат холостого ходу:

$$R = \frac{P_N}{P_{XX}} \quad (6.3)$$

Функція, що описує відносне зростання температури верхніх слоїв масла в сталому режимі:

$$f_1 = 1 - e^{-\frac{timestep}{t_{OIL} \cdot k_{11}}} \quad (6.4)$$

де timestep – час, год (час змінюється від 0 до 10 годин, з кроком 0,1 години, вважається, що під час інтервалу кроку параметри трансформатору незмінні).

Функція, що описує відносне зростання температури найбільш нагрітої точки в сталому режимі:

$$f_2 = k_{21} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{timestep}{t_W \cdot k_{22}}} \right) - (k_{21} - 1) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{timestep}{\frac{t_{OIL}}{k_{22}}}} \right) \quad (6.5)$$

Функція, що описує відносне зменшення температури верхніх слоїв масла згідно зі станом охолодження трансформатору:

$$f_3 = e^{\frac{-timestep}{t_{OIL} \cdot k_{11}}} . \quad (6.6)$$

Розрахунок температурного режиму (нагрів чи охолодження) здійснюється за формулою:

$$OilFC = dT_{HS} \cdot \left( \frac{(1+R) \cdot LOAD^2}{(1+R)} \right)^{k_{OIL}} \quad (6.7)$$

Прогнозована температура ВСМ при нагріванні:

$$IncStepOilTemp = T_{AIR} + T_{OIL1} + (temp - T_{OIL1}) \cdot f_1 \quad (6.8)$$

де

$$temp = dT_{HS} \cdot \left( \frac{(1+R) \cdot LOAD^2}{(1+R)} \right)^{k_{OIL}} \cdot \left( \frac{100}{CoolCap} \right)$$

Прогнозована ТННТ при нагріванні:

$$IncStepHotSpot = temp + incStepOilTemp + HS_1 - HS_1 \cdot f_2 \quad (6.9)$$

де

$$temp = (k_{HS} \cdot Hgr \cdot LOAD^{k_w}) \cdot f_2$$

Прогнозована температура ВСМ при охолодженні:

$$DecStepOilTemp = T_{AIR} + temp + (T_{OIL1} - temp) \cdot f_3 \quad (6.10)$$

де

$$temp = dT_{HS} \cdot \left( \frac{(1+R) \cdot LOAD^2}{(1+R)} \right)^{k_{OIL}} \cdot \left( \frac{100}{CoolCap} \right)$$

Прогнозована ТННТ при охолодженні:

$$DecStepHotSpot = k_{HS} \cdot Hgr \cdot LOAD^{k_w} + DecStepOilTemp \quad (6.11)$$

Миттєве значення вичерпаного ресурсу ізоляції:

$$Z = 2^{\frac{T_{HS}-98}{6}} \quad (6.12)$$

де  $T_{HS}$  – поточне розраховане значення ТННТ, °С.

Інтегральне значення вичерпаного ресурсу ізоляції:

$$LR = \left[ \sum_{n=0}^{100} (Z) \right] \cdot TS \quad (6.13)$$

де  $TS=0,1$  – крок розрахунку,

$n$  – номер кроку розрахунку.

### 6.3 Методика виконання роботи

6.3.1 Вибрати згідно п.6.4. вихідні данні для свого варіанту.

6.3.2 Вибрати необхідні значення коефіцієнтів за табл. 6.2 для вказаного у завданні типу системи охолодження.

6.3.3 Розрахувати початковий тепловий стан трансформатору за формулами (6.1) та (6.2).

6.3.4 Присвоїти змінній  $LOAD$  значення першого ступеня навантаження ( $LOAD=L_1/100$ ).

6.3.5 Поточний час: timestep = 0 год.

6.3.6 Розрахувати данні за формулами (6.3) – (6.6).

6.3.7 Розрахувати температурний режим за формулою (6.7).

6.3.8 Розрахувати прогнозовані значення температури ВСМ ( $TopOil$ ) та ТННТ ( $HS$ ). При цьому формули для розрахунку слід вибирати за правилом:

- якщо  $OilFC > T_{OIL1}$  (нагрівання) – то по формулам (6.8) та (6.9),

- якщо  $OilFC < T_{OIL1}$  (охолодження) – то по формулам (6.10) та (6.11).

6.3.9 Розрахувати миттєве значення вичерпаного ресурсу ізоляції за інтервал 0,1 год за формулою (6.12).

6.3.10 Змінити поточний час  $timestep = timestep + 0,1$ , та здійснити розрахунки за пп. 6.3.6 – 6.3.10. Змінювати час потрібно поки розрахункова температура найбільш нагрітої точки не стане більше заданої –  $T_{HS-MAX}$ . На кожному кроці треба фіксувати значення температури ВСМ та ТННТ, а також миттєве значення вичерпаного ресурсу ізоляції. Якщо умова виконана то треба зафіксувати  $ts1 = timestep$  та переходити до п. 6.3.11.

6.3.11 Змінити навантаження –  $LOAD = L_2/100$ .

6.3.12 Розрахувати початковий тепловий стан трансформатору за формулами:

$$T_{OIL1} = TopOil - T_{AIR},$$

$$HS_1 = HS - TopOil.$$

де  $TopOil$ ,  $HS$  – температури розраховані на останньому (перед зміною навантаження) кроці розрахунку за п.6.3.8.

6.3.13 Поточний час для розрахунку з новим навантаження встановлюється:  $timestep = 0$  год.

6.3.14 Розрахувати данні за формулами (6.3) – (6.6).

6.3.15 Розрахувати температурний режим за формулою (6.7).

6.3.16 Розрахувати прогнозовані значення температури ВСМ ( $TopOil$ ) та ТННТ ( $HS$ ). При цьому формули для розрахунку слід вибирати за правилом:

- якщо  $OilFC > T_{OIL1}$  (нагрівання) – то по формулам (6.8) та (6.9),

- якщо  $OilFC < T_{OIL1}$  (охолодження) – то по формулам (6.10) та (6.11).

6.3.17 Розрахувати миттєве значення вичерпаного ресурсу ізоляції за інтервал 0,1 год за формулою (6.12).

6.3.18 Змінити поточний час  $timestep = timestep + 0,1$ , та здійснити розрахунки за пп. 6.3.14 – 6.3.17. Змінювати час потрібно поки не виконається умова  $timestep + ts1 = 10$  год. На кожному кроці треба фіксувати значення температури ВСМ та ТННТ, а також миттєве значення вичерпаного ресурсу ізоляції. Якщо умова виконана то треба переходити до п. 4.3.19.

- 6.3.19 Розрахувати інтегральне значення вичерпаного ресурсу ізоляції за формулою (6.13).
- 6.3.20 Побудувати графік зміни ТННТ (HST) и ВСМ (VSM), приклад рис. 6.1.

Тобто, прогнозований час для розрахунку – 10 год, шаг розрахунку 0,1 год, в результаті розрахунку треба отримати 101 значень температури ВСМ, ТННТ та миттєвих значень вичерпаного ресурсу ізоляції. Далі треба поррахувати інтегральне значення вичерпаного ресурсу за 10 год роботи трансформатора в заданому режимі, а також побудувати графік зміни температур. Звіт по роботі має включати в себе кратку методику розрахунку, результати проміжних розрахунків в табличному вигляді, графік температур ВСМ та ТННТ, розраховане значення вичерпання ресурсу в наслідок теплового старіння, власні висновки про доцільність експлуатації трансформатору в заданому режимі.

#### 6.4 Приклад результатів виконання роботи

Таблиця 6.3 – Результати (в прикладі, для спрощення не наводяться результати розрахунку всіх кроків, але в звіті потрібно наводити всі)

	0	1	2
0	0	35.33	35
1	0.1	53.754	40.013
2	0.2	68.097	44.747
3	0.3	79.376	49.218
4	0.4	88.35	53.441
.....			
96	9.6	60.183	48.28
97	9.7	60.169	48.266
98	9.8	60.155	48.252
99	9.9	60.142	48.239
100	10	60.13	48.227

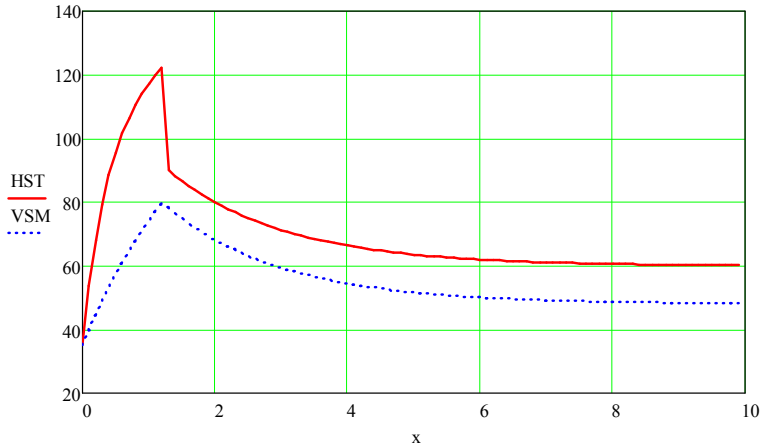


Рисунок 6.1 – Приклад графіку

Фактичний знос ресурсу за прогнозований проміжок часу (10год) – 5.73год.

**Висновки:** завданий режим навантаження не призведе до свєрхнормованного зносу ізоляції трансформатора, тому може бути використаний без обмежень та ризику для обладнання.

### 6.5 Варіанти контрольних завдань

Таблиця 6.4 – Данні для розрахунку за варіантом

Параметр \ Вар	1	2	3	4	5	6
Тип СО	М	Д	ДЦ	М	Д	ДЦ
$dT_{HS}$	45.00	45.45	45.90	46.35	46.80	47.25
$P_{XX}$	26600.00	26900.00	27200.00	27500.00	27800.00	28100.00
$P_N$	151500.0	152300.0	153100.0	153900.0	154700.0	155500.0
$H_{gr}$	10.50	10.60	10.70	10.80	10.90	11.00
$T_{OIL}$	35.00	34.00	33.00	32.00	31.00	30.00
$T_{AIR}$	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00
$T_{HS1}$	35.33	34.80	34.40	34.13	34.00	34.00
CoolCap	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00
$T_{HS-MAX}$	105.00	110.00	115.00	120.00	125.00	130.00
$L_1$	200.00	190.00	180.00	170.00	160.00	150.00
$L_2$	120.00	110.00	100.00	90.00	80.00	70.00

Таблиця 6.5 – Данні для розрахунку за варіантом

Параметр \ Вар	7	8	9	10	11	12
Тип СО	М	Д	ДЦ	М	Д	ДЦ
dT <sub>HS</sub>	47.70	48.15	48.60	49.05	49.50	49.95
P <sub>XX</sub>	28400.00	28700.00	29000.00	29300.00	29600.00	29900.00
P <sub>N</sub>	156300.00	157100.00	157900.00	158700.00	159500.00	160300.00
Hgr	11.10	11.20	11.30	11.40	11.50	11.60
T <sub>OH</sub>	29.00	28.00	27.00	26.00	25.00	24.00
T <sub>AIR</sub>	22.00	24.00	26.00	28.00	30.00	32.00
T <sub>HS1</sub>	34.13	34.40	34.80	35.33	36.00	36.80
CoolCap	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	90.00
T <sub>HS-MAX</sub>	135.00	140.00	145.00	150.00	145.00	140.00
L <sub>1</sub>	140.00	130.00	120.00	200.00	190.00	180.00
L <sub>2</sub>	60.00	50.00	40.00	120.00	110.00	100.00

Таблиця 6.6 – Данні для розрахунку за варіантом

Параметр \ Вар	13	14	15	16	17	18
Тип СО	М	Д	ДЦ	М	Д	ДЦ
dT <sub>HS</sub>	50.40	50.85	51.30	51.75	52.20	52.65
P <sub>XX</sub>	30200.00	30500.00	30800.00	30500.00	30200.00	29900.00
P <sub>N</sub>	161100.00	161900.00	162700.00	163500.00	164300.00	165100.00
Hgr	11.70	11.80	11.90	12.00	12.10	12.20
T <sub>OH</sub>	23.00	22.00	21.00	24.00	27.00	30.00
T <sub>AIR</sub>	34.00	36.00	38.00	36.00	34.00	32.00
T <sub>HS1</sub>	37.73	38.80	40.00	43.20	46.27	49.20
CoolCap	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00
T <sub>HS-MAX</sub>	135.00	130.00	125.00	120.00	115.00	110.00
L <sub>1</sub>	170.00	160.00	150.00	140.00	130.00	120.00
L <sub>2</sub>	90.00	80.00	70.00	60.00	50.00	40.00

Таблиця 6.7 – Данні для розрахунку за варіантом

Параметр \ Вар	19	20	21	22	23	24
Тип СО	М	Д	ДЦ	М	Д	ДЦ
dT <sub>HS</sub>	53.10	53.55	54.00	54.45	54.90	55.35
P <sub>XX</sub>	29600.00	29300.00	29000.00	28700.00	28400.00	28100.00
P <sub>N</sub>	165900.00	166700.00	167500.00	168300.00	169100.00	169900.00
Hgr	12.30	12.40	12.50	12.60	12.70	12.80
T <sub>OH</sub>	33.00	36.00	39.00	42.00	45.00	48.00
T <sub>AIR</sub>	30.00	28.00	26.00	24.00	22.00	20.00
T <sub>HS1</sub>	52.00	54.67	57.20	59.60	61.87	64.00
CoolCap	60.00	70.00	80.00	90.00	100.00	90.00
T <sub>HS-MAX</sub>	105.00	110.00	115.00	120.00	125.00	130.00
L <sub>1</sub>	200.00	190.00	180.00	170.00	160.00	150.00
L <sub>2</sub>	120.00	110.00	100.00	90.00	80.00	70.00

Параметр \ Вар	25	26	27	28	29	30
Тип СО	М	Д	ДЦ	М	Д	ДЦ
$dT_{HS}$	55.80	56.25	56.70	57.15	57.60	58.35
$P_{XX}$	27800.00	27500.00	27200.00	26900.00	26600.00	26300.00
$P_N$	170700.00	171500.00	172300.00	173100.00	173900.00	174700.00
$H_{gr}$	12.90	13.00	13.10	13.20	13.30	13.40
$T_{oil}$	51.00	54.00	57.00	60.00	63.00	66.00
$T_{AIR}$	18.00	16.00	14.00	12.00	10.00	8.00
$T_{HS1}$	66.00	67.87	69.60	71.20	72.67	74.00
CoolCap	80.00	70.00	60.00	50.00	60.00	70.00
$T_{HS-MAX}$	135.00	140.00	145.00	150.00	145.00	140.00
$L_1$	140.00	130.00	120.00	200.00	190.00	180.00
$L_2$	60.00	50.00	40.00	120.00	110.00	100.00

## 6.6 Завдання

6.3.1. Виконати розрахунок та оформити звіт. Звіт повинен включати приклад розрахунку однієї точки для кожного навантаження, таблицю результатів, графіки зміни температур, розрахунок вичерпання ресурсу та виводи, згідно отриманих результатів.

## 6.7. Контрольні запитання

1. Що має вплив на значення температури найбільш нагрітої точки обмотки трансформатору?
2. Чому росте температура масла при рості навантаження трансформатору?
3. Як буде розподілятися по висоті температура трансформатору?
4. Що треба робити, щоб уникнути наднормованого зносу ресурсу ізоляції?

## ПЕРЕЛІК ЕКЗАМЕНАЦІЙНИХ (ЗАЛІКОВИХ) ПИТАНЬ

1. Технічна діагностика високовольтного електрообладнання.  
Основні терміни та визначення.
2. Дефекти високовольтних трансформаторів та їх причини.
3. Дефекти високовольтного комутаційного обладнання та їх причини.
4. Дефекти в ізоляції високовольтного обладнання та їх причини.
5. Способи діагностування дефектів в ізоляції високовольтного обладнання.
6. Способи діагностування дефектів в високовольтного комутаційного обладнання.
7. Причини старіння целюлозної ізоляції.
8. Коефіцієнт полімеризації та методи його контролювання.
9. Методи діагностування паперово-масляної ізоляції.
10. Часткові розряди – причини виникнення, головні терміни.
11. Методи діагностування ізоляції за характеристиками часткових розрядів.
12. Математичні методи та засоби виявлення часткових розрядів на фоні випадкових завад.
13. Діагностування ізоляції на основі методів аналізу трансформаторного масла.
14. Ідентифікація виду дефекту в обладнанні на основі концентрацій розчинених газів в маслі. Особливості контролю концентрацій газів.
15. Діагностування маслонаповненого обладнання на основі аналізу результатів газової хроматографії за методом «Трикутника Дюваля».
16. Діагностування обладнання на основі аналізу результатів газової хроматографії за методом співвідношень Роджерса.
17. Особливості газоутворення в маслі в залежності від типів дефектів в обладнанні.
18. Діагностування стану конденсаторної ізоляції в процесі експлуатації.
19. Діагностування обладнання за показниками вологовмісту ізоляції.
20. Діагностування силового трансформаторного обладнання.

21. Діагностування трансформаторного обладнання за допомогою реєстрації температурних режимів. Засоби контролю.
22. Види та причини відмов високовольтних уводів.
23. Діагностичні критерій ізоляції високовольтних уводів.
24. Особливості діагностування стану ізоляції високовольтних уводів під робочою напругою.
25. Діагностування стану нелінійних обмежувачів перенапруг.
26. Діагностування стану елегазових розподільчих пристроїв та кабельних ліній.
27. Діагностування вимірювальних трансформаторів.
28. Діагностування пристроїв РПН.
29. Діагностування вимикачів.
30. Особливості застосування безперервного контролю стану високовольтного обладнання.
31. Засоби визначення ресурсу та залишкового ресурсу обладнання.
32. Розрахунок залишкового ресурсу електричних апаратів.
33. Прогноз показників надійності та залишкового ресурсу апаратів.

## ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИВЧЕННЯ

1. Заходи безпеки при випробуваннях і вимірюваннях.
2. Вимірювання характеристик ізоляційних конструкцій.
3. Вимірювання характеристик ізоляції під робочою напругою.
4. Вимірювання опору ізоляції.
5. Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і ємності ізоляції.
6. Заходи безпеки при випробуванні трансформаторів.
7. Методи контролю стану силових трансформаторів, автотрансформаторів, шунтуючих і дугогасильних реакторів.
8. Методи контролю стану перемикаючих пристроїв.
9. Зняття характеристик намагнічування трансформаторів струму.
10. Вимірювання струму холостого ходу трансформаторів напруги.
11. Перевірка полярності висновків, групи з'єднання обмоток трансформаторів напруги.
12. Контроль параметрів ізоляції комутаційних апаратів.
13. Перевірка мінімальної напруги спрацьовування приводів комутаційних апаратів комутаційних апаратів.
14. Контроль механічних характеристик комутаційних апаратів.
15. Контроль характеристик елегазових вимикачів.
16. Контроль характеристик вакуумних вимикачів.
17. Контроль характеристик вимикачів навантаження.
18. Контроль характеристик роз'єднувачів, короткозамикачів і відокремлювачів.
19. Контроль характеристик комплектних розподільних пристроїв.
20. Контроль характеристик елегазових комплектних розподільних пристроїв.
21. Методи контролю стану струмопроводів, збірних шин і ошиновок, опорних і підвісних ізоляторів.
22. Методи контролю стану конденсаторів.
23. Методи контролю стану вентильних розрядників, обмежувачів перенапруг, трубчастих розрядників.
24. Методи контролю якості електроізоляційних рідин.

25. Методи контролю стану стаціонарних свинцево-кислотних акумуляторних батарей.
26. Методи контролю стану заземлюючих пристроїв.
27. Методи контролю стану повітряних ліній електропередачі.
28. Контроль під напругою стану підвісних тарілчастих фарфорових ізоляторів в ізолюючих підвісках.
29. Контроль стану проводів і грозозахисних тросів.
30. Методи контролю стану введів, прохідних ізоляторів.
31. Методи контролю стану кабельних ліній.
32. Особливості випробування маслонаповнених КЛ 110-500кВ.
33. Визначення дефектних місць оболонок КЛ 110-220кВ з ізоляцією із зшитого поліетилену.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 — Офіц. вид., приказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. №13. — К. : ОЕП «ГРИФРЕ» : М-во палива та енергетики України, 2007. — 262 с. — (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
2. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330 - 750 кВ під робочою напругою: СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301-2006. — Офіц. вид. — К. : ГРИФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2006. — 31 с. — (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).
3. IEC 60599:2015: Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis (2015). International Standard.
4. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. Методичні вказівки
5. IEEE C 57.104: IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers (2009). Institute of Electrical and Electronics Engineers, United States of America.
6. Case Histories for Mitigating Transformer Bushing Risk (2022). Zimmar Holdings Ltd./INMR (Available at: <https://www.inmr.com/case-histories-for-mitigating-transformer-bushing-risk/>)
7. Test Requirements for HV Bushings (2025). Zimmar Holdings Ltd./INMR Available at: <https://www.inmr.com/test-requirements-hv-bushings/>
8. IEEE C57.19.100-2012 (2012) IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. ISBN 978-0-7381-8133-2, 30p. <https://standards.ieee.org/ieee/C57.19.100/3946/>
9. Правила улаштування електроустановок (2017). Затверджено Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України № 476. 21.07.2017.
10. ДСТУ EN 60270:2016 Методи високовольтних випробувань. Вимірювання часткових розрядів (EN 60270:2001, IDT). Наказ від 22.08.2016 № 244
11. Сахно, О. А., Скрупська, Л. С., Одіяка, К. В., Василевський, В. В., & Шилюк, С. І. (2025). Діагностика технічного стану

високовольтного обладнання під робочою напругою. Technology Audit and Production Reserves, 2(82). <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325777>

12. Bureau of Reclamation D-8450. FIST 3-31, Transformer Diagnostics. Hydroelectric Research and Technical Services Group. Facilities, Instructions, Standards and Techniques. Volume 3-31. Denver, USA, 2003, 63p.

13. Bureau of Reclamation D-8450. FIST 3-30, Transformer Maintenance. Hydroelectric Research and Technical Services Group. Facilities, Instructions, Standards and Techniques. Volume 3-30. Denver, USA, 2003, 81p