

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя

Кафедра
електричної інженерії

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з курсу

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА
КОНСТРУКЦІЙНІ
МАТЕРІАЛИ**

для студентів напряму підготовки
141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Тернопіль 2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра
електричної інженерії

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з курсу**

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

*для студентів напряму підготовки
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Тернопіль 2023

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу Електротехнічні та конструкційні матеріали для студентів напряму підготовки 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Укл. : Андрійчук В. А., М. С. Наконечний. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. – 38 с.

Методичні вказівки розроблені з метою ознайомити студентів з методиками досліджень параметрів електротехнічних матеріалів, набути практичних навиків експериментальної роботи, які стануть корисними для їх майбутнього фахового становлення.

Укладачі: д.т.н., проф. Андрійчук В. А., к.т.н., Наконечний М. С.

Рецензент: д.т.н., проф. Тарасенко М. Г.

Розглянуто й схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії.
Протокол № 1 від 25 серпня 2023 року.

Розглянуто й рекомендовано до друку на засіданні науково-методичної комісії факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 1 від 30 серпня 2023 року

© Комп'ютерна верстка та відповідальний за випуск: Наконечний М. С. 2023 рік

Лабораторна робота № 1

Визначення електричної міцності рідких діелектриків

Мета роботи: Ознайомитися з методом дослідження електричної міцності рідких діелектриків. Визначити придатність досліджуваної рідини для застосування у високовольтних апаратах методом порівняння дослідних даних з характеристиками, наведеними в держстандарті.

1. Загальна частина

Однією з найбільш важливих електричних характеристик рідких діелектриків є їх **електрична міцність**, за яку приймають мінімальну напруженість однорідного електричного поля, що призводить до пробою. Для обчислення електричної міцності необхідно попередньо виміряти пробивну напругу $U_{пр}$. Якщо $U_{пр}$ подано у вольтах, а товщина діелектрика в зоні пробою – в метрах, то електрична міцність $E_{пр}$ буде вимірюватися у вольтах на метр (В/м).

Пробивна напруга $U_{пр}$ пропорційна напруженості поля тільки в умовах однорідного електричного поля. Таке поле створюється між двома електродами, що мають форму тіла обертання певного виду: поверхня цих електродів описується рівняннями Роговського.

При використанні плоских електродів однорідне поле утворюється тільки в середній частині електродів, біля їх країв електричне поле спотворюється.

Для сферичних електродів поле буде мати незначну неоднорідність. В неоднорідному полі пробивна напруга $U_{пр}$ завжди менша, ніж в однорідному, при всіх інших однакових умовах досліду. При обчисленні електричної міцності в умовах пробою в неоднорідному полі вводять коефіцієнт $\alpha > 1$, а електричну міцність обчислюють за формулою

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h} \cdot \alpha.$$

Значення коефіцієнта α змінюється в залежності від форми електродів, їх розмірів і віддалі між ними. Наприклад, для сферичних електродів з радіусом півсфери $R = 25 \cdot 10^{-3}$ м і $h = 2.5 \cdot 10^{-3}$ м — $\alpha = 1.025$.

Величина пробивної напруги залежить від умов підвищення напруги на зразку, який досліджується. Зміна напруги може бути поступовою і поетапною. У першому випадку напруга повинна підвищуватися від нуля рівномірно таким чином, щоб пробій відбувся в діапазоні 10...20 с після початку збільшення напруги. Швидкість підвищення напруги вказується в стандартах на матеріал.

При поетапному підйомі на кожному рівні напругу витримують протягом 1 хв. Напругу на першому етапі підвищують поступово до величини $0.5 U_{пр}$, яка була виміряна при поступовому підвищенні (1-й випадок). Напругу при переході на кожен наступний рівень необхідно підвищувати на величину, що становить 0.1 напруги на першому рівні. Отже на другому етапі напруга повинна бути збільшена до $0.55 U_{пр}$, а на третьому – до $0.6 U_{пр}$ и т.д. Перехід від попереднього рівня до наступного не повинен займати більше 10 с. Якщо пробій відбувся під час переходу з одного рівня на другий, за пробивну приймають напругу попереднього рівня, більш низького. Метод підвищення напруги (поступовий чи поетапний) вказується в стандарті або в технічних умовах для даного матеріалу.

Величина пробивної напруги залежить не тільки від форми і розмірів електродів, віддалі між ними, але і від характеру прикладеної напруги. В даний час матеріали і вироби досліджують при постійній, змінній і при імпульсній напругах. Пульсації напруги при вимірюваннях електричної міцності при постійному струмі не повинні бути більшими, ніж 5% від величини амплітуди. При вимірюванні $U_{пр}$ при змінному струмі використовується струм промислової частоти (50 Гц) або підвищеної частоти. При цьому за пробивну напругу беруть діюче значення.

Похибка при вимірюванні пробивної напруги за цими методами не повинна перевищувати 4%.

Визначення електричної міцності $E_{пр}$ при змінному (50 Гц) і постійному струмах для рідких діелектриків виконується за ГОСТ 6581-75.

Чисті рідкі діелектрики характеризуються більш високою електричною міцністю, ніж гази в нормальних умовах, але отримати їх надзвичайно важко. Наявність домішок якраз визначає напругу пробою в рідких діелектриках. Постійними домішками в рідких діелектриках є вода, гази і тверді часточки.

Для рідин, максимально очищених від домішок, справджується теорія електричного пробою. При високих значеннях напруженості електричного поля може відбуватися виривання електронів з металевих електродів і руйнування молекул самої рідини за рахунок ударів зарядженими частинками. Підвищена електрична міцність рідкого діелектрика в порівнянні з газоподібним пояснюється меншою довжиною вільного пробігу електронів.

Пробій рідкого діелектрика, що містить газові включення, пояснюють локальним прогрівом рідини за рахунок енергії, яка виділяється у бульбашках газу, що легко іонізується. Це призводить до утворення газового каналу між електродами.

Вода, що потрапила в масло, може в ньому розчинитися у великій кількості (молекулярна вода). При пониженні температури ця розчинена вода конденсується, утворюючи мікроскопічні краплі (емульсійна вода), які поширюються по всьому об'ємі масла. Молекулярна вода здійснює незначний вплив на величину електричної міцності. Емульсійна вода дуже понижує $E_{пр}$. Під впливом електричного поля сферичні капельки води – сильно дипольної рідини – поляризуються, набувають еліпсоїдної форми і, притягуючись між собою різно-йменними кінцями, створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю. По них і відбувається електричний пробій.

Домішки твердих часточок, таких як сажа і частинки волокон, спотворюють електричне поле всередині рідини, що також призводить до пониження електричної міцності рідких діелектриків.

2. Прилади і обладнання

Для дослідження електроізоляційних рідин на електричну міцність застосовуються апарати АМИ-60 і АИМ-80.

Для даної лабораторної роботи використовується установка АИМ-80.

Установка АИМ-80 призначена для дослідження ізоляційного масла і інших рідких діелектриків на електричну міцність підвищеною напругою змінного струму, частотою 50 Гц, в умовах лабораторії, цеху і будівельного майданчика при температурі оточуючого повітря від $+5^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості до 80%.

Конструкція апарату виконана у вигляді пульта переносного типу і містить наступні елементи:

- бак з високовольтним трансформатором;
- головний трансформатор (ТГ);
- регулятор напруги (варіатор) з електроприводом щітки (ВГ);
- ванна для дослідження (банка з електродами) (БЕ);
- вимірний прилад kV;
- сигнальні лампи, магнітний пускач, реле максимального струму РМ.

На передній панелі апарату (рис.1) розміщені: вимірний прилад, лампочки світлової сигналізації (зелена – вмикання мережі (\sim), жовта – готовність схеми апарату до включення ($\rightarrow 0$), червона – ввімкнена висока напруга (\downarrow)) і наступні елементи керування:

а) вимикач мережі (BC) 8 з спеціальним ключем, який запобігає довільному включенню апарату (\sim);

б) кнопка ввімкнення (KB) 2 напруги пробою (\downarrow);

- в) кнопка ввімкнення електродвигуна (КД) 6, (двигун вмикають після пробою досліджуваного діелектрика і він повертає щітки регулятора напруги в нульове положення) ($\rightarrow 0$);
- г) тумблер-вимикач (ТВ1) 4 для зупинки електродвигуна (\triangle);
- д) тумблер-вимикач (ТВ2) 9 автоматичного повернення щітки регулятора напруги ВГ в нульове положення після пробою діелектрика ($\rightarrow 0$).

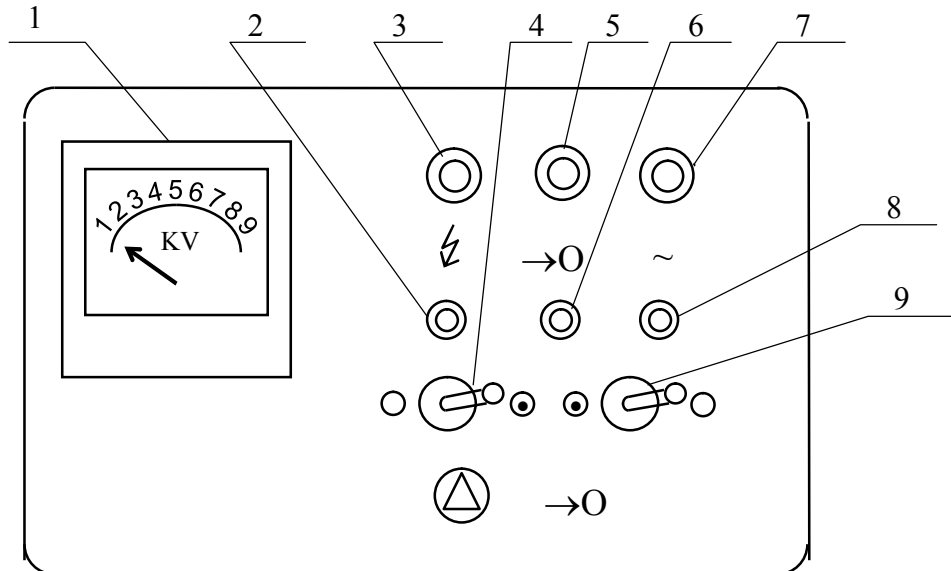


Рисунок 1.1 – Передня панель апарата АИМ-80:

1 – вимірний прилад kV; 2 – кнопка ввімкнення (КВ); 3 – червона лампа (ЛС2); 4 – тумблер-вимикач (ТВ1); 5 – жовта лампа (ЛС3); 6 – кнопка вимикання реверсивного двигуна (КД); 7 – зелена лампа (ЛС1); 8 – вимикач мережі (ВС); 9 – тумблер-вимикач (ТВ2).

Електрична схема

Робота і взаємодія елементів схеми апарата здійснюється наступним чином (рис.1.2):

Електроживлення підводиться до апарата від однофазної мережі 220 В за допомогою гнучкого кабеля з штепсельним роз'ємом на клеми вимикача мережі ВС. Через запобіжники Пр подається на конденсатор С, сигнальний трансформатор ТС, головний варіатор ВГ (регулятор напруги), оперативні кола управління головним контактором КГ, проміжні реле РП1 і РП2.

При умові, що щітка варіатора знаходиться в нульовому положенні (контакти БВ1 кола котушки контактора КГ замкнуті), дверцята, через які можливий доступ до досліджувальної ванни, зачинені (контакти блокування дверцят ДБ1, ДБ2 замкнені) і тумблер-вимикач ТВ1 знаходиться в положенні "Ввімкнено" (\odot), то при натисненні на кнопку КВ спрацьовує контактор КГ, проміжне реле РП2 і електродвигун ЕД починає пересувати щітку варіатора ВГ. При цьому на виводах вторинної обмотки трансформатора ТГ і на електродах ванни БЕ з досліджуваним рідким діелектриком починає рівномірно підвищуватися напруга. Величина напруги контролюється приладом kV, який під'єднаний до первинної обмотки трансформатора ТГ і відградуваний для діючого значення напруги на вторинній обмотці.

Під час пробою спрацьовує реле максимального струму РМ, контактор КГ знімає напругу з трансформатора і відключає електродвигун. При цьому стрілка вимірювального приладу kV фіксується.

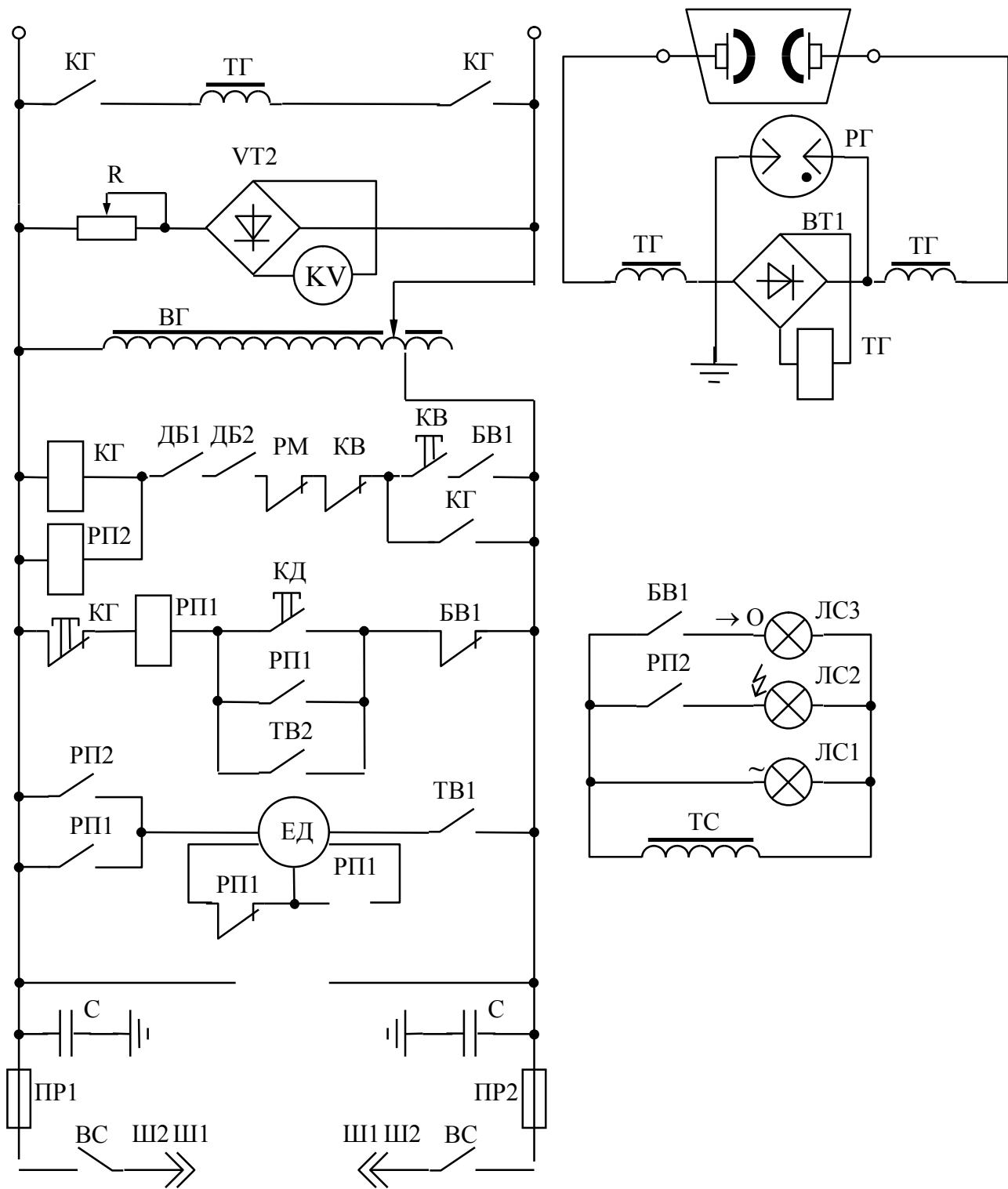


Рисунок 1.2 – Принципова електрична схема апарата АИМ-80

Для повернення щітки варіатора і стрілки вимірювального приладу в нульове положення (у випадку розімкнутих контактів тумблера ТВ2) необхідно натиснути кнопку (КД) 6, після чого відбудеться рух електродвигуна в зворотньому напрямку.

При поверненні щітки варіатора і стрілки приладу в нульове положення спрацює блокування варіатора БВ1, відключиться електродвигун і загориться сигнальна лампа ЛС3 (жовта), яка вкаже на готовність схеми апарата до повторного ввімкнення високої напруги.

Якщо тумблер ТВ2 поставити в положення замкнутих контактів, то після пробою діелектрика повернення щітки варіатора і стрілки вимірювального приладу в нульове положення відбудеться автоматично.

Блокування варіатора БВ2 відключає трансформатор при підвищенні на ньому напруги вище номінального значення, з врахуванням мінус 15% від номінального значення мережі 220 В.

Сигнальна лампа ЛС1 (зелена) вказує на ввімкнену напругу мережі, лампа ЛС2 (червона) – на ввімкнену високу напругу.

За допомогою тумблера ТВ1 можна, в певний момент, перервати підвищення напруги і витримати деякий час діелектрик під незмінною високою напругою. Для перевірки правильної роботи схеми апарата, необхідно відімкнути на високовольтному трансформаторі кінці провідників, через які живиться первинна обмотка трансформатора (клеми Г1 і Г2).

Порядок виконання роботи

При дослідженні рідких діелектриків на апараті АИМ-80 необхідно виконувати наступні правила:

1. Надійно заземлити апарат гнучким мідним провідником, що додається до нього;
2. Під'єднати апарат до мережі 220 В за допомогою гнучкого кабеля;
3. Відкрити верхні дверцята апарата, встановити досліджувальну ванну з рідким діелектриком і зачинити дверцята;
4. Поставити тумблер-вимикач (ТВ1) 4 (⊕) в замкнуте положення (⊙);
5. Тумблер-вимикач (ТВ2) 9 (→ 0) за бажанням оператора може знаходитись в будь-якому з двох положень. Якщо ТВ2 поставити в положення замкнутих його контактів (⊙), то після пробою діелектрика повернення щітки варіатора ВГ і стрілки вимірювального приладу в нульове положення буде відбуватися автоматично;
6. Спеціальним ключем ввімкнути вимикач мережі (BC) 8 (~), при цьому має загорітися зелена лампа;
7. Після ввімкнення необхідно, щоб стрілка вимірювального приладу була в нульовому положенні і горіла жовта сигнальна лампа.
При цьому можливі наступні випадки:
 - а) стрілка вимірювального приладу знаходиться на нулю і горить жовтий сигнал;
 - б) стрілка вимірювального приладу рухається до нуля (тумблер-вимикач (ТВ2) встановлений в замкнуте положення (⊙));
 - в) стрілка вимірювального приладу стоїть не на нулю (тумблер-вимикач (ТВ2) встановлений в розімкнуте положення (⊙•)). В цьому випадку необхідно натиснути кнопку (КД) 6;
8. Через 10 хвилин після заповнення досліджувальної ванни рідким діелектриком, натиснути кнопку ввімкнення високої напруги (KB) 2 (⚡ при цьому повинна засвітитися червона сигнальна лампа ЛС2 і погаснути жовта ЛС3.

Покази кіловольметра, в момент перед пробоєм, вказують на величину напруги пробою діелектрика.

9. Після пробою дочекатися повернення стрілки вимірювального приладу на нуль. Відключити вимикач мережі, відкрити дверцята і з проміжку між електродами і з самих електродів за допомогою скляної трубки або пластинки обережно забрати частинки сажі, не пошкодивши при цьому поверхню електродів.

Для наступних досліджень напругу прикладають не раніше, ніж через 1 хвилину після зникнення випадково утворених бульбашок повітря. Для однієї проби рідкого діелектрика необхідно виконати не менше 10–15 пробів.

Електричну міцність знаходять наступним чином:

$$E_{\text{пр.}} = \frac{U_{\text{пр.}}}{h} \cdot \gamma, \quad (h = 2.5 \text{ мм}, \gamma = 1.025).$$

Виконати статистичну обробку результатів.

4. Статистична обробка результатів досліджень

Процеси, що протікають в електроізоляційних матеріалах, особливо такі, як механічне ушкодження, електричний пробій, належать до статистичних закономірностей, і вимірювана величина для одного і того ж матеріалу при однакових умовах досліджень може мати значні коливання. При визначенні електричної міцності газоподібних і рідких речовин необхідно виконати ряд повторних пробів одного і того ж зразка, тому що після пробою електрична міцність відновлюється.

Для отримання достовірних результатів при значному відхиленні експериментальних даних виконують ряд повторних (іноді десятки) досліджень одного і того ж матеріалу. Нехай при однакових умовах виконано n пробів; пробивні напруги при цьому дорівнювали U_1, U_2, \dots, U_n . За результат вимірювань беруть середнє арифметичне для ряду досліджень

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i,$$

де n – число спостережень.

Відхилення окремих спостережень пробивних напруг U_i відносно значення \bar{U} характеризується середнім квадратичним відхиленням (СКВ) S

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}.$$

В тих випадках, коли відхилення окремих спостережень значне, за результат вимірювання приймають середнє геометричне ряду досліджень

$$\bar{R} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n U_i},$$

де U_i – окреме спостереження; n – число спостережень; \bar{R} – результат вимірювання (середнє геометричне). Для спрощення обчислень середнє геометричне переважно знаходять як потенційоване середнє десяткових (можна і натуральних) логарифмів окремих спостережень:

$$\bar{R} = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n \lg U_i}{n}}.$$

Ймовірність отримання однакового значення спостереження при незмінних умовах і при багатократних дослідженнях партії зразків визначають шляхом диференційної і інтегральної кривих ймовірності. Розглянемо ці побудови.

Нехай всі можливі значення пробивної напруги знаходяться в певному діапазоні. Розділимо цей діапазон на ряд невеликих однакових інтервалів ΔU і знайдемо число пробів для кожного інтервалу. Нехай на першому інтервалі буде спостерігатися n_1 пробів, на другому – n_2 , на k -му – кількість пробів n_k і т.д. Нехай таких інтервалів виявилось m ; очевидно, що $m < n$ і можна записати:

$$\sum_{k=1}^m n_k = n.$$

Середня пробивна напруга для k -го інтервалу є U_k .

Для великого числа пробойів замість трудомісткого визначення середнього значення пробивної напруги для всіх n пробойів задовільняються наближеним середнім (середньостатистичним) значенням пробивної напруги $U_{ст}$. Воно визначається наступним чином. Для кожного інтервалу k напруг знаходять добуток ($p_k \cdot U_k$), де $p_k = \frac{n_k}{n} \cdot 100$. Тоді

$$\bar{U}_{ст} = \frac{1}{100} \sum p_k \cdot U_k$$

Ця величина близька до \bar{U} , але не дорівнює їй, тому що в межах інтервалу усереднювалися значення напруги (U_k). Для достатньо малих інтервалів

$$\bar{U}_{ст} \approx \bar{U}$$

p_k – ймовірність того, що пробой відбудеться при нарузі, яка відповідає k -му інтервалу, визначається за формулою:

$$p_k = \frac{n_k}{n} \cdot 100.$$

Якщо відкласти на осі ординат p , а на осі абсцис – середню напругу пробую для кожного інтервалу, отримаємо ступінчастий графік (гістограму). Плавна крива, проведена через середні точки графіка, є диференціальною кривою ймовірності.

При збільшенні числа спостережень графік $p = f(U)$ наближається до плавної кривої, симетрично розміщеної біля центральної ординати. Рівняння такої кривої (для випадку пробую однорідного діелектрика) має вигляд :

$$p(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(U_1-U)^2}{2\sigma^2}},$$

де σ – середнє квадратичне відхилення.

Ця крива відповідає так званому нормальному закону розподілу ймовірностей – закону Гауса.

Для побудови інтегральної кривої знайдемо відповідну до кожного інтервалу k кількість пробойів n_k і додамо до неї число пробойів у всіх попередніх інтервалах, для яких $U < U_k$. Отриману суму подамо у відсотках від загального числа пробойів n

$$M_k = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n} \cdot 100.$$

Зростаюча залежність $M(U)$ носить назву інтегральної кривої.

Диференціальні і інтегральні криві ймовірності відіграють важливу роль не тільки при визначенні електричної міцності електроізоляційних матеріалів, але також і при оцінці інших властивостей, коли необхідно застосовувати статистичні методи обробки даних багатократних спостережень.

Коефіцієнт варіації. Електроізоляційні матеріали відрізняються за ступінню неоднорідності будови. Це проявляється при визначенні їх електричної міцності. Якщо випробування проводяться за однакових умов, то ступінь однорідності може бути охарактеризована відношенням середнього квадратичного відхилення (S) до середнього значення пробивної напруги $\bar{U}_{ст} \approx \bar{U}$. Це відношення називають коефіцієнтом варіації і вимірюють у відсотках:

$$k_{\text{вар}} = \frac{S}{\bar{U}} \cdot 100 = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{\bar{U}^2 (n-1)}}$$

За значенням коефіцієнта варіації електроізоляційні матеріали поділяються на дві групи: більш однорідні з $k_{\text{вар}} \leq 15\%$ і менш однорідні, для яких $k_{\text{вар}} \geq 15\%$.

Порогова пробивна напруга. Визначення найнижчої пробивної напруги, при якій пробивається значна кількість зразків або відбувається велике число пробів, має важливе значення для конструювання електроізоляційних виробів і для їх розрахунків. Очевидно, що при багатократних дослідженнях завжди будуть спостерігатися одиничні пробої, які відповідають деякому значенню $U_{\text{пр.мін}}$, ймовірність яких дуже мала і їх не можна прийняти за основу оцінки електричної міцності матеріала.

Більші підстави для оцінки електричної міцності має підхід, який базується на гранично допустимій ймовірності пробою $M_{\text{пор.}}$, рівній, наприклад, 5...10%. Пробивна напруга $U_{\text{пор}}$, при якій (як і при більш низьких напругах) відбувається $M_{\text{пор}}$ відсотків пробів, називають пороговою пробивною напругою при заданій мінімально допустимій ймовірності.

$$U_{\text{мін}} < U_{\text{пор}} < \bar{U}$$

Для отримання порогової напруги $U_{\text{пор}}$ відкладають на вертикальній осі M значення інтегральної ймовірності $M_{\text{пор}}$, і, провівши горизонтальну пряму до перетину з інтегральною кривою, знаходять $U_{\text{пор}}$.

Розглянемо методику статистичної обробки результатів досліджень для числового прикладу.

Визначення електричної міцності одного з матеріалів вказує на те, що значення $U_{\text{пр}}$ лежить в межах 27...33 кВ. Весь діапазон напруг можна розбити на інтервали величиною 0.4 кВ, таких інтервалів буде 15, а ймовірність p числа пробів на окремих інтервалах коливається від 0.3 до 16% (див. табл.1). За цими даними побудована диференціальна крива ймовірності (рис.1.3), яка виявилась близькою до нормального закону розподілу. Складаючи значення p_k для заданого інтервалу k із значеннями p для попередніх інтервалів, отримаємо значення M , за якими побудована інтегральна крива розподілу. Нехай $M_{\text{пор.}} = 5\%$; відклавши це значення на осі M і провівши горизонтальну пряму до перетину з інтегральною кривою, знаходимо $U_{\text{пор}} = 28.2$ кВ.

Для даного випадку середньостатистична пробивна напруга складе $U_{\text{ст.}} = 30.24$ кВ, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 0.676$ кВ, коефіцієнт варіації $k_{\text{вар.}} = 2.24\%$.

Таким чином, матеріал, для якого проводилися випробування, відноситься до матеріалів першої групи однорідності.

Таблиця 1 – ПРИКЛАД СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ

Величина	Номер інтервалу														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Експериментальні дані														
Напруга U_i , кВ	27.2	27.6	28	28.4	28.8	29.2	29.6	30	30.4	30.8	31.2	31.6	32	32.4	32.8
Число пробів p , %	0.3	1	2	4	8.5	12	14.5	16	14	12	8	3	3	1	0.7
	Розрахункові дані														
Загальна к-сть пробів M , %	0.3	1.3	3.3	7.3	15.8	27.8	42.3	58.3	72.3	84.3	92.3	95.3	98.3	99.3	100
$ U_i - \bar{U} $	3.04	2.64	2.24	1.84	1.44	1.04	0.64	0.24	0.16	0.56	0.96	1.36	1.76	2.16	2.56
$(U_i - \bar{U})^2$	9.24	6.97	5.02	3.39	2.07	1.08	0.41	0.06	0.03	0.31	0.92	1.85	3.10	4.67	6.55

$$\bar{U} = 30.24 \text{ кВ}; \quad \sum p_k = 100\%; \quad \frac{\sum (U_i - \bar{U})^2}{n-1} = 0.456 \text{ кВ}^2; \quad S = 0.676 \text{ кВ};$$

$$K_{\text{вар.}} = \frac{S}{\bar{U}} \cdot 100 = 2.24\%$$

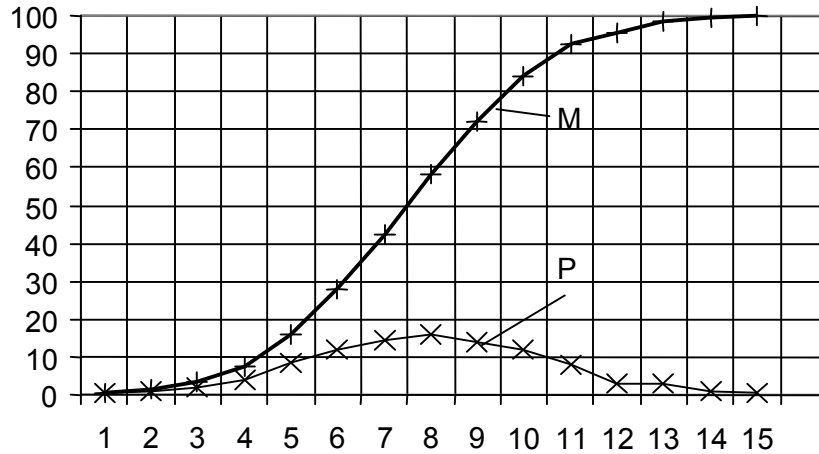


Рис.1.3. Диференціальна (P) та інтегральна (M) криві

Контрольні запитання

1. В чому різниця в термінах: *пробивна напруга* і *електрична міцність* діелектрика? Одиниці вимірювання електричної міцності.
2. Який механізм пробою рідких діелектриків?
3. Чому змінюється електрична міцність масла при вмісті в ньому води і інших домішок?
4. Як впливає на електричну міцність масла частота пробоїв?
5. Чому при стандартному дослідженні масла необхідно виконувати велике число пробоїв? Що таке статистична обробка результатів?

Лабораторна робота № 2

Дослідження електричних властивостей напівпровідників

Метою роботи є ознайомлення з методикою вимірювання питомого електричного опору напівпровідників. Дослідження залежності опору напівпровідників від температури і освітленості. Виконання порівняння результатів цієї роботи з результатами схожих досліджень металевих провідників.

1. Загальна частина

Велика група речовин, питомий опір котрих при нормальній температурі більший, ніж у провідників, але менший, ніж у діелектриків, відноситься до напівпровідників. Загальні положення зонної теорії твердого тіла, наведені у вступі, вказують, що для напівпровідників характерним є наявність не дуже широкої забороненої зони. Для напівпровідників, що найчастіше використовуються, вона складає $0.5 \div 2.5$ еВ. Завдяки малій ширині забороненої зони електропровідність напівпровідників у великій мірі залежить від зовнішніх енергетичних впливів (температури, світла, тиску і т.п.), а також від різноманітних домішок, які іноді в мізерних кількостях присутні в напівпровіднику. Вплив на електропровідність напівпровідників температури, світла, електричного поля, механічних зусиль покладено в основу принципу дії відповідно терморезисторів, фоторезисторів, нелінійних опорів (варисторів), тензорезисторів.

Для того, щоб проходив струм через напівпровідник, необхідно електрони перевести з валентної зони на енергетичні рівні зони провідності під впливом зовнішніх енергетичних факторів. При цьому можливий рух електронів як у вільній, так і в заповненій зонах за рахунок звільнення в останній ряду дозволених рівнів. Тому для напівпровідників характерним є від'ємне значення температурного коефіцієнта електричного опору (ТКР), причому, чим вищий опір, тим більше абсолютне значення ТКР.

Властивостями напівпровідників володіють наступні хімічні елементи: германій, кремній, селен, телур. До напівпровідників відносять багато окислів, карбідів, сульфідів, антимонідів, телуридів. Дуже великий вплив на властивості напівпровідникових матеріалів мають різні домішки, котрі дають надлишкову кількість вільних електронів або створюють додаткові енергетичні рівні в забороненій зоні основного матеріалу.

Наявність в напівпровідниках двох типів електропровідності — електронної (n) і діркової (p) дозволяє отримати різні напівпровідникові вироби з p–n-переходами: діоди, транзистори, тиристори, мікросхеми і т.п.

При виконанні цієї роботи досліджують електропровідність монокристалів кремнію, германію, телуру, сульфїду кадмію і вплив на неї температури і світла.

2. Зразки, прилади, обладнання

Зразки для дослідження вирізані з монокристалічного злитку у вигляді паралелепіпеда з нанесеними на торцях індієвими контактами. Розміри зразків вказані на рис.4.1. Електричний опір зразків вимірюється за допомогою моста Уінстона. З інструкцією по експлуатації моста можна ознайомитися в лабораторії перед виконанням роботи. Також необхідно мати ртутний термометр для контролю температури, трубку електроріч, автотрансформатор, досліджуваний зразок напівпровідника, джерело світла.

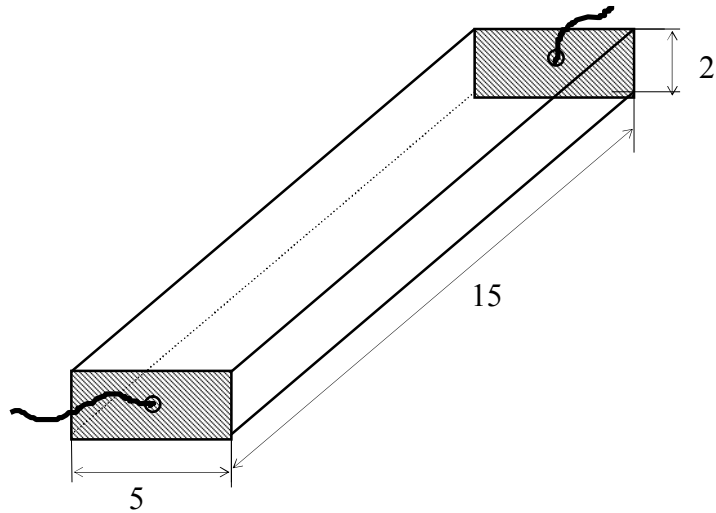


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд та геометричні розміри дослідного зразка.

3. Опис установки

3.1. Установка для дослідження впливу температури на електропровідність напівпровідників

Для дослідження впливу температури на електропровідність напівпровідника зразок з монокристалу кремнію кладуть в трубчаті піч, яка являє собою потужний дротяний опір ПЕВ-15, напругу на який подають від джерела УИП-1 (рис.4.2).

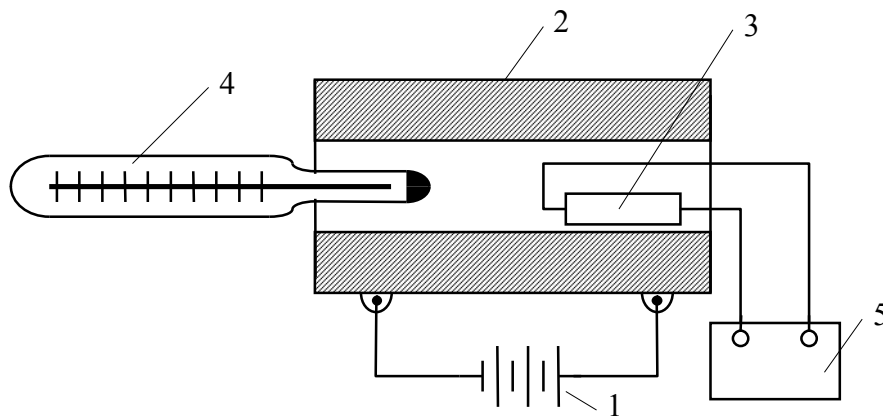


Рисунок 2.2 – Установка для дослідження температурної залежності електропровідності напівпровідників: 1 — джерело живлення УИП-1; 2 — трубчаті піч ПЕВ-15; 3 — досліджуваний зразок; 4 — термометр; 5 — міст Р 369.

Температуру зразка вимірюють за допомогою ртутного термометра. Опір зразка вимірюють мостом Р 369.

3.2. Установка для дослідження впливу освітленості на електропровідність напівпровідника.

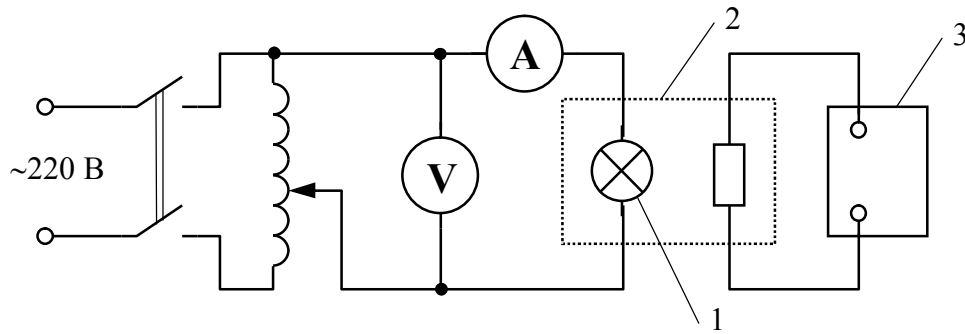


Рисунок 2.3 – Установка для дослідження фотоелектричних властивостей напівпровідників
1 — лампа розжарення; 2 — світлонепроникна кювета; 3 — міст Р 369.

4. Виконання досліджень

4.1. Вимірювання залежності опору зразка від температури.

Зразок з термометром кладуть в трубчасту піч і проводять вимірювання його опору при кімнатній температурі. Після цього підключають до печі джерело живлення УИП-1 і встановлюють напругу 30 В. Вимірюють значення опору зразка R_T через кожні 10°C до температури 150°C . Підвищувати температуру вище 150°C забороняється! Результати вимірювань занести в табл.1.

Таблиця 1

$t, (^\circ\text{C})$	$T, (\text{K})$	$R, (\text{Om})$	$\sigma, (\text{Cm})$	$\ln\sigma$	$1/T, (\text{K}^{-1})$

4.2. Вимірювання залежності опору зразка від освітленості.

Складають схему згідно рис.4.3. Повзунок автотрансформатора встановлюють в нульове положення і вимірюють значення опору фоточутливого напівпровідника в темноті. Після цього вмикають автотрансформатор в мережу і вимірюють значення опору зразка при різних значення напруги і струму лампи розжарення. Результати вимірювань заносять в табл.2.

Таблиця 2

$U_n, (\text{B})$	$I_n, (\text{A})$	$R_T, (\text{Om})$	$\sigma_T, (\text{Cm})$	$\sigma_{cp}, (\text{Cm})$	$R_{cp}, (\text{Om})$	$\Delta\sigma, (\text{Cm})$

5. Проведення обчислень

5.1. Вплив температури на електропровідність напівпровідника. Вивчення температурної залежності електропровідності напівпровідника здійснюють для

бездомішкових зразків монокристалічного кремнію. $n = p = n_i$, питома електропровідність яких дорівнює

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p) \quad (1)$$

де μ_n і μ_p — рухливість електронів і дірок; n_i — концентрація електронів у напівпровіднику; e — заряд електрона.

Через те, що рухливості μ_n і μ_p мало залежать від температури в досліджуваному температурному діапазоні, зміна σ і ρ в цій області зумовлена залежністю від температури і концентрації електронів і дірок

$$n_i = C \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (2)$$

де C — постійна величина;
 E_g — ширина забороненої зони напівпровідника;
 k — постійна Больцмана $8.617 \cdot 10^{-5}$ еВ/К;
 T — температура зразка, (К).

Підставивши (2) в (1), отримаємо:

$$\sigma = eC(\mu_n + \mu_p) \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (3)$$

Позначимо $eC(\mu_n + \mu_p) = A$ і будемо розглядати цей вираз як коефіцієнт, що не залежить від температури. В такому випадку

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (4)$$

Прологарифмуємо цей вираз

$$\ln \sigma = \ln A - \frac{E_g}{2kT}. \quad (5)$$

Виходячи з експериментальних результатів необхідно визначити E_g — ширину забороненої зони напівпровідника. Для цього слід побудувати графік залежності

$$\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right), \quad (6)$$

відкладаючи на осі ординат $\ln \sigma$, а на осі абсцис $\frac{1}{T}$ (K^{-1}). Згідно рівняння (4) така залежність буде мати лінійний характер (рис.2.4), а ширина забороненої зони буде дорівнювати

$$E_g = 2k \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta \frac{1}{T}} \quad (\text{еВ}), \quad (4)$$

де $\Delta \ln \sigma = \ln \sigma_2 - \ln \sigma_1$; $\Delta \frac{1}{T} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}$; $k = 8.617 \cdot 10^{-5}$ (еВ/К).

5.2. Вплив світла на опір напівпровідника. Зміна опору напівпровідника під дією світла пояснюється внутрішнім фотоефектом, коли квант світла переводить електрон з валентної зони в зону провідності, збільшуючи тим самим концентрацію вільних носіїв заряду. Залежність фотопровідності напівпровідника $\Delta \sigma_c = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_\phi}$ від освітленості описується формулою

$$\Delta \sigma_c = bE^x, \quad (8)$$

де b — коефіцієнт пропорційності;
 E — освітленість (лк);
 x — показник степеня ($x < 1$).

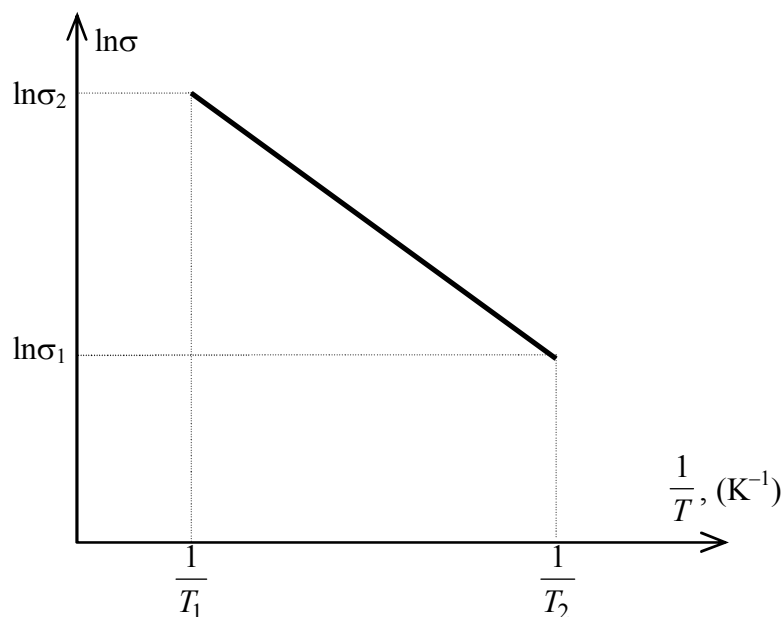


Рисунок 2.4 – Графік залежності $\ln\sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$,

Через те, що освітленість від лампи розжарення пропорційна струму розжарення, то (8) можна подати у вигляді:

$$\Delta\sigma_c = b(kI_p)^x = CI_p^x, \quad (9)$$

де C — коефіцієнт пропорційності;
 I_p — струм розжарення лампи.

$$\Delta\sigma_c = \sigma_c - \sigma_T,$$

де σ_T — провідність зразка в темноті;
 σ_c — провідність освітленого зразка.

В даній роботі необхідно визначити коефіцієнт C і показник степеня x для зразка, котрий досліджують. Для цього будують залежність $\Delta\sigma_c = f(I_p)$, відкладаючи на осі ординат $\Delta\sigma_c$, (См), а на осі абсцис — I_p , (А). Для визначення C і x , які характеризують даний тип фоточутливого напівпровідника, підставляють з графіка $\Delta\sigma_c = f(I_p)$ 5 пар значень $\Delta\sigma$ і I_p в рівняння (4-8). Розв'язуючи систему двох рівнянь з двома невідомими, знаходять C і x . За п'ятьма парами отриманих результатів визначають їх середнє значення.

6. Зміст звіту про роботу

- 6.1. Виклад мети роботи.
- 6.2. Визначення напівпровідників і короткий опис фізичних процесів в напівпровідниках.
- 6.3. Схеми дослідження напівпровідникових матеріалів.
- 6.4. Результати експериментальних вимірювань і розрахунків, які повинні бути подані у вигляді таблиць та графіків, а також наведені формули, за якими виконувались розрахунки.
- 6.5. Розрахунки виконати на ЕОМ або на програмованому калькуляторі МК-52, МК-61 за програмами, наведеними в додатку 2.

7. Контрольні запитання

7.1. Що таке напівпровідники? Які матеріали відносяться до напівпровідників? Области застосування напівпровідників.

7.2. Які існують типи провідності напівпровідників? Які фізичні процеси в напівпровіднику приводять до зміни його питомого опору?

7.3. Додатній чи від'ємний температурний коефіцієнт опору напівпровідників? Поясніть чому.

7.4. Як впливає температура на рухливість і концентрацію вільних носіїв заряду у напівпровідниках?

7.5. Що таке акцепторні і донорні домішки в напівпровідниках?

Лабораторна робота № 3

Дослідження електричних властивостей провідникових матеріалів

Мета роботи: Ознайомитися з методикою дослідження електричних властивостей провідникових матеріалів. Виконати вимірювання температурних залежностей питомого опору різних металів, розрахувати температурний коефіцієнт питомого опору (ТКПО або ТКр). Визначити вплив температури на довжину вільного пробігу електронів у металі і встановити кореляцію з температурними змінами питомого опору.

1. Загальні відомості

Найкращими провідниками електричного струму є метали. Проходження струму в металах в твердому і рідкому станах обумовлено рухом вільних електронів, через що їх називають провідниками з електронною провідністю.

Металеві провідникові матеріали можуть бути поділені на матеріали з високою провідністю і матеріали з високим опором. Метали з високою провідністю використовуються для проводів ліній електропередач, кабелів, обмоток електричних машин і трансформаторів, для виготовлення хвилеводів і т.п. Метали і сплави з високим опором застосовуються в електронагрівних приладах, лампах розжарення, зразкових опорах, реостатах. Особливе застосування має електротехнічне вугілля, яке займає за своїми властивостями проміжне положення між провідниками і напівпровідниками.

Основними параметрами, що характеризують провідникові матеріали є:

- 1) питомий опір ρ , або обернена величина — питома електропровідність γ ;
- 2) температурний коефіцієнт питомого опору ТКр;
- 3) коефіцієнт теплопровідності γ_T ;
- 4) термоелектрорушійна сила (термо-ерс) відносно міді;
- 5) робота виходу електронів з металу.

Питомий електричний опір для провідника довжиною l з поперечним перерізом S , який має опір R , обчислюється за формулою

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (\text{Ом}\cdot\text{м}) \quad (1)$$

Для провідникових матеріалів дозволяється користуватись позасистемною одиницею вимірювання ρ (Ом·мм²/м), якій в системі СІ відповідає за величиною одиниця (мкОм·м):

$$1 \text{ Ом}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ мкОм}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}.$$

З іншого боку величина питомого електричного опору металевого провідника згідно класичної теорії металів може бути описана за наступною формулою

$$\rho = \frac{2mV_T}{e^2 n_0 \lambda},$$

де m — маса електрона; V_T — середня швидкість теплового руху вільного електрона в металі; e — заряд електрона; n_0 — число вільних електронів в одиниці об'єму металу; λ — середня довжина вільного пробігу електрона.

Швидкість теплового руху електронів мало залежить від температури, тому що електронний газ в металах знаходиться у виродженому стані. Для різних провідників ця швидкість приблизно однакова. Незначно відрізняються також і концентрації вільних електронів (наприклад, для міді і нікелю ця розбіжність менша, ніж 10%). Тому величина питомого електричного опору різних провідників в основному залежить від середньої довжини вільного пробігу електрона в даному провіднику, яка пов'язана із структурою провідника. Всі чисті метали з найбільш правильною кристалічною ґраткою

характеризуються найменшими значеннями питомого опору, а домішки і дефекти структури спотворюють ґратку і призводять до збільшення ρ .

При підвищенні температури коливання вузлів кристалевої ґратки металевого провідника підсилюється і на шляху направленого руху електронів в електричному полі виникає все більше перешкод, тобто, середня довжина вільного шляху електрона зменшується і через те опір збільшується. Величина, що характеризує відносне збільшення питомого опору при нагріві провідника на 1 К отримала назву температурного коефіцієнта питомого опору TK_ρ і вимірюється в (K^{-1}) .

$$\text{TK}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (3)$$

З електронної теорії металів випливає, що TK_ρ чистих металів в твердому стані повинен бути близьким до температурного коефіцієнта розширення ідеальних газів, тобто $1/273 = 0.0037 \text{ K}^{-1}$. Під час зміни температури у вузькому діапазоні на практиці допустимою є кусково-лінійна апроксимація залежності $\rho(T)$:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \text{TK}_\rho (T_2 - T_1)] \quad (4)$$

де ρ_1, ρ_2 — питомі опори провідника при температурах T_1 і T_2 відповідно. В цьому випадку TK_ρ буде називатися середнім температурним коефіцієнтом питомого опору даного матеріалу в діапазоні температур від T_1 до T_2 .

2. Зразки, прилади, обладнання

Зразки проводів: мідь, алюміній, нікель, константан, фероніхром, мангінін. Довжина зразків 1 м, діаметр проводу визначають за допомогою мікрометра. Для дослідження залежності опору металевого провідника із зміною температури необхідні: муфельна електрична піч СУОЛ, ртутний термометр, що має шкалу до 350°C , міст опору Р 316.

3. Установка для дослідження

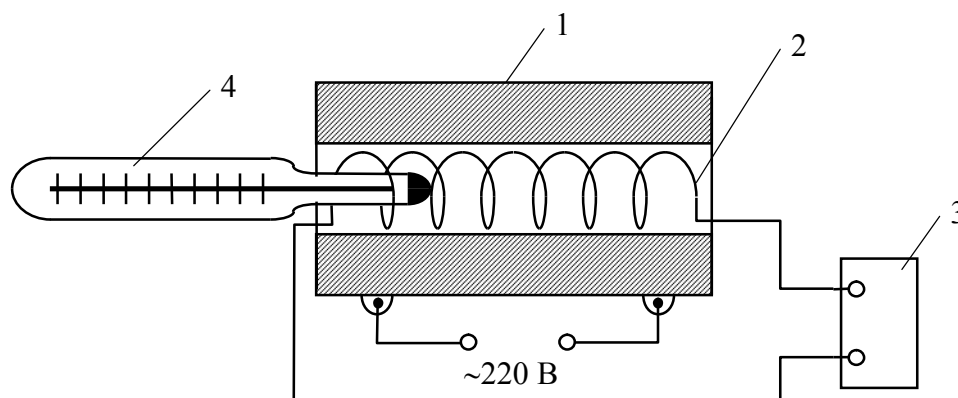


Рисунок 3.1 – Установка для дослідження температурної залежності провідникових матеріалів: 1 — муфельна піч; 2 — досліджуваний зразок; 3 — міст для вимірювання опорів Р 316; 4 — термометр.

4. Виконання досліджень

Досліджуваний зразок металевого провідника у вигляді спіралі вставляють в кварцеву трубку і під'єднують до моста Р 316. Вимірюють діаметр зразка і його опір при кімнатній температурі.

Вставляють зразок у муфельну піч і вимірюють його опір при підвищенні температури через 30°C до 300÷350°C. Дослідження виконують для трьох запропонованих викладачем зразків.

Дані вимірювань заносять в табл. 1.

Таблиця 1

№ п/п	$t^{\circ}(C)$	$T(K)$	$R_t (Om)$	$D (mm)$	$S (mm^2)$	$\rho \left(\frac{Om \cdot mm^2}{m} \right)$	$\lambda (\text{Å})$	$TK\rho(K^{-1})$
1								
2								
3								

5. Виконання обчислень

5.1. Обчислення питомого опору

Обчислення питомого опору провідника виконують за формулою

$$\rho = R \frac{S}{l} \left(\frac{Om \cdot mm^2}{m} \right), \quad (5)$$

де R — опір провідника, (Om); S — площа поперечного перерізу, (mm^2); l — довжина провідника, (m).

5.2. Обчислення середньої довжини вільного пробігу електрона

Середня довжина пробігу електронів обчислюється за формулою (2), перетвореної згідно квантомеханічної моделі провідника

$$\lambda = \frac{2mV_T}{e^2 n_0 \lambda} = \frac{10^8 h}{\left(\frac{8\pi}{3} \right)^{1/3} \cdot e^2 \cdot n_0^{2/3} \cdot \rho} (\text{Å}), \quad (6)$$

де h — постійна Планка, $6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;
 e — заряд електрона, $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 n_0 — число вільних електронів в одиниці об'єму металу, ($1/m^3$);
 ρ — питомий електричний опір, (Om·m).

Число електронів в кубічному метрі провідника визначається за формулою

$$n_0 = \frac{\gamma}{\mu} N_A, \quad (7)$$

де γ — густина провідника в kg/m^3 ; μ — молекулярна маса в $kg/mole$; N_A — число Авогадро ($6.023 \cdot 10^{26}$ $kmole^{-1}$).

5.3. Обчислення температурного коефіцієнта питомого опору.

За отриманими значеннями опору досліджуваних проводів при різних температурах будують графіки, відкладаючи на осі абсцис температуру в (K), а на осі ординат – значення питомого опору в (Om· mm^2/m). $TK\rho$ обчислюють для інтервалу температур 293÷423 K і 423÷573 K за формулою

$$TK\rho = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho - \rho_0}{T - T_0} \quad (8)$$

де ρ_0 — значення питомого опору проводу в нижній межі температур, тобто при T_0 ; ρ — те ж саме, тільки у верхній межі температур, тобто при T .

Обчислення температурного коефіцієнту електричного опору проводу виконують за формулою

$$TK_R = TK\rho - \zeta_l \quad (9)$$

де ζ_l — температурний коефіцієнт лінійного розширення проводу, значення якого наведено в табл.2. Для чистих металів, як це видно з табл. 2, $\zeta_l \ll TK\rho$, отже в формулі (9) можна знехтувати величиною ζ_l в порівнянні з $TK\rho$ і прийняти наближено $TK\rho = TK_R$. Але для сплавів, що мають малий $TK\rho$, формула (9) може мати суттєве практичне значення.

Таблиця 2

Назва матеріалів	$\zeta_l \cdot 10^{-6}, (K^{-1})$
Мідь	16.7
Нікель	12.8
Алюміній	22.9
Константан	17.0
Манганан	
Фероніхром	
Вольфрам	4.3
Платина	8.9

6. Зміст звіту про роботу

6.1. Мета роботи.

6.2. Принципова схема досліджувальної установки.

6.3. Короткий виклад суті методу дослідження провідників, що застосовується.

6.4. Опис матеріалів, з якими студенти ознайомились в даній роботі.

6.5. Результати вимірювань і обчислень у вигляді таблиць, графіків, а також формули, за якими проводились розрахунки.

6.6. Вимірювання питомого опору металів і сплавів в залежності від температури подати у вигляді табл.1. Побудувати графіки. Визначити $TK\rho$ для інтервалів температур $293 \div 423$ К і $423 \div 573$ К.

6.7. Результати обчислень середньої довжини вільного пробігу електронів в мідному і нікелевому проводах повинні бути наведені в табл.1. Побудувати графіки $\lambda = f(T)$.

6.8. Розрахунки виконувати на ЕОМ або на програмованому мікрокалькуляторі МК-61, МК-52 за програмами, наведеними в додатку 3.

6.9. Висновки.

7. Контрольні запитання

7.1. Провідники. Зонна схема металевих провідників. Застосування провідників у техніці.

7.2. Якими параметрами характеризуються провідникові матеріали.

7.3. Від яких факторів залежить питома електрична провідність провідників.

7.4. Який механізм впливу температури, домішок, структурних дефектів на електричний опір провідника.

7.5. Що таке температурний коефіцієнт питомого опору провідника? Одиниці вимірювання TK_p . Як впливає склад провідника на TK_p і TK_R ?

7.6. З якою метою в техніці використовується властивість провідників змінювати свій опір при зміні температури?

Лабораторна робота № 4

Дослідження температурної залежності питомої електропровідності скла

Мета роботи: Вивчити електричні властивості технічного скла, набути практичних навичок з визначення термостійкості і температурної області експлуатації скла в електротехнічних і освітлювальних приладах.

1. Загальні відомості

Скло — це аморфна речовина, яка утворена із суміші склоутворюючих оксидів (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , PbO , Al_2O_3 , CaO , BaO , Na_2O , K_2O). При переході з розплаву в твердий стан у склі не утворюються кристали, через те що цьому протидіє швидке зростання в'язкості розплаву. Речовини, що не мають кристалічної структури, називаються *аморфними*.

Властивості скла (твердість, в'язкість, тепло- і електропровідність, прозорість) поступово і неперервно змінюються при зміні температури. При кімнатній температурі скло знаходиться в крихкому стані, але при певній температурі, яка називається температурою трансформації, скло переходить у в'язкий стан і не руйнується ні при механічних ударах, ні при різкій зміні температури. Температура, при якій скло починає деформуватися під дією власної ваги, називається *температурою розм'ягчення*.

Скло застосовується в різних галузях сучасної техніки, як газонепроникний вакуумний матеріал, необхідний для утримання в приладах вакууму, як найбільш поширений електроізоляційний матеріал. Тому велике зацікавлення викликає дослідження електричних властивостей скла. Для більшості сортів скла характерною є іонна електропровідність. При температурах, нижчих від температури розм'ягчення ($400\div 600^\circ\text{C}$), відповідальними за перенесення заряду у склі є катіони, а вище цієї температури в перенесенні заряду приймають участь і аніони. Доля участі різних катіонів в електропровідності скла визначається їх рухливістю і зменшується в ряду:

$\text{Li-Na-K-Rb-Cs-Ba-Sr-Ca-Zn-Mg-Be-Si-B}$.

При низьких температурах і невисоких напругах скло є хорошим ізолятором. Електропровідність скла швидко зростає при збільшенні температури в зв'язку із збільшенням рухливості іонів. При $200\div 400^\circ\text{C}$ електропровідність скла підвищується в $10^8\div 10^{10}$ раз, а при $1100\div 1500^\circ\text{C}$ скло є хорошим провідником.

Для оцінки електропровідності скла при підвищенні температури використовують особливий параметр — ТК-100, тобто температуру, при якій питомий об'ємний опір скла рівний $100 \text{ МОм}\cdot\text{см}$. Але для повної оцінки електропровідності різних сортів скла при підвищених температурах необхідно знати залежність питомої електропровідності від температури в широкому діапазоні температур. Це є одним з основних критеріїв вибору марки скла для електровакуумних приладів, особливо ламп. Віддаль між струмопровідними електродами в лампі декілька міліметрів, а різниця потенціалів досягає сотень вольт при робочій температурі декілька сот градусів. Тому для вказаної мети необхідно застосовувати скла з високим значенням ТК-100.

2. Зразки, прилади, обладнання

Вивчення температурної залежності питомої електропровідності скла виконується на зразках у вигляді стержнів, на кінцях яких розміщені затискні контакти із нержавіючої сталі. Для вимірювання опору зразка використовується міст постійного струму Р-4053. Нагрів

зразка відбувається в муфельній печі, температура якої контролюється за допомогою термопару типу ТХА-5 і потенціометра ПП-63.

3. Лабораторна установка

Схема установки для дослідження температурної залежності питомої електропровідності скла від температури наведена на рис. 6.1.

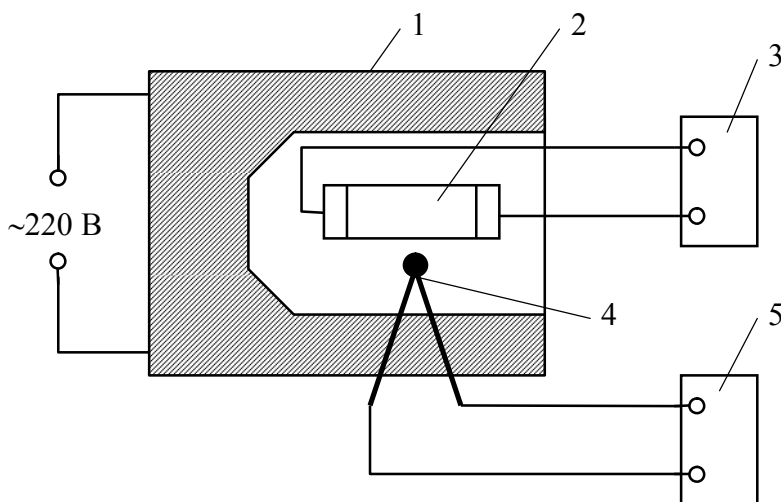


Рисунок 6.1 – Установка для дослідження залежності електропровідності скла від температури: 1 — муфельна електропіч; 2 — досліджуваний зразок; 3 — міст постійного струму Р-4053; 4 — термопара; 5 — потенціометр ПП-63.

4. Виконання досліджень

На запропоновані викладачем зразки закріпити електроди. Виміряти віддаль між електродами (l) і діаметр зразка (D). Помістити зразок в муфельну піч і під'єднати його до моста постійного струму Р-4053. Виміряти його опір при кімнатній температурі. Під'єднати термопару до потенціометра ПП-63 і увімкнути піч до електричної мережі. Через кожних 50°C виконувати вимірювання опору зразка. Зразок нагріти до 550°C . Результати вимірів занести в табл. 1.

Таблиця 1

№ п/п	l (см)	S (см ²)	$t^{\circ}\text{C}$	R (МОм)	ρ (МОм·см)	σ (См·см ⁻¹)	D (см)

5. Виконання обчислень

1. Визначити поперечний переріз зразка за формулою

$$S = \frac{\pi D^2}{4}.$$

2. Виходячи з виразу $\rho = R \frac{S}{l}$, визначити питомий опір скляного зразка для кожного значення температури. Також визначити питому електропровідність за формулою $\sigma = 1/\rho$.
3. Побудувати графік залежності $\rho = f(t)$ і $\sigma = f(t)$.
4. За графіком визначити температуру ТК-100, при якій питомий об'ємний опір скла рівний 100 МОм·см.

6. Зміст звіту про роботу

- 6.1. Мета роботи.
- 6.2. Визначення і короткий опис електричних властивостей скла.
- 6.3. Схема лабораторної установки.
- 6.4. Результати експериментальних вимірювань і розрахунків, які повинні бути подані у вигляді таблиці і графіків, а також навести формули, за якими виконані розрахунки.
- 6.5. Розрахунки виконувати на ЕОМ або на програмованому мікрокалькуляторі МК-61, МК-52 за програмами, наведеними в додатку 4.
- 6.6. Висновки.

7. Контрольні запитання

1. Що таке скло? Який матеріал називається кристалічним, який аморфним?
2. Чому скло має аморфну структуру?
3. Яка природа носіїв заряду в склі і як вона змінюється від зміни температури?
4. Як залежить опір зразка від зміни температури, від вмісту різних домішок?
5. Що таке температура розмякшення скла?
6. Що таке параметр ТК-100 і як він враховується при проектуванні освітлювальної апаратури?

Лабораторна робота № 5

Дослідження властивостей магнітних матеріалів

Мета роботи: ознайомитися з методикою дослідження магнітних матеріалів за допомогою осцилографа; визначити магнітні втрати в електротехнічній сталі різних марок.

1. Основні теоретичні положення:

За своїми магнітними властивостями електротехнічні матеріали поділяються на слабомагнітні (діамагнетики і парамагнетики) та сильномагнітні (феромагнетики і феримагнетики). Для створення трансформаторів, електромагнітних апаратів, електричних машин та приладів в основному застосовуються феромагнітні матеріали на основі заліза, нікелю, кобальту і їх сплавів.

Властивості феромагнетиків впливають на характеристики виробів, в яких вони використовуються. До основних магнітних властивостей відносяться: магнітний потік, магнітна індукція, магніторушійна сила, магнітна сприйнятливість, магнітна проникливість, втрати на гістерезис або перемагнічування і втрати на вихрові струми. Магнітні властивості матеріалів зумовлені внутрішніми скритими формами руху електричних зарядів у вигляді елементарних колових струмів. Такими коловими струмами є: обертання електронів навколо власних осей – спіновий рух, обертання електронів навколо ядра – орбітальний рух та обертовий рух ядер атомів. Магнітний стан матеріалу характеризується величиною результуючого магнітного моменту, віднесеного до одиниці об'єму, і називається *намагніченістю речовини*. Між намагніченістю і зовнішнім магнітним полем існує залежність:

$$J = 4\pi\chi H, \quad (1)$$

де χ – магнітна сприйнятливість, безрозмірна величина; I – намагніченість, А/м; H – напруженість магнітного поля, А/м.

Для феромагнітних матеріалів співвідношення (1) є нелінійним, оскільки магнітна сприйнятливість залежить від напруженості магнітного поля. Під дією зовнішнього магнітного поля магнітні моменти атомів утворюють поля, які, додаючись, створюють в матеріалі внутрішнє поле. Результатом взаємодії внутрішнього і зовнішнього полів є сумарне поле, яке характеризується магнітною індукцією \vec{B} .

Магнітна індукція є функцією напруженості магнітного поля \vec{H} і визначається виразом

$$\vec{B} = \mu\vec{H}, \quad (2)$$

де μ – магнітна проникність, безрозмірна величина.

Для феромагнетиків функція (2) нелінійна. Між величинами \vec{J} , \vec{B} і \vec{H} існує залежність

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}), \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна постійна, або магнітна проникність вакууму ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Із залежності (3) слідує, що B є складною функцією H . Аналітичний вираз функції (3) в загальному випадку є складним, тому користуються графічними залежностями

$$J = \psi(H) \text{ або } B = f(H), \quad (4)$$

які називаються кривими намагнічування і визначаються експериментально.

Для зразків електротехнічної сталі криві $J = \psi(H)$ і $B = f(H)$ до напруженості магнітного поля 10^4 А/м практично співпадають.

Особливістю структури феромагнітних матеріалів є наявність *магнітних доменів* – макроскопічних областей, в яких магнітні моменти окремих атомів орієнтовані взаємно паралельно. Напрямки магнітних моментів окремих доменів розподілені хаотично, а магнітний потік такого зразка дорівнює нулю. Під дією зовнішнього магнітного поля відбувається перебудова доменної структури, що приводить до намагнічування феромагнітного матеріалу (рис. 5.1).

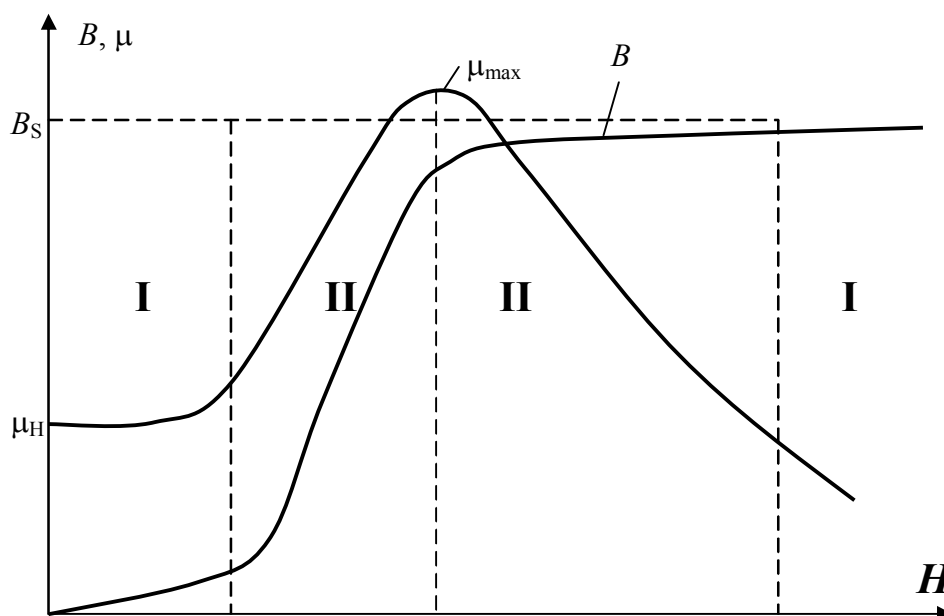


Рисунок 5.1 – Залежність індукції і магнітної проникності від напруженості магнітного поля.

Якщо провести намагнічування феромагнетика в зовнішньому магнітному полі, а потім зменшувати напруженість поля H , то величина магнітної індукції буде також зменшуватись, але не по початковій кривій, а більш повільно. При збільшенні поля протилежного напрямку зразок може бути розмагнічений або перемагнічений. При цьому буде описана крива, яка називається *гістерезисом* (циклом перемагнічування) або *петлею гістерезису*. В залежності від величини напруженості зовнішнього магнітного поля, можна спостерігати ціле сімейство петель гістерезису (рис. 5.2).

Найбільш цікавою є гранична петля гістерезису, яку отримують при доведенні намагнічуваного матеріалу до насичення. Всі інші гістерезисні цикли називаються частковими. Крива, яка з'єднує вершини часткових гістерезисних циклів, називається *основною кривою намагнічування* (рис. 5.1). Значення B_r при $H = 0$ в процесі розмагнічування зразка, яке визначається по граничній петлі гістерезису, називається залишковою індукцією.

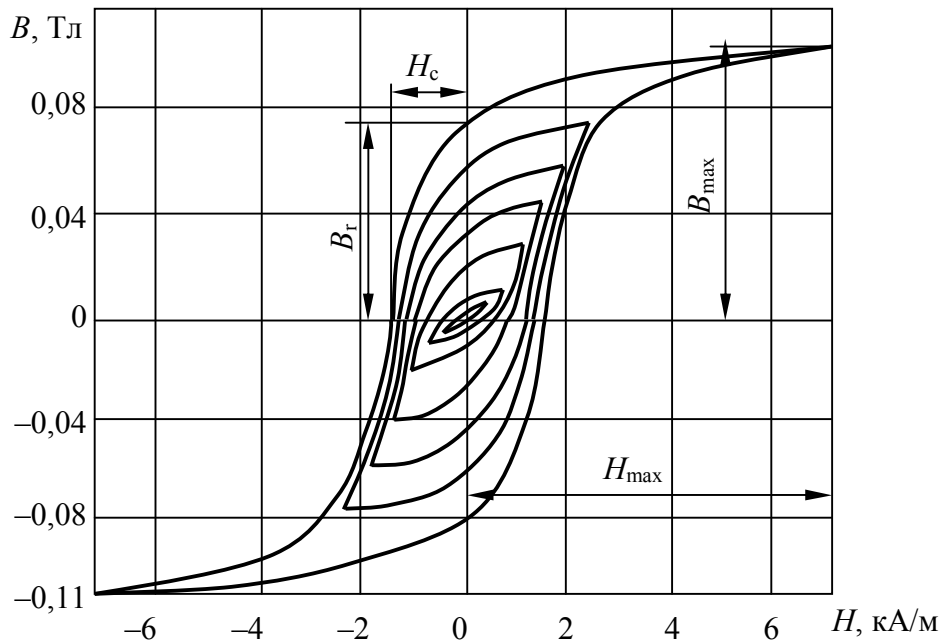


Рисунок 5.2 – Сімейство гістерезисних циклів

Для того, щоб зменшити індукцію від величини B_r до нуля, необхідно прикласти зворотню направлену напруженість поля H_c , яку називають затримуючою або *коерцитивною силою*. Магнітні властивості матеріалів характеризуються величиною *відносної магнітної проникності*

$$\mu_r = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m}.$$

Магнітна проникність одержується з основної кривої намагнічування, як відношення величини індукції B до відповідного значення напруженості магнітного поля H в даній точці кривої намагнічування.

Магнітну проникність при зміні H від 0 до 0.001 А/м називають *початковою проникністю* і позначають μ . Найбільше значення магнітної проникності називається *максимальною проникністю* і позначається μ_{\max} .

При сильних полях в області насичення μ наближається до одиниці. Типова залежність відносної магнітної проникності від напруженості магнітного поля дана на рис. 5.1.

Характеристикою феромагнетика в змінних магнітних полях служить величина динамічної проникності.

$$\mu' = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}.$$

Магнітні матеріали з малим значенням H_c і великою магнітною проникністю називаються *магнітом'якими*; матеріали з великою коерцитивною силою і меншою проникністю називаються *магнітотвердими*.

Типові петлі гістерезису магнітом'яких і магнітотвердих матеріалів показані на рис. 5.3.

При перемагнічуванні феромагнетиків в змінних магнітних полях завжди виникають втрати енергії, які приводять до нагрівання. Ці втрати обумовлені *втратами на гістерезис і динамічними втратами*.

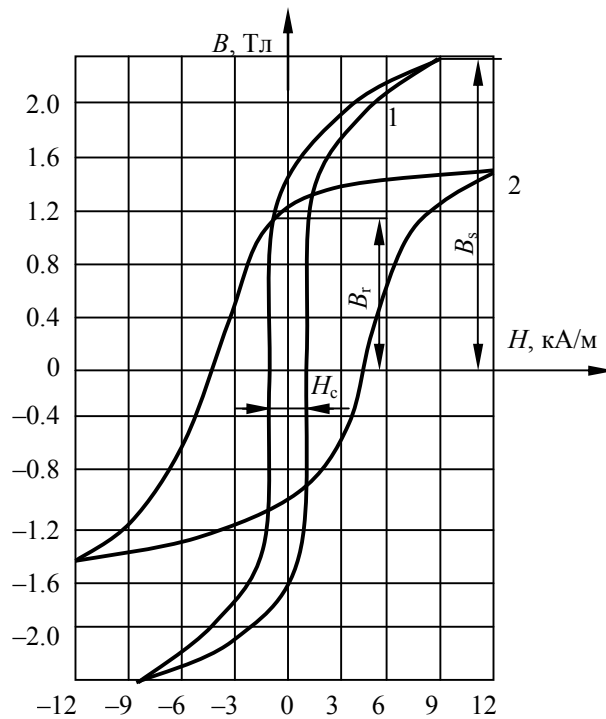


Рисунок 5.3 – Гістерезисний цикл магнітом'якого (1) і магнітотвердого (2) матеріалів.

Динамічні втрати складаються із втрат на вихрові струми, які індукуються в масі магнітного матеріалу, і частково із втрат, які зумовлені магнітними наслідками. Магнітні наслідки проявляються в магнітом'яких матеріалах в області слабких полів. Втрати на гістерезис можуть бути визначені за площею петлі гістерезису з врахуванням її масштабу і частоти струму.

Потужність, яка затрачається на перемагнічування (гістерезис), визначається за емпіричною формулою

$$P_r = \eta B_m^n f V,$$

де η – коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу;
 B_m – максимальна індукція в даному циклі;
 n – показник степеня (1,6 ÷ 2);
 f – частота;
 V – об'єм феромагнетика.

Потужність, яка затрачається на вихрові струми, можна обчислити за формулою

$$P_f = \xi f^2 B_m^2 V,$$

де ξ – коефіцієнт, який залежить від питомого опору феромагнетика і форми зразка.

Площі, обмежені гістерезисними кривими, пропорційні втратам на перемагнічування і вихрові струми.

При зніманні гістерезисних кривих на постійному струмі балістичним методом одержують статичні криві. При зніманні цих же кривих на змінному струмі одержують динамічні криві. Статичні криві включають лише втрати на гістерезис, тоді як динамічні криві враховують втрати на гістерезис і вихрові струми.

При малих частотах можна не враховувати втрати на вихрові струми P_f , які є малими в порівнянні з втратами на перемагнічування P_r .

Із збільшенням частоти вплив вихрових струмів зростає, що приводить до перетворення гістерезисної кривої в еліпс. Це відбувається тому, що форма кривої струму при синусоїдній формі кривої напруги також наближається до синусоїдної. Так як величина P_f залежить від другої степені частоти, а величина P_r від першої степені (рис. 5.4), при високих частотах доводиться враховувати в першу чергу втрати P_f .

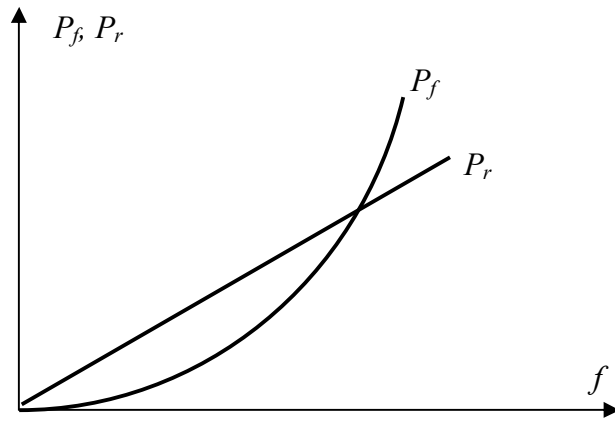


Рисунок 5.4 – Частотна залежність втрат на перемагнічування P_r і динамічних втрат P_f .

Втрати, які пов'язані з залишковим магнетизмом, необхідно враховувати при використанні феромагнетиків в імпульсних режимах.

Для вивчення магнітних властивостей матеріалів використовують зразки тороїдної форми. При цьому справжня напруженість магнітного поля всередині зразка дорівнює напруженості зовнішнього магнітного поля, яке виникає при протіканні струму в намагнічуючій обмотці зразка. В незамкнених зразках при намагнічуванні на кінцях виникають магнітні полюси, поле яких всередині зразка направлено назустріч зовнішньому. Поле цих полюсів називається розмагнічуючим.

В даній роботі проводяться вимірювання втрат на перемагнічування в електротехнічних сталях за допомогою осцилографа та ватметра.

1. Осцилографічний метод

2. Опис установки:

Схема установки наведена на рис. 5.5.

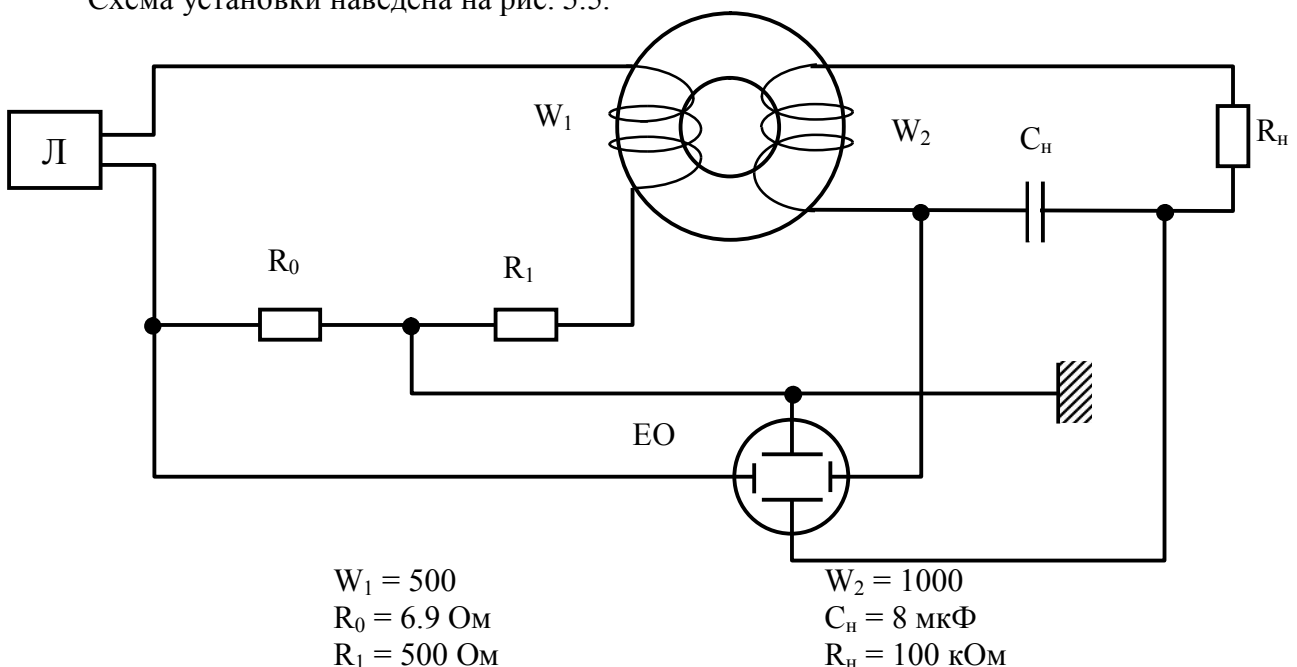


Рисунок 5.5 – Електрична схема установки для вимірювання втрат на гістерезис за допомогою осцилографа

До пластин горизонтального відхилення осцилографа прикладено напругу U – пропорційну напруженості поля, H :

$$U_{R0} = I_1 R_0; \quad H = \frac{\sqrt{2} I_1 W_1}{l_{cp}} \text{ [A/м]},$$

де I_1 – струм в первинній обмотці, А; l_{cp} – довжина середньої силової лінії в зразку, м; W_1 – кількість витків у первинній обмотці.

Е.Р.С. індукована у вторинній обмотці дорівнює

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -W_2 S \frac{dB}{dt},$$

де S – площа поперечного перерізу зразка; W_2 – кількість витків у вторинній обмотці.

Для того, щоб одержати на екрані осцилографа гістерезисну криву, необхідно подати на вертикальні пластини напругу, пропорційну магнітній індукції в зразку.

З метою одержання такої напруги e_2 подається на інтегруючий ланцюжок, який складається із опору R_n і ємності C_n .

При умові $R_n \gg 1/\omega C_n$ струм у вторинній обмотці буде

$$i = \frac{e_2}{R_n}.$$

Тоді напруга на конденсаторі:

$$U_c = \frac{1}{C_n} \int i dt = \frac{1}{C_n R_n} \int e_2 dt = \frac{W_2 S B}{C_n R_n}.$$

Напруга U_c , пропорційна магнітній індукції в зразку магнітного матеріалу, подається на пластини вертикального відхилення осцилографа. При одночасній дії U_{R0} і U_c на екрані одержується крива залежності B від H – гістерезисний цикл.

3. Завдання

Метод дослідження магнітних матеріалів за допомогою осцилографа дозволяє визначити втрати за один гістерезисний цикл.

Досліджуваний зразок являє собою тороїд, виконаний з листової електротехнічної сталі у вигляді стрічки, згорнутої в тугу спіраль.

Розміри тороїда:

висота – 42 мм;

зовнішній діаметр – 92 мм;

внутрішній діаметр – 50 мм;

вага зразка – 1300 г;

марка сталі – Э30;

первинна обмотка – 500 витків;

вторинна обмотка – 1000 витків.

В роботі необхідно проробити наступне:

1. Проградувати осі осцилографа.
2. Зняти граничний цикл гістерезису.
3. Визначити втрати в зразку феромагнітного матеріалу.
4. Зняти основну криву намагнічування.

4. Проведення досліджень

4. 1. Підготовка до випробування.

Включити ЛАТР і збільшуючи напругу на його виході до $120 \div 180$ В одержати на екрані осцилографа граничну петлю гістерезису. Ручки вертикального і горизонтального

підсилення встановити так, щоб площа граничної гістерезисної петлі на екрані осцилографа вийшла найбільшою.

4.2. Градування осей осцилографа.

Відключити напругу від вертикального входу, з допомогою вольтметра В 7–21 виміряти напругу, яка поступає на горизонтальний вхід, і відповідне їй відхилення променя на екрані осцилографа по горизонталі при різноманітних положеннях ручки горизонтального підсилення. Дані занести в табл. 1.

Аналогічно провести градування вертикальної осі осцилографа. Дані занести у табл. 2.

4.3. Визначення втрат у зразку феромагнітного матеріалу.

Одержавши граничний гістерезисний цикл, замалювати його на кальку. При цьому записати положення ручок підсилення по горизонталі і по вертикалі осцилографа.

4.4. Зняття основної кривої намагнічування.

За допомогою ЛАТРа, починаючи з нуля, поступово збільшувати "H" до "H_{max}" при зміні U від 0 до 180 В з інтервалом 20 В.

Для кожного значення U визначити координати вершини гістерезисного циклу і дані звести в табл. 3.

5. Виконання обчислень.

5.1. Обчислення масштабу горизонтальної осі електронно-променевої трубки осцилографа виконується за формулою:

$$h_1 = \frac{H[\text{А/М}]}{X[\text{ММ}]} = \frac{0.4\sqrt{2}\pi U_n W_1}{I_{cp} R_0 X} \left[\frac{\text{А}}{\text{М}} / \text{ММ} \right],$$

де h_1 – масштаб горизонтальної осі осцилографа в $\left[\frac{\text{А}}{\text{М}} / \text{ММ} \right]$;

W_1 – число витків первинної обмотки;

U_n – напруга на горизонтальному вході осцилографа, В;

R_0 – величина зразкового опору, Ом;

l_{cp} – довжина середньої силової лінії в зразку, см;

$$l_{cp} = \frac{2\pi D_{cp}}{2}; \quad D_{cp} = \frac{D_{зов} - D_{внут}}{\ln \frac{D_{зов}}{D_{внут}}};$$

X – число міліметрів на яке відхиляється промінь під дією напруги U_n .

5.2. Обчислення масштабу вертикальної осі екрану електронно-променевої трубки осцилографа виконується по формулі:

$$v_1 = \frac{B[\text{Тл}]}{Y[\text{ММ}]} = \frac{1.41 \cdot 10^8 \cdot U_b C_n R_n}{W_2 S Y} [\text{Тл} / \text{ММ}],$$

де U_b – напруга на вертикальному вході осцилографа, В;

v_1 – масштаб вертикальної осі осцилографа, Тл/мм;

C_n – значення ємності конденсатора інтегруючої ланки, Ф;

R_n – величина опору інтегруючої ланки, Ом;

W_2 – число витків вторинної обмотки на зразку;

S – площа перерізу зразка, см²;

Y – число міліметрів, на яке відхиляється промінь під дією напруги U_b .

5.3. Обчислення втрат у зразку феромагнітного матеріалу.

Питомі втрати в зразку за один період визначаються за формулою:

$$P = \frac{S_n h_1 \epsilon_1}{4\pi\rho \cdot 10^7} [\text{Дж} / \text{Г}],$$

де S – площа гістерезисного циклу, мм^2 ;
 ρ – густина матеріалу зразка, $\text{г}/\text{см}^3$;
 h_1 – масштаб горизонтальної осі, $\frac{\text{А}}{\text{м}}/\text{мм}$;
 ϵ_1 – масштаб вертикальної осі, $\text{Тл}/\text{мм}$.

Питомі втрати у зразку визначити за формулою:

$$P_1 = P f_1 [\text{Вт}],$$

де f_1 – частота напруги живлення, Гц .

4) Обчислення магнітної проникності зразка виконується за формулою:

$$\mu = B/H \left[\text{Тл} / \frac{\text{А}}{\text{м}} \right].$$

B і H знімати з основної кривої намагнічування.

Результати градування осей повинні бути оформлені у вигляді таблиць 1 і 2.

Таблиця 1

W_1	$U_n, \text{В}$	$R_0, \text{Ом}$	$I_{\text{ср}}, \text{мм}$	Поділок ручки гориз. підсил.	$X, \text{мм}$	$h_1, \frac{\text{А}}{\text{м}}/\text{мм}$

Таблиця 2

W_2	$U_b, \text{В}$	$C_n, \text{мкФ}$	$R_n, \text{кОм}$	$S, \text{см}^2$	Поділок ручки вертик. підсил.	$Y, \text{мм}$	$b_1, \text{Тл}/\text{мм}$

Результати визначення основної кривої намагнічування та питомих втрат повинні бути оформлені у вигляді таблиць 3 і 4.

Таблиця 3

№ вим. п/п	Поділок ручки гориз. підс.	$X, \text{мм}$	$H = h_1 x$	Поділок ручки вертик. підсил.	$Y, \text{мм}$	$B = b_1 Y, \text{Тл}$	$\mu, \text{Тл} / \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Таблиця 4

№ вим. п/п	H	S_H	h_1	b_1	ρ	P_1

По даних таблиць 3 і 4 побудувати основну криву намагнічування $B = f(H)$, криву $\mu = f(H)$ та $P_1 = f(H)$.

II. Метод ватметра.

6. Опис установки

Метод ватметра використовується для визначення втрат в феромагнітних магнітом'яких матеріалах.

Для визначення втрат на змінному струмі найбільш широкого розповсюдження набув апарат Епштейна. Він складається з рами-основи з котушками, закріпленими на каркасі, який виготовлений з ізоляційного матеріалу та затискача для кріплення зразків сталі. Зразки виготовляються у вигляді пакетів з сталевих штаб довжиною 250 мм. і шириною 30 мм. Товщина пакета 20 мм. До складу апарату входить дві котушки: намагнічуюча та вимірювальна. Довжина котушок 190 мм, кількість витків $W_1 = W_2 = 600$. Намагнічуюча котушка створює магнітне поле, індукція якого змінюється від 1.0 до 1.8 Тл.

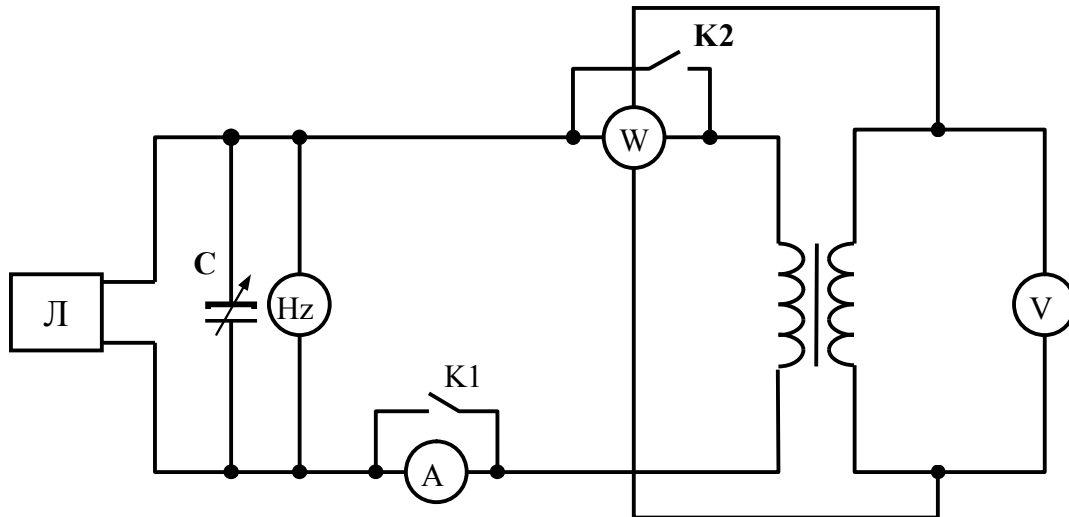


Рисунок 5.6. Електрична схема установки для вимірювання магнітних втрат методом ватметра.

Для випробування текстурованої електротехнічної сталі штаби нарізаються вздовж напрямку прокату. Якщо сталь не текстурована, то половина штабів нарізається вздовж напрямку прокату, а друга половина – поперек.

Електрична схема установки для вимірювання магнітних втрат наведена на рис. 5.6.

Апарат Епштейна з набраним і закріпленим зразком з електротехнічної сталі підключається до установки. В коло намагнічуючої обмотки W_1 включено амперметр А, струмова обмотка ватметра W, частотомір Hz та конденсатор С для компенсації реактивної потужності. У вторинну або вимірювальну обмотку включено вольтметр V, обмотка напруги ватметра W.

Покази ватметра визначають втрати в зразку. Для отримання однозначних результатів необхідно забезпечити режим синусоїдальності струму в W_1 обмотці.

Вимірювання втрат проводиться на певній частоті, контроль якої здійснюється частотоміром Hz. Напруга на первинній обмотці зразка змінюється в межах 100...220 В і регулюється за допомогою автотрансформатора Л.

7. Проведення вимірювань

1. Зібрати пакет із штаб електротехнічної сталі, вставити його в каркас з котушками і закріпити.
2. Зібрати електричну схему вимірювальної установки (рис. 9.6).
3. Включити установку в мережу змінного струму 220 В, 50 Гц через автотрансформатор. Виміряти магнітну індукцію В за допомогою приладу Щ 4310.
4. Встановити напругу на вторинній обмотці U_2 .
5. Замкнути ключ K_1 і записати покази ватметра W і вольтметра V.

6. При розімкнутому ключі K_1 виміряти значення сили намагнічуючого струму I_1 .
7. Результати вимірювань занести в таблицю 5.

8. Проведення обчислень

1. Розрахувати напругу U на вимірювальній обмотці при заданій амплітуді магнітної індукції B і частоті f :

$$U = \varepsilon - \Delta U' - \Delta U'' - \Delta U''',$$

$$\varepsilon = 4fSW_2B,$$

де ε – середнє значення е.р.с., індукованої в обмотці W_2 , В; $\Delta U'$ – поправка на потік в повітрі, В; $\Delta U''$ – градууювальна поправка до показів приладу, В; $\Delta U'''$ – поправка на спад напруги на активному опорі R_2 вимірювальної обмотки $\left(\Delta U''' = \frac{R_2}{R_{ек}} \varepsilon \right)$, В; f – частота змінного струму,

Гц; S – площа поперечного перерізу, м²; W_2 – число витків в вимірювальній обмотці; B – амплітуда магнітної індукції, Тл.; $R_{ек}$ – еквівалентний опір, Ом.

Якщо $(\Delta U' - \Delta U'' - \Delta U''') / \varepsilon < 0.2\%$, то поправки можна не враховувати, і тоді $U = \varepsilon$.

2. Втрати на перемагнічування визначаються за формулою:

$$P = \left(P_{вт} \frac{W_1}{W_2} - \frac{U_{еф}^2}{R_{ек}} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_{ек}} \right),$$

а втрати в приладах –

$$P_{пр} = \frac{U_{еф}^2}{R_{ек}}; R_{ек} = \frac{R_W \cdot R_V}{R_W + R_V},$$

де $P_{вт}$ – виправлене значення показів ватметра, Вт; W_1 і W_2 – число витків намагнічуючої і вимірювальної обмоток, $U_{еф}$ – діюче значення напруги на затискачах вимірювальної обмотки, В (по приладу V).

Якщо $R_2 / R_{ек} \leq 0.002$, то другим множником можна знехтувати.

3. Питомі втрати визначаються за формулою:

$$P = \frac{P}{m_{еф}},$$

де $m_{еф}$ – маса зразка, кг.

$$m_{еф} = \frac{ml_1}{l_{ш}},$$

де $l_{ш}$ – довжина штаби, м; l_1 – довжина магнітного шляху (при $f = 50$ Гц для нетекстурованої сталі – $l_1 = 0.232$ м, для текстурованої – $l_1 = 0.235$ м).

4. Напруженість магнітного поля обчислюється за формулою:

$$H = \frac{IW_1}{l_{ср}},$$

де $l_{ср}$ – середня довжина магнітної силової лінії, яка дорівнює $l_{ср} = l_0 + l_{дод}$, де $l_0 = 0.88$ для штаби довжиною 0.28 м, $l_{дод} = 0.03 \dots 0.11$ м для різних значень напруженості поля.

5. Повна питома потужність перемагнічування (Вт/кг) визначається за формулою

$$P = \frac{\sqrt{2}\pi fHB}{\gamma},$$

де f – частота змінного струму, Гц; H – діюче значення напруженості

магнітного поля, А/м; B – амплітуда магнітної індукції, Тл; γ – густина матеріалу, кг/м³.

6. Площа поперечного перерізу пакету (м²) визначаються за формулою

$$S = \frac{m}{4\gamma l_{ш}}.$$

7. Результати вимірювань та обрахунків занести в табл. 5.

Таблиця 5

№ п/п	Назва матеріалу	Магнітна індукція B , Тл	Напруга U , В	Е.Р.С. ε , В	Маса зразка m , кг	Напруга $U_{\text{еф}}$ на приладі V , В	Діюче значення струму I_d , А	Загальні втрати P на приладі W , Вт	Ефективна маса зразка $m_{\text{еф}}$, кг	Переріз зразка S , м ²	Напруженість поля намагнічуючої котушки H , А/см	Еквівалентний опір $R_{\text{ек}}$ приладів W і V , Ом	Втрати в приладах $P_{\text{пр}}$, Вт	Втрати в сталі $P_{\text{ст}} = P - P_{\text{пр}}$, Вт	Питомі втрати P , Вт/кг

9. Контрольні запитання

1. Яка фізична природа магнетизму?
2. На які групи поділяються магнітні матеріали? Якими властивостями і характеристиками вони відрізняються?
3. Які типи втрат в колі змінного струму спостерігаються в магнітних матеріалах?
4. Які існують методи зменшення втрат в електротехнічних сталях?
5. Пояснити принцип роботи електричної схеми вимірювальної установки.
6. Які основні характеристики магнітного матеріалу можна визначити з гістерезисного циклу?

Література

1. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали:[Навч. посібник.]/ Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. - Львів: "Магнолія 2006", 2008. - 242 с
2. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство : [підруч.] / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с.
3. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навч. посібник для ВНЗ. - Львів: Львівська політехніка, 2000. - 264 с
4. Маляр В. С, Шегедин О. І. Теоретичні основи електротехніки: Навч. посіб. - Львів: Магнолія плюс, 2004. - 172 с
5. Цветкова Л. Б., Романюк Л. 77. Органічна та неорганічна хімія. Частина II: Навч. посіб. - Львів: Новий світ-2000, 2007. -358 с
6. Мелехов Р. К, Похмурський В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. - К.: Наук, думка, 2003. - 182 с.

Зміст

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Визначення електричної міцності рідких діелектриків..... 3

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження електричних властивостей напівпровідників 12

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження електричних властивостей провідникових матеріалів 18

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження температурної залежності питомої електропровідності скла 23

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження властивостей магнітних матеріалів 26

ЛІТЕРАТУРА..... 37