



Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій

Кафедра електропостачання та енергетичного  
менеджменту

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
Визначення електричної міцності трансформаторної оливи  
(масла)  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
денної форми навчання зі спеціальності  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Харків  
2023**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**  
**Кафедра електропостачання та енергетичного  
менеджменту**

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
Визначення електричної міцності трансформаторної оливи (масла)  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної  
форми навчання зі спеціальності  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Затверджено рішенням  
науково-методичної ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та комп'ютерних  
технологій  
Протокол № 3  
від 22 лютого 2023 року

Харків  
2023

УДК 620.311

Схвалено на засіданні кафедри  
електропостачання та енергетичного менеджменту  
Протокол №7 від 8.02.2023 р.

**Рецензенти:**

**С. О. Тимчук**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ.

**Ю. М. Хандола**, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

Електротехнічні матеріали: Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Визначення електричної міцності трансформаторної оливи (масла)» студентами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навч., спец.: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Державний біотехнологічний університет; упоряд.: В. Г. Пазій – Харків: 2023. – 16 с.

Методичні вказівки включають відомості про рідкі діелектрики, їхні властивості та застосування в техніці. Наведено методику визначення електричної міцності трансформаторної оливи, заходи безпеки при виконанні роботи, формули для розрахунку та вимоги для оформлення звіту. Виконання лабораторної роботи допоможе майбутнім фахівцям використовувати отримані знання на практиці.

Видання призначене для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**УДК 620.311**

Відповідальний за випуск: **В. Г. Пазій**

© Пазій В.Г. 2023.

© ДБТУ, 2023

## МЕТА РОБОТИ

Вивчення механізму електричного пробую трансформаторної оливи (масла) та визначення її електричної міцності.

## ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчити загальні відомості про трансформаторні оливи і механізм їх пробую.
2. Ознайомитись із випробувальною установкою, заходами техніки безпеки.
3. Записати в звіт паспортні дані приладів та апаратів.
4. Визначити електричну міцність трансформаторної оливи.
5. Зробити висновок по роботі та оформити звіт.

## ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

### I. Загальні відомості про трансформаторні масла

За призначенням нафтові оливи (масла) діляться на дві групи:

- оливи для силових трансформаторів і високовольних вимикачів;
- кабельні і конденсаторні оливи, які використовуються відповідно для просочення паперової ізоляції та високовольних кабелів і конденсаторів.

Нафтові оливи (трансформаторні оливи) у високовольних трансформаторах використовуються як основний електроізоляційний матеріал обмоток.

Внаслідок просочення оливою паперово-бавовняної ізоляції витісняється повітря, що заповнює проміжки між волокнами. Електрична міцність оливи значно вища, ніж повітря, що дає змогу підвищити робочу напругу трансформатора при тих же габаритних розмірах без виникнення небезпеки пробую. Також олива служить теплопровідним середовищем для охолодження обмоток і осердя завдяки високій рухливості його молекул (особливо при температурах понад 70–80°C).

Трансформаторна олива (масло) у високовольних вимикачах, окрім функції ізолювання струмопровідних частин від стінок бака, також виконує функцію гасіння електричної дуги, що виникає між контактами вимикача під час їх розриву в номінальних і аварійних режимах.

Оливи, що знаходяться в енергосистемах можна поділити на такі групи:

1. *Свіжа сира* олива (масло) – товарне масло, яке надійшло з заводу, відповідає за якістю нормам ДСТУ чи ТУ і не перебувало в експлуатації.

2. *Регенована* олива – олива, властивості якої відновлені шляхом одного з методів регенерації.

3. *Чиста суха* олива – олива, що підготовлена для заливання у високовольтну апаратуру шляхом осушки в спеціальних апаратах. Сюди належить олива, яка не була в експлуатації, чи олива, яка була в експлуатації, але відновлена хімічно.

4. *Експлуатаційна* – олива, що залита в апаратуру та знаходиться в експлуатації, показники якості якої відповідають встановленим нормам на оливу, що перебуває в експлуатації.

5. *Відпрацьована* – олива, що підлягає зливанню або злита з обладнання внаслідок невідповідності нормам на якість за одним чи кількома показниками. Така олива підлягає відновленню.

Колір свіжого масла, як правило, світло-жовтий. Під час експлуатації воно темніє і набуває відтінків аж до темно-коричневого. Якщо свіже масло (олива) має темний колір, то це вказує на недостатнє його очищення або забруднення при транспортуванні.

Швидко і сильне потемніння масла під час експлуатації спричинюється його перегріванням. Колір для свіжих масел нормується, а для масла, що знаходиться в експлуатації за діючими інструкціями не нормується.

Практично всі важливі властивості трансформаторної оливи нормуються стандартом.

*Об'ємна маса* нафтової оливи – це відношення його маси при температурі 20 °С до маси води того ж об'єму при температурі 4 °С. Об'ємна маса має значення 0,866-0,895 при температурі 20 °С. (Густина трансформаторної оливи 895 кг/м<sup>3</sup>).

*В'язкість* є однією з найважливіших властивостей трансформаторної оливи. Краще відведення теплоти від обмоток і осердя трансформатора здійснюється тими оливами, у яких кінематична в'язкість при температурі 20 °С складає 17-18,5 мм<sup>2</sup>/с і 6,5-6,7 мм<sup>2</sup>/с при температурі 50 °С. У масляних вимикачах мала в'язкість масла покращує охолодження і гасіння дуги та чинить менший опір руху механізму вимикача.

*Кислотність* масла визначають величиною кислотного числа. *Кислотне число* – кількість їдкого калію (КОН) у міліграмах, яка

необхідна для нейтралізації вільних кислот, що містяться в 1 г трансформаторного масла. Вільні кислоти руйнують ізоляційні матеріали органічного походження. Тому нормами встановлюють наступні допустимі значення кислотного числа: 0,03-0,1 г КОН/кг. Для свіжого масла воно не більше 0,05 г КОН/кг. Кислотність експлуатаційного масла не нормується.

*Температура спалаху пари* для свіжого сухого масла повинна бути не нижче 140 °С, а для експлуатаційного – не більше як на 5 °С нижче початкової.

*Температура загусання* – максимальна температура, при якій масло загусає настільки, що при нахилі пробірки з охолодженим маслом під кутом 45° його рівень залишається незмінним протягом 1 хв. Температура загусання нормується як для свіжого, так і для масла, яке експлуатується в масляних вимикачах.

*Механічні домішки* – це всі речовини, які знаходяться в маслі у вигляді осаду або в завислому стані. Це механічні домішки і забруднення, які потрапили в масло в результаті розчинення фарб, лаків, бакелітової та бавовняної ізоляції; вугілля, що утворилося в результаті горіння електричної дуги (міжвиткових замикань, часткових розрядів), осад в маслі – шлам від його старіння.

*Діелектрична проникність* свіжого сухого трансформаторного масла (дуже слабкого полярного діелектрика) становить 2,2 – 2,3. Із збільшенням температури ця величина зменшується мало. В процесі окислення діелектрична проникність може дещо збільшитися.

*Питомий об'ємний опір* для будь-якого трансформаторного масла залежить від кількості виділення струмопровідних домішок і знаходиться в межах  $10^{12} - 10^{14}$  Ом·м. Питомий опір якісного масла становить величину  $\rho_v > 2 \cdot 10^{13}$  Ом·м, придатного для експлуатації  $\rho_v \geq 2 \cdot 10^{12}$  Ом·м, а непридатного  $\rho_v < 2 \cdot 10^{12}$  Ом·м.

Тангенс кута діелектричних втрат при температурах 20 °С повинен становити не більше 0,7 % (0,007), при 70°С – не більше 2,5% (0,025). Добре масло і після тривалої експлуатації має  $tg \delta$  близько 0,2 – 0,3 % (0,002 - 0,003).

*Електрична міцність* – важлива характеристика оливи. Свіжу і чисту суху оливу перед заливанням її в трансформатори піддають випробуванню. Згідно правил технічної експлуатації електроустановок (ПТЕ) передбачаються норми електричної міцності трансформаторної оливи в залежності від величини робочої напруги (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Норми електричної міцності трансформаторної оливи

| Для апарата з робочою напругою, кВ | Електрична міцність $E_{np}$ ( $U_{np}/2,5$ ), кВ/мм |                                    |
|------------------------------------|--|------------------------------------|
|                                    | Суха олива   | Олива, що перебуває в експлуатації |
| $\leq 6$                           | 25   | 20                                 |
| 35                                 | 30   | 25                                 |
| 110 і 220                          | 35   | 35                                 |
| $> 330$                            | 45   | 45                                 |

Згідно цих вимог, пробій порції оливи, проводиться між двома зануреними на глибину  $h \geq 15$  мм металевими дисковими електродами діаметром 25 мм із закругленими краями при відстані між ними 2,5 мм (рис. 2.1).

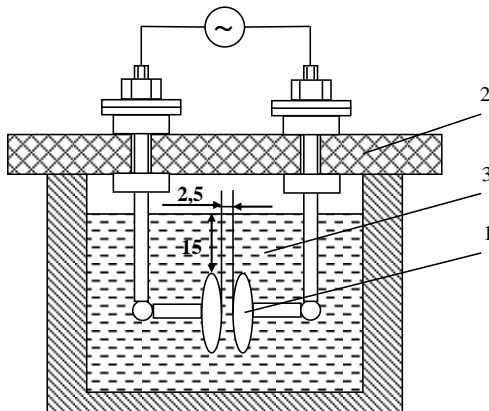


Рисунок 2.1 – Стандартний резервуар з електродами для випробування трансформаторної оливи на пробій

1 – дискові металеві електроди; 2 – кришка;  
3 – порція досліджуваної оливи.

## II. Механізм пробою трансформаторної оливи (масла)

Явище пробою рідких діелектриків зумовлене виникненням іонізаційних і теплових процесів під дією електричного поля. Електрична міцність рідких діелектриків залежить від їх чистоти. В свіжих і чистих маслах процес електричного пробою починається з виходу (інжекції) електронів в масло з катода і утворення електронних

лавин. По мірі розростання лавин, виникають стримероподібні утворення, які внаслідок процесів ортоіонізації переміщуються від позитивного (анода) до негативного (катода) зі швидкістю  $10^5$  м/с. Пробій завершується, коли плазмовий канал замикає електроди. Плазмовий канал утворюється в насиченому електронами просторі, який заповнений позитивними зарядами (іонами).

Густина масла вища, ніж газів, тому довжина вільного пробігу  $\lambda$  електронів, що має місце в газах, у рідинах дуже незначна. А отже, енергія електрона  $W = q\lambda$  ( $q$  – заряд електрона), яка необхідна для іонізації, може бути досягнута при напруженостях поля  $E$  в 100 раз вищих, ніж у газах.

В оливi (маслі), що містить гази, пробій починається з іонізації газових включень. Ці газові включення, що спочатку мають сферичну форму, в електричному полі деформуються. При деформації вони перетворюються в еліпсоїди, видовжуються і зливаються, утворюючи суцільний газовий канал між електродами, по якому проходить розряд газу. Також внаслідок іонізації, температура газових включень зростає, що призводить до закипання мікрооб'ємів масла, які дотикаються до газових включень.

Причиною пробою може стати шар газу товщиною  $10^{-6}$  м на електродах, що важко видаляється. Гази мають малий коефіцієнт теплопровідності, а значить, шар газу на електродах утворює ділянку з великим тепловим опором. Внаслідок такого явища, температура поблизу межі розподілу рідина – газ підвищується, що призводить до закипання масла та його пробою.

Вода, яка попадає в масло, може розчинятись у великій кількості (молекулярна вода). Зі зниженням температури ця розчинена вода переходить в маленькі краплинки (емульсійну воду), які поширюються по всьому об'ємі масла. Емульсійна вода суттєво знижує електричну міцність  $E_{np}$  (рис. 2.2).



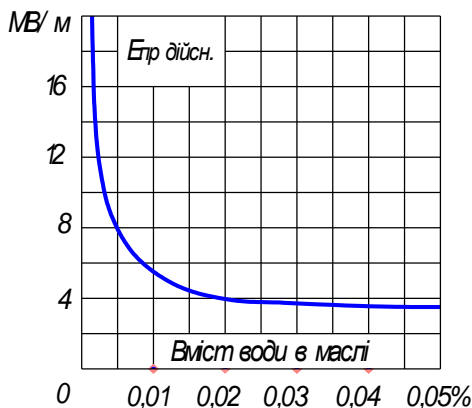


Рисунок 2.2 – Залежність електричної міцності оливи від вмісту води

Це зниження пояснюється тим, що відносна діелектрична проникність води значно вище, ніж оливи ( $\epsilon_r$  води  $\approx 80$ ,  $\epsilon_r$  чистого масла  $\approx 2,2$ ), а питомий опір води значно менший, ніж у оливи ( $\rho$  води =  $10^3 \dots 10^4$  Ом·м,  $\rho$  масла =  $10^{12} \dots 10^{14}$  Ом·м).

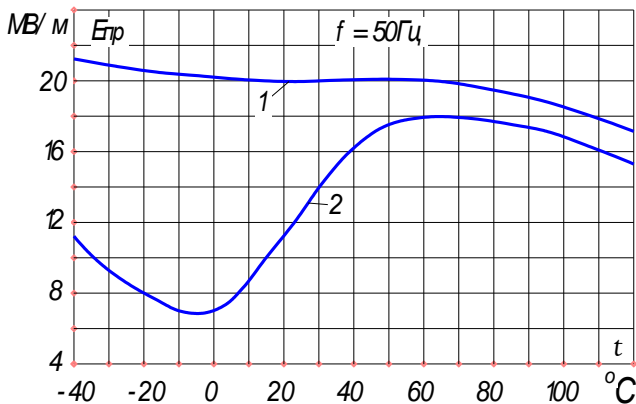


Рисунок 2.3 – Залежність електричної міцності оливи від температури  
1 – підсушена олива; 2 – олива, що містить сліди води.

Під дією сил електричного поля краплинки емульсійної води втягуються в місце, де напруженість поля особливо велика, і поляризуються, набуваючи форми еліпсоїдів та, притягуючись між собою різнойменними за знаком зарядами (кінцями), і створюють між

електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких і відбувається електричний пробій.

З підвищенням температури міцність масла зростає (рис. 2.3) завдяки переходу води із стану емульсії в стан молекулярного розчину. Збільшення електричної міцності при низьких температурах пов'язане з підвищенням в'язкості оливи і зменшенням значення діелектричної проникності  $\epsilon_r$  льоду до 10 ... 20 одиниць.

### III. Принцип роботи апарату для випробування масла АИИ-70

Електрична міцність трансформаторного масла в лабораторії визначається за допомогою випробувального апарату АИИ-70. Принципова електрична схема випробувального апарату АИИ-70 показана на рис. 2.4. Апарат має високовольтний трансформатор  $TV$  з номінальною напругою вторинної обмотки 70 кВ, коефіцієнт трансформації якого складає  $k = 320$ . Проба масла заливається у фарфоровий резервуар з латунними електродами  $F$ , які виконані у вигляді напівсфер радіусом 25 мм. Відстань між електродами складає 2,5 мм. Електроди повинні бути заглиблені в масло не менше, ніж на 15 мм. Опір  $R$  захищає трансформатор від перенавантаження в момент пробою масла. Конденсатори  $C1$  і  $C2$  призначені для захисту від перенапруг первинної обмотки трансформатора  $TV$ .

Живлення апарату АИИ-70 відбувається від мережі змінного струму напругою 220 В. Для захисту апарату від коротких замикань в ньому встановлені запобіжники  $FU1$  та  $FU2$ .

Увімкнення апарату проводиться шляхом натиснення кнопки  $SB1$  "Пуск". Струм проходить по колу: мережа, запобіжник  $FU2$ , натиснена кнопка  $SB1$  "Пуск", кнопка  $SB2$  "Стоп", котушка електромагнітного пускача  $KM1$ , запобіжник  $FU1$ , мережа.

В результаті цього котушка пускача  $KM1$  отримує живлення і замикає свої контакти:

– блокувальний контакт  $KM1.1$ , за допомогою якого блокується відключення  $KM1$  після відпускання кнопки  $SB1$  "Пуск";

– силові контакти  $KM1.2$ .

Через замкнуті контакти  $KM1.2$  до мережі приєднується автотрансформатор  $T$ , який призначений для регулювання напруги на первинній обмотці трансформатора напруги  $TV$ . Автотрансформатор також оснащений допоміжною обмоткою для живлення сигнальних ламп  $HL1$  і  $HL2$ , які сигналізують про режими роботи установки.

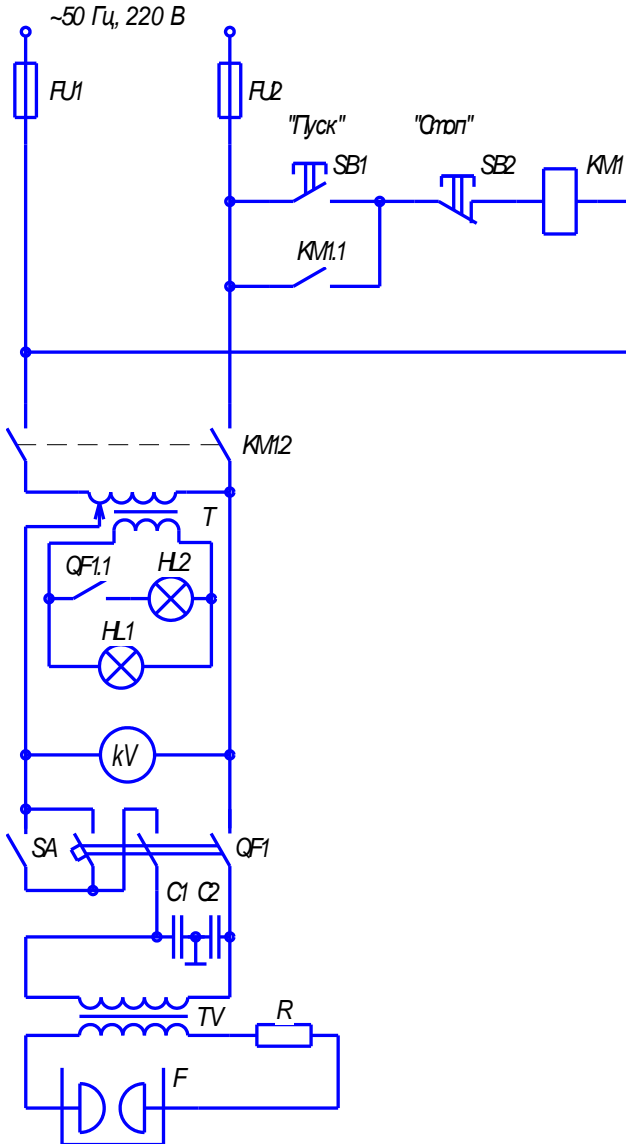


Рисунок 2.4 – Принципова електрична схема установки для випробування трансформаторного масла АИИ-70

На виході автотрансформатора  $T$  встановлений вольтметр  $PV$ , відградуєований у кіловольтах ефектвної напруги на високовольтній

обмотці силового трансформатора  $TV$ . Останній вмикається і захищається від струмів короткого замикання та тривалого перевантаження автоматичним вимикачем  $QF1$ , один з розчіплювачів якого шунтується вимикачем  $SA$  для забезпечення більш “трубного” захисту.

Після подачі струму на автотрансформатор  $T$  загорається сигнальна лампа  $HL1$ , а після вмикання автоматичного вимикача  $QF1$  замикається його контакт  $QF1.1$ . і загорається сигнальна лампа  $HL2$ , яка сигналізує, що подано струм на трансформатор  $TV$ .

Трансформатор  $TV$  збільшує напругу в кількість разів, рівну коефіцієнту трансформації  $k$ , і подає її на латунні електроди, що розташовані в фарфоровому резервуарі, заповненому досліджуваним маслом.

За допомогою автотрансформатора  $T$  напругу збільшують до моменту пробою, при цьому її величина фіксується вольтметром  $PV$ . В момент пробою виникає електрична дуга, яка характеризується великим значенням електричного струму і спричиняє спрацювання автоматичного вимикача  $QF1$ , який при цьому від’єднує від мережі силовий трансформатор  $TV$ .

Для запланованого вмикання випробувального апарата АИИ-70 від мережі необхідно натиснути кнопку  $SB2$  “Стоп”. При цьому розмикається коло керування і припиняється живлення котушки магнітного пускача  $KM1$ , внаслідок чого розмикаються його контакти  $KM1.1$  і  $KM1.2$ , які розблоковують кнопку  $SB1$  “Пуск” і відключають від мережі силове коло.

## ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Встановити рукоятку автотрансформатора  $T$  (рис. 2.4) проти годинникової стрілки до упору, що відповідає нульовому значенню напруги на виході трансформатора  $TV$ . При цьому перемикач  $SA$  “ЗАЩИТА” повинен знаходитись у положенні “Чувствительная”.

2. З дозволу викладача натиснути кнопку  $SB1$  «Пуск», при цьому вмикається пускач  $KM1$  і напруга подається на автотрансформатор  $T$ , про що свідчить загорання лампи  $HL1$ .

3. Ввімкнути автоматичний вимикач  $QF1$ , який подає напругу на підвищуючий трансформатор  $TV$ . В результаті загориться лампа  $HL2$ .

4. Плавно підвищувати напругу від нуля до пробою масла зі швидкістю не більше, ніж 1 кВ/с. Під час пробою між електродами утворюється дуга у вигляді суцільного яскравого свічення і автоматичний вимикач  $QF1$  вимикає установку.

5. Записати у таблицю (табл. 2.2) ефективне значення напруги на електродах  $U$  під час пробою за показами вольтметра.

Таблиця 2.2 – Результати випробувань трансформаторного масла

| №                                    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Середнє значення |
|--------------------------------------|---|---|---|---|---|------------------|
| Покази вольтметра $U$ , кВ           |   |   |   |   |   |                  |
| Електрична міцність $E_{np}$ , кВ/мм |   |   |   |   |   |                  |

6. Встановити рукоятку автотрансформатора  $T$  проти годинникової стрілки до упору і кнопкою  $SB2$  вимкнути установку.

7. Через 5 хвилин провести повторне випробування трансформаторного масла за методикою, описаною у пунктах 1...6. Для однієї проби масла проводиться 5 пробів з інтервалом 5 хв.

8. За отриманими даними розрахувати значення напруги пробою та електричної міцності трансформаторного масла.

Напруга пробою  $U_{np}$  визначається за формулою:

$$U_{np} = \sqrt{2} U, \text{ кВ,}$$

де  $U$  – ефективне значення напруги на високовольтній обмотці

трансформатора  $TU$  за кіловольтметром, кВ.

Електрична міцність масла визначається за формулою:

$$E_{np} = U_{np}/d, \text{ кВ/мм,}$$

де  $d = 2,5\text{мм}$  – відстань між електродами, мм.

За значення середньої електричної міцності трансформаторного масла приймається середнє арифметичне 5-ти результатів.

9. За результатами випробувань оформити звіт.

10. Дати відповідь на контрольні питання.

## ПЛАН СКЛАДАННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи виконується на аркушах формату А4 з одного боку і повинен містити такі дані:

1. Титульний лист встановленого зразка з темою роботи і прізвищами виконавців.

2. Мета та програма роботи.

3. Технічні дані установки АИИ-70, що використовуються в роботі.

4. Принципова електрична схема установки для пробою масла (АИИ-70). Схема викреслюється обов'язково вручну (ксерокопія не допускається) з дотриманням розмірів і стандартів умовних позначень елементів.

5. Таблиця з внесеними виміряними даними та даними розрахунків.

6. Формули для розрахунків з поясненнями.

7. Висновки по роботі.

У висновках потрібно навести знайдене середнє значення електричної міцності трансформаторного масла  $E_{np}$ , порівняти його з з даними наведеними в табл. 2.1 та відповідними значеннями для повітря та твердих діелектриків, отриманих на інших лабораторних роботах чи взятих з літературних джерел.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке трансформаторна олива та для чого вона призначена?
2. Яка різниця між пробивною напругою і електричною міцністю?
3. На які групи поділяється трансформаторна олива (масло)?
4. Основні характеристики трансформаторної оливи.
6. Кислотність оливи. Що таке кислотне число?
7. Що характеризують тангенс кута діелектричних втрат та електрична міцність оливи.
8. Вплив вологи на електричну міцність оливи.
9. Процес пробою трансформаторної оливи.
10. Які фактори впливають на електропровідність оливи?
11. Розкрити вплив температури на електричну міцність чистого і зволоженого масла.
12. Розповісти принцип роботи апарату для випробування масла АИИ-70.

Навчальне видання

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи  
**Визначення електричної міцності трансформаторної оливи  
(масла)**

Автор - укладач:

**ПАЗІЙ** Володимир Григорович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44