

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні вказівки
до проведення лабораторних занять для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня за спеціальностями
015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)»,
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронний ресурс

Рецензенти:

В. М. Бурдейна – кандидат технічних наук, доцент кафедри мехатроніки та електротехніки Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет»;

К. Ю. Бровко – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

*Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол № 8 від 28 березня 2025 року)*

Електротехнічні матеріали : методичні вказівки до проведення лабораторних занять для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальностями 015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад. А. І. Тарасенко, Г. М. Мосієнко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – (PDF 52 с.)

Методичні вказівки до проведення лабораторних занять з дисципліни «Електротехнічні матеріали» містять загальні положення з кожної теми, порядок проведення експерименту та рекомендації щодо оброблення експериментальних даних.

Призначено для студентів, що навчаються за спеціальностями 015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.315.6

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, 2025

© Тарасенко А. І., Мосієнко Г. М., уклад., 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лабораторна робота № 1	
Дослідження параметрів та характеристик феромагнітних матеріалів	5
Лабораторна робота № 2	
Вимірювання опору діелектриків	24
Лабораторна робота № 3	
Визначення електричної міцності твердих діелектриків	36
ДОДАТКИ	45
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	51

ВСТУП

Лабораторні заняття є важливим елементом навчального процесу з курсу «Електротехнічні матеріали».

Метою лабораторного практикуму з курсу «Електротехнічні матеріали» є закріплення теоретичних знань, вивчення закономірностей впливу експлуатаційних факторів (стан зовнішнього середовища і параметри електричного поля), складу і структури матеріалів на їх властивості, технологій одержання електротехнічних матеріалів і областей їх застосування., а також комплексне розуміння електричних і магнітних властивостей, механічної міцності, старіння матеріалів і інших особливостей при використанні їх в енергетичному обладнанні.

Виконання лабораторної роботи для кожного здобувача вищої освіти передбачає чотири етапи: підготовка до роботи, виконання експерименту, обробка експериментальних даних та оформлення результатів дослідів, захист роботи. Для виконання та оформлення кожної роботи відводиться 4 академічних години.

Перш ніж приступити до вивчення опису лабораторних робіт, необхідно детально ознайомитися з додатками:

1. Правила виконання лабораторних робіт.
2. Правила безпеки в електротехнічній лабораторії.
3. Правила оформлення звітів з лабораторних робіт.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

1. Мета роботи

Дослідження параметрів та характеристик феромагнітних матеріалів за допомогою балістичного методу вимірювання; вивчення пристрою мілівеберметра; дослідження кривої намагнічування комутаційним способом.

2. Підготовка до роботи

Ознайомитись з загальними положеннями, підготувати схеми і таблиці для запису результатів досліджень.

Крім того, потрібно:

знати зміст, порядок виконання, основні теоретичні положення роботи, одиниці вимірювань електричних і магнітних величин;

вміти користуватися вимірювальними приладами, будувати графіки функцій за результатами експериментальних досліджень і проводити їхній аналіз.

3. Загальні положення

За допомогою магнітних вимірювань визначають основні характеристики, по яких можна судити про поведінку феромагнітного матеріалу в магнітному полі і його якості. Вони необхідні при розрахунку та проектуванні електричних машин, апаратів до інших електромагнітних пристроїв.

Розрізняють статичні і динамічні характеристики.

Статичними називають характеристики, отримані в постійних або повільно змінюючих полях (вони дозволяють судити про магнітні властивості

самого матеріалу та про правильність його технологічної обробки), *динамічними* - характеристики, отримані в змінних полях. Ці характеристики залежать не тільки від властивостей матеріалу, але і від таких параметрів, як форма і розміри зразка, товщина листа, форма кривої і частота поля, спосіб одержання та ін. Через це вони лише умовно можуть бути названі характеристиками матеріалу. Основними ж характеристиками є різні види магнітної проникності, а також магнітні втрати.

Феромагнітний матеріал характеризується тим, що при відсутності зовнішнього магнітного поля результуючий магнітний момент матеріалу внаслідок безладної орієнтації магнітних моментів окремих доменів дорівнює нулю. Якщо зразок з феромагнітного матеріалу помістити в магнітне поле, то він поляризується, тобто сам стає джерелом додаткового поля, тому що вектори магнітних моментів будуть орієнтуватися в напрямку прикладеного поля. Після припинення дії поля, що намагнічує, магнітний стан матеріалу відрізняється від первинного. Щоб уникнути цього феромагнітні матеріали перед випробуванням розмагнічують.

Найбільш повним є термічне розмагнічування, що складається в нагріванні матеріалу вище точки Кюрі (температура, при якій магнітний матеріал стає парамагнетиком) з наступним охолодженням при відсутності магнітного поля. Інший спосіб розмагнічування полягає в плавному зменшенні знакозмінного поля до нуля.

Основними статичними характеристиками феромагнітного матеріалу є початкова крива намагнічування, основна крива намагнічування й гранична петля магнітного гістерезису.

Якщо розмагнічений зразок помістити в магнітне поле, монотонно й повільно зростаюче від нуля до деякої максимальної величини напруженості поля H_{max} , то магнітний стан матеріалу буде змінюватися по так називаній початковій кривій намагнічування, яку можна представити у вигляді залежності

магнітної індукції або намагніченості від напруженості прикладеного магнітного поля.

На практиці частіше прийнято користуватися залежністю $B = f(H)$ (рис. 1). Початкова крива намагнічування може бути розбита на три основних ділянки. В області слабких магнітних полів магнітна індукція B майже пропорційна напруженості поля, що намагнічує. Називається вона областю початкової магнітної проникності. Слідом за прямолінійною ділянкою крива індукції робить різкий вигин і круто піднімається. Це ділянка максимальної магнітної проникності μ_{max} . Третя ділянка характеризується повільним підйомом кривої, що при більших значеннях напруженості магнітного поля переходить у похилу пряму лінію. Це область магнітного насичення, у якій намагніченість матеріалу досягає своєї межі, магнітна індукція збільшується за рахунок росту H , а магнітна проникність μ прагне до своєї межі - одиниці (при $H \rightarrow \infty$).

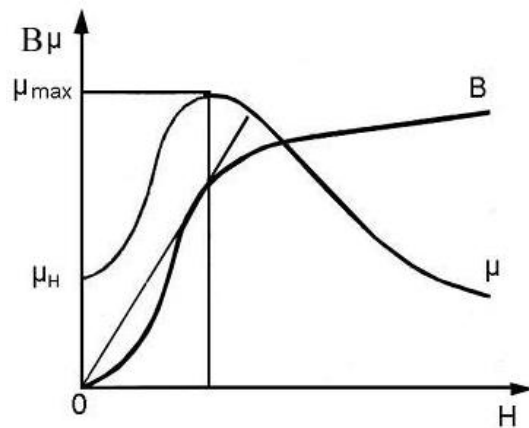


Рис. 1. Початкова крива намагнічування та залежність магнітної проникливості від напруженості магнітного поля

Якщо плавно змінювати напруженість поля від H_{max} до $-H_{max}$ й знову до H_{max} , то можна одержати симетричну петлю магнітного гістерезису (рис. 2).

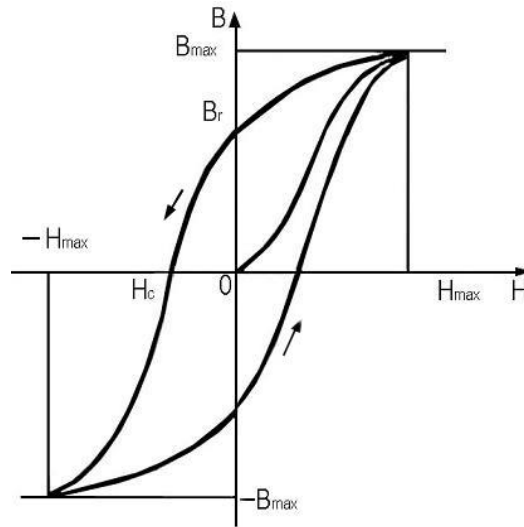


Рис. 2. Симетрична петля гістерезису

Для того щоб стабілізувати магнітний стан матеріалу, необхідно 8-10 разів змінити напруженість поля від H_{max} до $-H_{max}$ і назад. Петлю гістерезису, отриману після стабілізації магнітного стану, називають сталою - замкнутої. Кожному значенню поля, що H_{max} намагнічує, відповідає своя петля гістерезису. Змінюючи значення поля, що намагнічує, можна одержати сімейство гістерезисних петель для даного матеріалу. При деякому значенні H_{max} в області, близької до насичення, форма і розміри петлі при подальшому збільшенні вже не змінюються, ростуть лише її безгістерезисні ділянки. Така петля називається граничною. З її можна визначити залишкову індукцію B_r і коерцитивну силу по індукції H_{CB} .

Залежно від значення коерцитивної сили феромагнітні матеріали діляться на магнітом'які з $H_{CB} < 4$ кА/м і магнітотверді з $H_{CB} \geq 4$ кА/м.

Важливою характеристикою магнітотвердих матеріалів є максимальна питома магнітна енергія матеріалу, рівна $(BH/2)_{max}$.

Початкова крива намагнічування (див. рис. 1) застосовується в техніці для характеристики феромагнітних матеріалів рідко, звичайно користуються

основною кривою намагнічування, близької до початкової кривій, але яка має кращу відтворюваність, тому що вона менше залежить від умов досліду.

Основній кривій намагнічування називають геометричне місце вершин симетричних сталих петель магнітного гістерезису, одержуваних при послідовно зростаючих значеннях напруженості поля H_{max} . По ній можна визначити індукцію насичення, початкову μ_H і максимальну μ_{max} магнітну проникність.

При визначенні характеристик магнітних матеріалів використовують зразки цих матеріалів у вигляді замкнутих або розімкнутих магнітних кіл. Найбільш точним є визначення характеристик магнітних матеріалів у замкнутому колі зразка, що має форму кільця, тому що це виключає похибку у вимірюванні напруженості поля, викликувані наявністю повітряних ділянок кола.

Розповсюдженим методом випробування феромагнітних матеріалів є балістичний метод.

Він заснований на законі електромагнітної індукції, тобто на вимірюванні магнітного потоку через зразок при переході зразка з одного магнітного стану в інше.

Для вимірювання постійного магнітного потоку індуктивно-імпульсним методом застосовуються спеціальні вимірювачі магнітного потоку веберметри. Магнітоелектричний вимірювальний механізм веберметра відрізняється від звичайних тем, що в ньому відсутні протидіючі пружини, а струм до рухливої рамки підводить за допомогою "безмоментних" струмопроводів, тобто струмопроводів з незначним протидіючим моментом.

Якщо рамку веберметра з'єднати з вимірювальною котушкою, що охоплює вимірюваний потік, і змінити величину потокозчеплення, то по відхиленню рухливої частини приладу можна судити про величину вимірюваного потоку.

Прийнявши питомий протидіючий момент рівним нулю, рівняння руху рухливої частини магнітоелектричного веберметра запишемо у вигляді

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P_2 \frac{d\alpha}{dt} = BS \omega i, \quad (1)$$

де J - момент інерції тіла;

$\frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ - кутове прискорення рухливої частини;

$\frac{d\alpha}{dt}$ - кутова швидкість рухливої частини;

P_2 - коефіцієнт електромагнітного заспокоєння, що виникає внаслідок того, що в обмотці рамки веберметра при її русі індукують ЕРС, що (якщо тільки обмотка замкнута на деякий опір) створює в колі струм, що гальмує рух рамки;

B - магнітна індукція в повітряному зазорі магнітного кола вимірювального механізму;

S - площа обмотки рамки;

w - число витків обмотки;

i - струм у рамці.

При зміні магнітного потоку у вимірювальній котушці індукують ЕРС, що врівноважується активним та індуктивним спаданням напруги в колі веберметра, тобто

$$e = -w_k \frac{d\Phi}{dt} = ir + L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

де w_k - число витків вимірювальної котушки;

r - опір кола;

L - індуктивність кола.

Знайдемо із цього вираження струм i й, підставивши його значення в (1), одержимо

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P_2 \frac{d\alpha}{dt} = \frac{BSw}{r} \left(e - L \frac{di}{dt} \right). \quad (3)$$

Інтегруємо вираз (3) за проміжок часу від початку ($t=0$) до кінця ($t=t_1$) руху рухливої частини веберметра. Оскільки в моменти часу $t = 0$ й $t = t_1$ рухлива частина веберметра перебуває в стані спокою, перший член рівняння (3) після інтегрування за цей проміжок часу звернеться в нуль, а другий член рівняння буде дорівнює $P_2 \Delta \alpha$ (де $\Delta \alpha$ - зміну кута відхилення рухливої частини веберметра). Крім того, у початковий і кінцевий моменти часу струм $i=0$. Отже,

$$P_2 \Delta \alpha = \frac{BSw}{r} \int_0^{t_1} e dt = \frac{BSw}{r} \Delta \Phi_{w_\kappa},$$

де $\Delta \Phi$ - зміна потоку у вимірювальній котушці.

Враховуючи, що для веберметра коефіцієнт електромагнітного заспокоєння

$$P_2 = \frac{(Bw - S)^2}{r},$$

остаточно одержуємо

$$\Delta \alpha = \frac{w_\kappa}{BSw}, \quad \Delta \Phi = \frac{w_\kappa}{C} \Delta \Phi, \quad (4)$$

де C - стала веберметра, Вб/под.

Таким чином, відхилення показчика веберметра (4) пропорційно вимірюваному потоку і практично не залежить від опору його кола. Завдяки цій перевазі веберметр може мати градуйовану шкалу і не вимагає градуїровки перед вимірюванням подібно вимірюванню магнітного потоку за допомогою балістичного гальванометра. Однак це має місце, коли опір зовнішнього кола не перевищує припустимих значень, зазначених у технічному паспорті приладу. У міру збільшення опору вимірювальної котушки електромагнітне гальмування зменшується, а відносний вплив тертя об повітря і в опорах рухливої частини, яким зневажаємо при виводі рівняння (1), зростає, у результаті чого вираз (4) не виконується. Звичайно на шкалі веберметра вказується найбільше значення зовнішнього опору (не більше 20 Ом), при якому гарантується певна точність приладу. Перевагою веберметра в порівнянні з балістичним гальванометром є також те, що відхилення показчика веберметра в процесі вимірювання при незмінному потоці мало залежить від швидкості зміни потокозчеплення вимірюваного потоку з витками вимірювальної котушки, тобто відсутня методична похибка.

Розглянемо застосування веберметра для визначення кривої намагнічування $B=f(H)$ матеріалу.

На рис. 3 показана схема пристрою та включення веберметра. На випробуваний зразок 1, виконаний у вигляді тороїда (кільця), намотуються дві обмотки. До обмотки, що намагнічує, із числом витків w_1 підключене джерело струму, що намагнічує I , реостат r_p для регулювання цього струму, амперметр A , перемикач S_1 . До вимірювальної обмотки із числом витків w_1 підключений веберметр з коректором, що служить для установки стрілки веберметра на нуль перед вимірюванням. Якщо перемикач S_2 установити в положення K ("Коректор") і повернути головку 4 рухлива частини коректори, то в його

котушці 3 буде індукватися ЕРС і протікати струм, під дією якого рухлива котушка 2 веберметра повернеться в ту або іншу сторону.

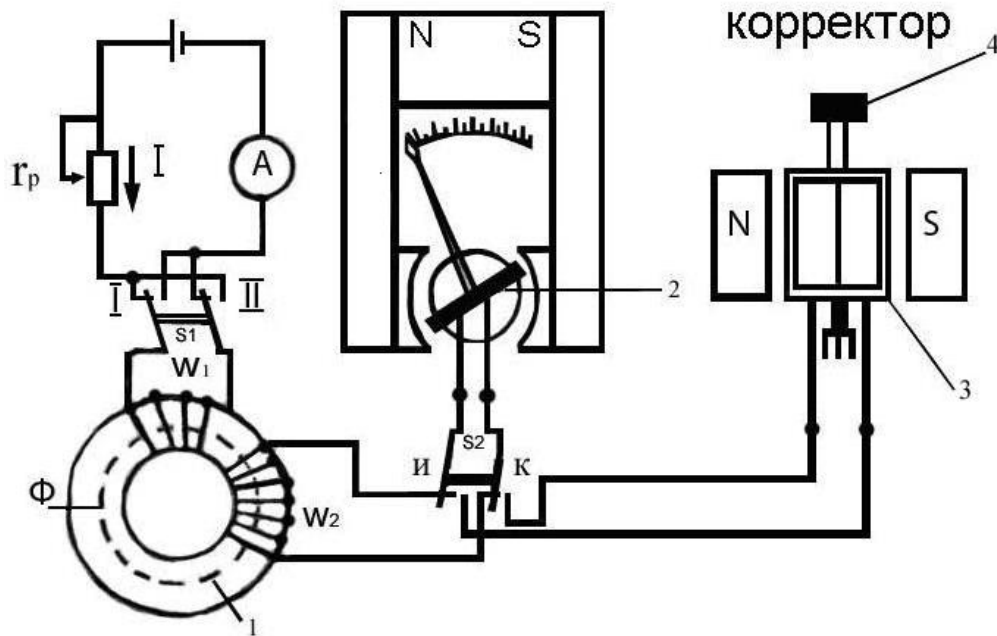


Рис. 3. Схема пристрою і включення веберметра

Зняття кривої намагнічування роблять у наступному порядку. Перемикач S_2 установлюють у положення K , коректором показчик веберметра - на нульову оцінку, а струм у котушці W_1 , який дорівнює I . Тоді на підставі закону повного струму напруженість магнітного поля усередині зразка

$$H = \frac{Iw_1}{\ell_{cp}}, \quad (5)$$

де $\ell_{cp} = 2\pi R_{cp}$ - середня довжина магнітної лінії в кільці;

R_{cp} - середній радіус, обумовлений як середньоарифметичне зовнішнього і внутрішнього радіусів кільця $(R_{вн} + R_{вн})/2$.

Чим більше відносна різниця між зовнішнім і внутрішнім радіусами, тим більше радіальна неоднорідність поля в зразку, оскільки щільність намотування усередині кільця більше. Так, при відмінності внутрішнього радіуса від зовнішнього на 10 і 20 % напруженість поля поблизу зовнішньої і внутрішньої поверхні кільця відрізняється відповідно на 5 і 10 %.

Щоб більш точно визначити радіус окружності, уздовж якого напруженість поля дорівнює середньоарифметичному максимальної і мінімальної напруженостей, треба замість середньоарифметичного радіуса використати середньо гармонічний.

$$R_{ср} = \frac{R_{вн} - R_{вт}}{\ln(R_{вн} / R_{вт})}.$$

Звичайно на практиці застосовують кільця зі співвідношенням $R_{вн}/R_{вт}=1/2$. Поперечний переріз кільця має форму кола або частіше квадрата.

Далі перемикач S_2 переводять у положення B ("Вимірювання"), а перемикач S_1 - з положення I у положення II . При цьому струм у котушці змінює свій напрямок на зворотне (з $+1$ на -1), що приводить до зміни магнітного потоку в тороїду на величину 2Φ . Під дією струму, індукованого в обмотці w_2 , рамка веберметра повернеться на деякий кут α . Відповідно до закону електромагнітної інерції Ленца замкнуте електричне коло прагне зберегти незмінним пов'язане з нею магнітне потокозчеплення. Тому рухлива котушка відхилиться на такий кут, при якому збільшення її потокозчеплення з потоком постійного магніту веберметра стане рівним зменшенню потокозчеплення $2\Phi_{w2}$ вимірювальні котушки, тобто

$$\alpha = \frac{2\Phi_{w_2}}{C}. \quad (6)$$

Балістична стала веберметра C визначається за допомогою зразкової котушки взаємної індуктивності в такий спосіб: вторинна обмотка підключається до рухливої котушки веберметра, а в первинній обмотці змінюється струм на деяку величину ΔI . У контурі вторинної обмотки котушки взаємної індуктивності і веберметра зміниться магнітний потік $\Delta\Phi = \mu\Delta I$.

Балістична постійна (Вб/под.), у цьому випадку може бути визначена за формулою:

$$C = M \frac{\Delta I}{\alpha}, \quad (7)$$

де M - взаємна індуктивність зразкової котушки, Гн;

ΔI - зміна струму в первинній обмотці взаємної індуктивності (у випадку перемикавання напрямку струму $\Delta I = 2 \cdot I$), А;

α — відхилення рухливої частини веберметра в поділках шкали.

Балістична постійна веберметра визначається при декількох значеннях струму в первинній обмотці котушки взаємної індуктивності. За дійсне значення постійної приймається середнє арифметичне.

Значення магнітної індукції у випробуваному зразку

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{C}{2Sw_2} \alpha, \quad (8)$$

де S - площа поперечного перетину тороїдального зразка;

w_2 - число витків вимірювальної котушки, намотаної на феромагнітний зразок.

По знайденому експериментально значенню магнітної індукції B та розрахунковому значенню напруженості H визначається відносна магнітна проникність матеріалу за формулою:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (9)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - абсолютна магнітна проникність повітря, Гн/м.

Повторюючи досліди при різних значеннях струму I , можна знайти залежності $B=f(H)$ і $\mu=f(H)$.

4. Прилади та обладнання

Експериментальне визначення статичних характеристик феромагнітних матеріалів виконують на установці (рис. 4), що живляться від блоку джерела постійного струму стенда УДЛС-1, що має наступні вихідні параметри:

$U = 0-30$ В, $I = 1$ А.

Обладнання експериментальної установки складається зі спеціальної панелі, на якій розміщений випробуваний зразок Столетова і змонтована схема, що складається з обмоток зразка матеріалу та зразкової котушки взаємної індуктивності, резисторів, перемикачів, магнітоелектричних міліамперметра і мілівеберметра.

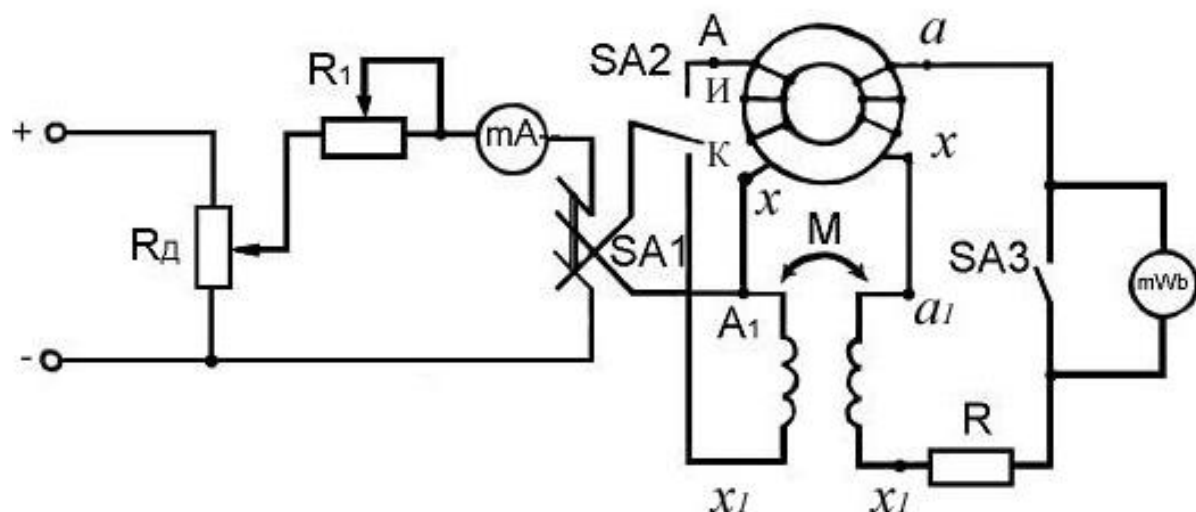


Рис. 4. Схема установки

Зразок Столетова являє собою тороїд перетином S і довжиною середньої лінії l_{cp} . На зразку є дві обмотки:, що намагнічує із числом витків w_1 і вимірювальна із числом витків w_2 . Значення цих параметрів наведені в додаткових вказівках на робочому місці.

Обмотка, що намагнічує, зразок Столетова і первинна обмотка Ax зразкової котушки взаємної індуктивності, одержують живлення від блоку постійної напруги стенда УДЛС-1 через перемикачі $SA1$ і $SA2$, регульований резистор R_1 , і дільник напруги R_d що дає можливість плавно змінювати струм, що намагнічує I , вимірюваний за допомогою міліамперметра mA .

Зміна потокозчеплення в зразку матеріалу й котушці взаємної індуктивності, що виникає при комутації струму I за допомогою перемикача $SA1$, реєструють мілівеберметром mWb , включеним в електричне коло, що складається з котушки взаємної індуктивності і обмежувального резистора R , послідовно з'єднаного з вимірювальною ax і вторинною a_1x_1 обмотками.

Режим роботи установки змінюють перемикачем $SA2$, що у положенні K ("калібрування") забезпечує визначення балістичної постійної мілівеберметра, а в

положенні B ("Вимірювання") - статичних характеристик феромагнітного матеріалу.

5. Засоби безпеки

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, що пройшли інструктаж з техніки безпеки, про що робиться запис у спеціальному журналі.

При виконанні лабораторної роботи необхідно дотримувати наступного правила техніки безпеки:

- не торкатися до труб водопроводу й опалювальної системи;
- не включати без дозволу вимірювальні прилади у мережу;
- не витягати блоки стенда;
- не залишати без нагляду включений стенд і прилади;
- негайно відключати живлення при виникненні несправностей;
- виключати живлення блоків стенда й вимірювальних приладів по закінченні роботи на стенді.

6. Порядок виконання роботи

Дослід 1. Визначення балістичної сталої мілівеберметра.

1. Ознайомитися із приладами й устаткуванням експериментальної установки, записати їх технічні характеристики.

2. Ввести реостат R_1 повністю, а ручку дільника напруги поставити в положення, що відповідає напрузі, яка підводиться до схеми установки.

3. Установити перемикач $SA2$ у положення K ("калібрування") і замкнути ключ $SA3$.

4. Після перевірки керівником правильності зібраної схеми установки включити блок джерела постійного струму й установити по міліамперметру mA за допомогою дільника напруги R_d і реостата R_1 струм $I = 0,2$ А.

Записати початкове положення індикатора мілівеберметра mWb (α_1), розімкнути ключ $SA3$, за допомогою перемикача $SA1$ змінити напрямок струму в котушці взаємодуктивності на протилежне і записати кінцеве положення індикатора мілівеберметра (α_2).

5. Проробити аналогічні досліди при значенні струму $I = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ А. Результати спостережень звести в табл. 1.

Таблиця 1

Експериментальні і розрахункові дані дослідів 1

Покази приладів			Результати обчислень	
міліамперметра	мілівеберметра		$\Delta\alpha$, под.	С, Вб/под.
I , А	α_1 , под.	α_2 , под.		

Дослід 2. Одержання кривої намагнічування комутаційним способом.

1. Розмагнітити випробуваний зразок. Для чого перемикач $SA2$ перевести в положення B ("Вимірювання") і при замкнутому ключі $SA3$ установити по міліамперметру mA струм, що намагнічує, $I = 0,6$ А. Зменшуючи поступово реостатом R_1 значення струму до мінімально можливого, одночасно перемикачем $SA1$ періодично змінювати напрямок струму, що перемагнічує.

2. Установити по міліамперметру mA струм $I = 0,025 A$ і виконати магнітну підготовку зразка. Для цього при замкнутому ключі $SA3$ за допомогою перемикача $SA1$ 8-10 разів прокомутувати струм, тобто змінити напрямок струму в обмотці, що намагнічує.

Записати початкове положення індикатора мілівеберметра mWb (α_1). Потім розімкнути ключ $SA3$ і знову змінити напрямок струму, що намагнічує, записуючи кінцеве положення індикатора мілівеберметра (α_2).

3. Проробити подібні вимірювання при значенні струму, що намагнічує, $I = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 A$.

Результати спостережень звести в табл. 2.

Таблиця 2

Експериментальні і розрахункові дані дослідів 2

Покази приладів			Результати обчислень			
міліамперметра	мілівеберметра		$\Delta \alpha$, под.	H , А/м	B , Тл	μ
I , А	α_1 , под.	α_2 , под.				

7. Обробка результатів експерименту

1. За даними табл. 1 визначити для кожного значення I різницю показань мілівеберметра $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$

2. Обчислити балістичну сталу мілівеберметра (Вб/под.), для кожного значення струму I

$$C = M \frac{\Delta I}{\alpha},$$

де $M = 0,001$ - взаємна індуктивність зразкової котушки, Гн;

$\Delta I = 2 \cdot I$ - зміна струму в первинній обмотка котушки взаємодуктивності.

Результати обчислень занести в табл. 1.

3. Визначити за даними табл. 1 середньоарифметичне значення балістичної сталої мілівеберметра C_{cp} ,

4. За даними табл. 2 визначити різницю показів мілівеберметра α .

5. Обчислити напруженість магнітного поля, А/м, для кожного значення струму

$$H = \frac{w_1 \cdot I}{l_{cp}},$$

де w_1 - число витків обмотки, що намагнічує;

l_{cp} - середня довжина магнітної лінії в зразку випробуваного феромагнітного матеріалу, м.

Результати обчислень занести в табл. 2.

6. Обчислити величину магнітної індукції зразка ($Tл$), для кожного значення поля, що намагнічує.

$$B = \frac{C_{cp}}{2Sw_2} \alpha,$$

де S - площа поперечного перерізу зразка м^2 ;

w_2 - число витків вимірювальної обмотки.

Результати обчислень занести в табл. 2.

7. Обчислити відносну магнітну проникність для кожного значення поля, що намагнічує

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна проникність повітря, Гн/м.

Результати обчислень занести в табл. 2.

8. За даними дослідів 2 побудувати $B = f(H)$ і $\mu = f(H)$

9 По залежності $\mu = f(H)$ визначити шляхом екстраполяції початкову магнітну проникність μ_H а також величину максимальної магнітної проникності μ_{max} , випробуваного зразка.

8. Висновки

За результатами проведених дослідів зробити наступні висновки:

- характер зміни основної кривої намагнічування випробуваного зразка;
- якість виконаного розмагнічування зразка;
- область магнітного насичення для досліджуваного матеріалу;
- вплив магнітного поля, що намагнічує, на величину відносної магнітної проникності матеріалу.

9. Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт про лабораторну роботу повинен містити:

- номер, найменування та мету лабораторної роботи, а також метрологічні характеристики засобів вимірювань, використовуваних у роботі;

- номер і найменування кожного досліджу;
- схеми, таблиці, графіки, основні розрахункові формули і результати розрахунків до кожного досліджу;

- короткі висновки за результатами кожного досліджу.

Схеми і графіки повинні бути виконані згідно ЄСКД і ДСТУ.

10. Питання для самоперевірки

1. Якими характеристиками визначаються властивості феромагнітних матеріалів?
2. Що називається основною кривою намагнічування?
3. Які характеристики феромагнітного матеріалу можна визначити по основній кривій намагнічування?
4. Яким образом розмагнітити зразок матеріалу і як це здійснити?
5. Що являє собою зразок Столетова для визначення статичних характеристик феромагнітних матеріалів?
6. Чому при знятті кривої намагнічування рекомендується комутувати струм в обмотці, що намагнічує зразок?
7. Чим відрізняється процес розмагнічування зразка від його магнітної підготовки?
8. Сутність балістичного методу дослідження феромагнітних матеріалів.
9. У чому перевага веберметра в порівнянні з балістичним гальванометром при вимірюванні постійного магнітного потоку індукційно-імпульсним методом?
10. За допомогою якого пристрою і яким чином визначається балістична стала веберметра?
11. Як визначається напруженість магнітного поля у середині зразка?
12. Як визначається величина магнітної індукції зразка при балістичному методі досліджень?
13. Що виражає відносна магнітна проникність?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ДІЕЛЕКТРИКІВ

1. Мета роботи

Метою роботи є вивчення методів вимірювання об'ємного і поверхневого опорів діелектриків за допомогою лабораторних схем і промислових приладів, а також дослідження залежності цих величин від зовнішніх факторів (напруги, температури, вологості та ін.)

2. Підготовка до роботи

Для успішного виконання лабораторної роботи студент повинен проробити матеріал конспекту з теми, повторити теоретичні положення по літературі, що рекомендується, ознайомитись з матеріалом, який приведено в методичних вказівках для проведення лабораторної роботи, підготувати схеми і таблиці для запису результатів вимірювань.

Крім того необхідно:

знати:

- мету і зміст роботи, порядок виконання дослідів, фізичну природу електропровідності твердих, рідких і газоподібних діелектриків;
- закономірності зміни електропровідності діелектриків при впливі зовнішніх факторів (величин електричного поля, температури, вологості);
- визначення і розмірності питомого об'ємного опору ρ_v , питомого поверхневого опору ρ_s , температурного коефіцієнта $TK\rho$;

вміти:

- користуватися універсальними цифровими приладами,
- аналізувати розподіл струмів у діелектрику при заданій формі досліджуваного зразка і вимірювальних електродів,

- робити обчислення, використовуючи метод графічного диференціювання.

3. Загальні положення

Електроізоляційний матеріал, який називається діелектриком – речовина, яка не проводить електричний струм. Однак практично його опір має кінцеве значення, тобто діелектрик в тій чи іншій мірі є провідником електричного струму та має певну електропровідність.

Але електропровідність діелектриків досить різко відрізняється по своїй фізичній сутності від електропровідності провідників і має в більшості випадків іонний характер.

У діелектрику має місце явище електричної абсорбції. Воно характеризується поступовим спаданням струму після включення діелектрика під постійну напругу. Ця зміна струму може протікати швидше або повільніше, в залежності від того, які види електричної поляризації характерні для діелектрика. Якщо діелектрику притаманні повільно протікаючі види поляризації, то струм абсорбції в такому діелектрику буде спадати повільно.

Тому, визначаючи при постійній напрузі провідність діелектрика по наскрізному струму, варто враховувати спадання струму абсорбції, і за величину наскрізного струму приймати струм, що встановився в діелектрику через визначений час. Для більшості електроізоляційних матеріалів цей час приймається рівним 1 хвилині. З цієї причини провідність діелектриків, обумовлена при змінній напрузі різних частот, була б різною. Тому для зіставлення величин провідності (опору) різних матеріалів, провідність визначається при постійній напрузі.

Позначивши опір діелектрика, що визначає величину наскрізного струму, через R_{i3} , можна написати:

$$R_{i3} = \frac{U}{i - i_{abc}}, \quad (1)$$

де U - прикладена напруга;

i - струм, що спостерігається (у будь-який момент часу);

i_{abc} - струм абсорбції.

Сталий струм у колі з діелектриком протікає як через об'єм діелектрика, так і по його поверхні, через що опір діелектриків R_{i3} розглядають складеним з об'ємного R_v та поверхневого R_s опорів.

Порівняльну оцінку різних діелектриків за ступенем їхньої електропровідності звичайно роблять по величинах питомого об'ємного ρ_v і питомого поверхневого ρ_s опорів, що при використанні плоских зразків матеріалу визначаються так:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h}, \quad (2)$$

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot B}{L}, \quad (3)$$

де R_v - об'ємний опір зразка, Ом;

S - площа вимірювального електрода, см²;

h - товщина зразка, см;

R_s - поверхневий опір зразка, Ом;

B - ширина електродів, см;

L - відстань між електродами, см.

Питомий об'ємний опір чисельно дорівнює опору куба досліджуваного матеріалу з ребром в 1 м, коли струми протікають між протилежними гранями цього куба.

Питомий поверхневий опір чисельно дорівнює опору квадрата досліджуваного матеріалу (будь-яких розмірів), коли струми протікають між протилежними сторонами цього квадрата.

Значення питомого об'ємного опору різних діелектриків коливається в широких межах: від 10^7 до 10^{17} Ом·м, питомий поверхневий опір може мати величину від 10^6 до 10^{18} Ом.

Для вимірювання об'ємного і поверхневого опорів діелектриків застосовуються різні методи, схеми і прилади в залежності від величини опору.

Для визначення опорів, що не перевищують 10^{11} - 10^{12} Ом, найчастіше застосовується метод безпосереднього відхилення, що ґрунтується на вимірюванні величини струму, що проходить через випробуваний зразок при відомій прикладеній напрузі. При опорах не вище 10^{13} - 10^{14} Ом використовується метод заряду конденсатора, а при величинах опорів 10^{14} - 10^{17} Ом і вище балістичний чи електрометричний метод.

В даній роботі розглядається тільки метод безпосереднього відхилення, за допомогою якого опір зразка знаходять як відношення величини напруги до величини струму. По опору і геометричному розміру зразка розраховують питомий об'ємний і питомий поверхневий опори.

Для розподілу об'ємного і поверхневого струмів при вимірюванні, застосовується система трьох електродів: високовольтного, вимірювального й охоронного. Охоронний електрод відводить поверхневий струм на «землю», який потрібно виключити з результатів вимірювання (рис. 1).

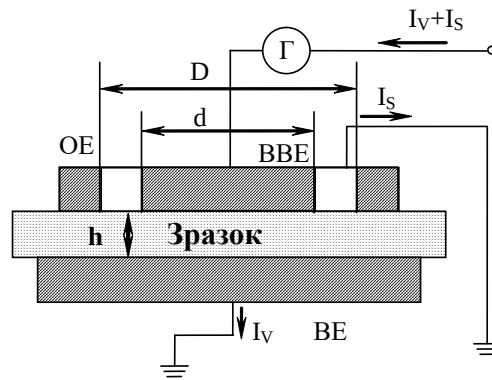


Рис. 1. Розміщення електродів на поверхні зразка

BBE – високовольтний електрод, BE – вимірювальний електрод, OE – охоронний електрод.

Поверхневий струм замикається на «землю» через охоронне кільце і гальванометр вимірює тільки об’ємний струм. Об’ємний струм замикається на «землю» через нижній електрод і гальванометр вимірює поверхневий струм.

Питомий об’ємний опір для зразка з плоскими електродами розраховується за формулою:

$$\rho_V = R_V \cdot \frac{S}{h} = \frac{U}{I_V} \cdot \frac{S}{h} = \frac{U}{I_V} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot h}, \quad (4)$$

де U - напруга , прикладена до зразка, В;

I_V - об’ємний струм, А;

S - площа вимірювального електрода, м²;

d - діаметр вимірювального електрода, м;

h - товщина зразка, м.

Для визначення питомого поверхневого опору можна використовувати таку ж систему електродів. Для розрахунку поверхневого опору за формулою (3) необхідно визначити відстань між електродами L і їх ширину B .

Розглянемо поверхневий опір діелектрика для випадку концентричних електродів.

Для кільця шириною dr з периметром $2\pi r$ (рис. 2).

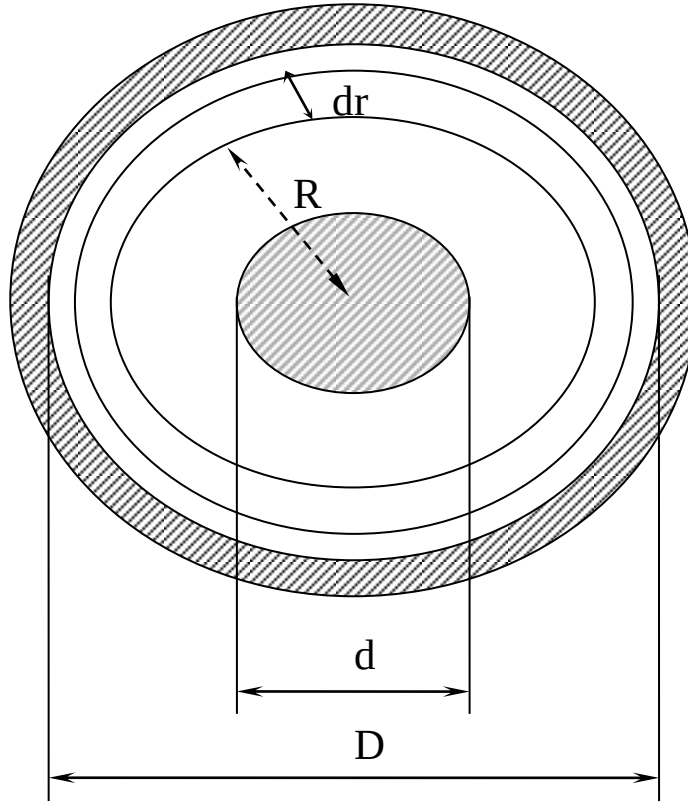


Рис. 2. Схема розміщення електродів

$$dR_s = \rho_s \cdot \frac{dr}{2\pi r},$$

$$R_s = \int_{d/2}^{D/2} \rho_s \cdot \frac{dr}{2\pi r} = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{d} = \frac{U}{I_s},$$

звідси

$$\rho_s = \frac{U}{I_s} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5)$$

Величина питомого поверхневого опору може бути обчислена і за наближеною формулою. Якщо прийняти у формулі (3)

$$B = \pi \cdot \frac{D+d}{2}, \quad l = \frac{D-d}{2},$$

то

$$\rho_s = \frac{U}{I_s} \cdot \pi \cdot \frac{D+d}{D-d} \quad (6)$$

4. Прилади та обладнання

В даній роботі, регульованим джерелом постійної високої напруги є універсальна пробійна установка, що живиться від мережі змінного струму напругою 220 В, основу якої складає високовольтний випрямляч з малим коефіцієнтом пульсацій (принципова схема використовуваної пробійної установки наведена на робочому місці).

Блок-схема установки наведена на рис. 3. З високовольтного випрямляча *ВВ* напруга подається на вимірювальні електроди, що разом з підігрівачем вміщено в захисну шафу, яка має блокування по високій напрузі.

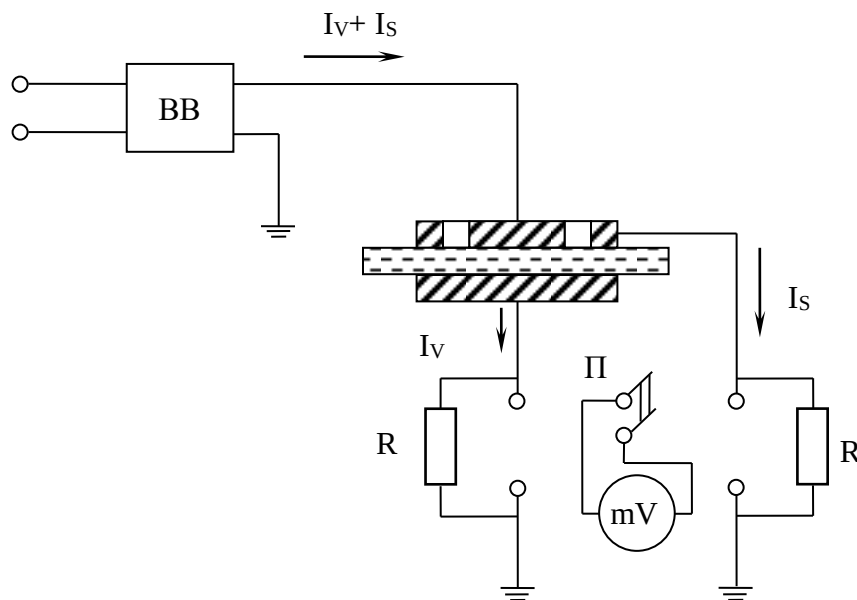


Рис. 3. Блок-схема установки

Для вимірювання струму витoku в колі електродів включені резистори $R = 10 \text{ МОм}$, напруга на яких вимірюється мілівольтметром і помножується на коефіцієнт $\frac{1}{R_E} = 2 \cdot 10^{-7}$ (вхідний опір мілівольтметра також дорівнює 10 МОм і включене паралельно вимірювальному резистору R).

За допомогою перемикача Π , мілівольтметр підключається в коло нижнього електрода при вимірюванні I_v та в коло охоронного кільця - при вимірюванні I_s . При знятті залежності $\rho_v = f(t^0)$ температура вимірюється за допомогою термопари, виводи якої розміщені на задній панелі захисної шафи. Крива градування термопари наведена на робочому місці.

5. Засоби безпеки

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки (відповідний запис в журналі з техніки безпеки).

При виконанні роботи необхідно дотримуватися наступних правил техніки безпеки:

- не доторкатися до труб водопроводу і опалювальної системи;
- не включати без дозволу вимірювальні прилади в мережу;
- не витягати блоки стенда;
- не залишати без нагляду підключені стенд і прилади;
- негайно відключати живлення при виникненні ушкоджень;
- виключати живлення блоків стенда і вимірювальних приладів по закінченню роботи за стендом.

Напруги, які застосовуються для живлення електричного кола, небезпеки для життя людини не представляють.

Всі джерела живлення забезпечені захистом від перенавантажень і короткого замикання. Однак слід враховувати, що тривалий вплив струму на елементі електричного кола, що досліджується, може привести до їх непридатності. Тому, вмикати блок живлення в мережу рекомендується тільки на той час, який необхідно для отримання показів з вимірювальних приладів і запису їх в лабораторний звіт.

Після закінчення роботи всі вимірювальні прилади і блок живлення стенду повинні бути вимкнені.

6. Порядок проведення роботи

Дослід 1. Зняти залежність питомого об'ємного ρ_v і питомого поверхневого ρ_s опорів від напруги для декількох зразків діелектриків. Межі зміни напруги і число зразків задаються керівником.

Помістити зразок між електродами, попередньо записати товщину зразка і розміри електродів, зазначені на робочому місці.

Закрити блокувальний щиток захисної шафи. Ручки регулювання напруги

пробійної установки і ручки ЛАТРа поставити в положення "О".

У присутності керівника включити напругу на вимірювальну схему.

Натиснути кнопку "Включення" і ручкою регулювання напруги установити потрібну напругу по вольтметру високовольтного випрямляча. Напруга на вимірювальні електроди подається тільки при натиснутій кнопці "Включення" і закритому блокувальному щитку захисної шафи. Перемикач Π для вимірювання I_v та I_S дає можливість, не змінюючи схеми, вимірювати I_v і I_S . Змінюючи напругу на виході високовольтного випрямляча $ВВ$, зняти залежності $I_v = f(U)$ та $I_S = f(U)$. Результати занести в табл. 1.

Таблиця 1

Найменування діелектрика, його товщина, м	Експериментальні дані			Результати обчислень	
	U , В	I_v , А	I_S , А	ρ_v , Ом·м	ρ_S , Ом

Вихідні дані електродів:

	d	=	м
	D	=	м
Температура	t	=	$^{\circ}\text{C}$
Відносна вологість			%

Дослід 2. Зняти залежність питомого об'ємного опору від температури для декількох зразків твердого діелектрика. Число зразків і точок, що визначаються, межі зміни температури і напруги, при якій проводиться вимірювання, задаються керівником.

Відключити високу напругу і помістити вимірювальні електроди з дослідним зразком в нагрівач.

Установити постійну напругу і, змінюючи температуру в межах зазначених на робочому місці, зняти залежність $I_v = f(t^0)$.

Результати вимірювань та розрахунку занести в табл. 2.

Таблиця 2

Найменування діелектрика, його товщина, см	Експериментальні дані		Результати обчислень	
	t^0 , С	I_v , А	ρ_v , Ом·м	$TK\rho$, град

7. Обробка результатів експерименту

Обчислення питомого об'ємного ρ_v і питомого поверхневого ρ_s опорів при температурі навколишнього середовища виконуються за формулами (4, 6). Знайдені значення зазначених питомих опорів відповідно записати в табл. 1.

Питомий об'ємний опір ρ_v при постійній прикладеній напрузі U , але при різних температурах, обчислюється за формулою (4) і записується в табл. 2.

Методом графічного диференціювання кривої $\rho_v = f(t^0)$ визначити значення температурного коефіцієнта питомого об'ємного опору $TK\rho$ для випробуваних діелектриків у заданому діапазоні температур*.

* Допускається позначати температурний коефіцієнт $TK\rho$ як α_ρ .

8. Висновки

Надати короткий опис методу визначення питомого об'ємного і питомого поверхневого опорів. Побудувати графіки залежностей: $\rho_v = f(U)$, $\rho_s = f(U)$, $\rho_v = f(t^0)$, $TK\rho = f(t^0)$.

9. Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт про виконану роботу оформляє кожен студент в зошиті у клітину або на листах формату А4. В ньому необхідно відобразити наступний матеріал: назву роботи, мету її виконання; перелік устаткування та приладів; схему досліджуваного електричного кола; таблиці з експериментальними даними та результатами розрахунків; розрахункові формули та необхідні числові розрахунки; графіки резонансних характеристик; висновки з роботи.

Схеми, таблиці, графіки слід виконувати акуратно, з використанням інструментів для креслення у відповідності з вимогами ЄСКД.

Студент, який виконав роботу і правильно оформив звіт, після співбесіди з викладачем отримує відмітку про захист даної лабораторної роботи на звіті та в лабораторному журналі.

10. Питання для самоперевірки

1. Чому прийнято визначати опір діелектрика при постійній напрузі?
2. Чому вимірювання струмів повинно виконатися через 1 хвилину після подачі напруги на зразок?
3. Як позначиться на результатах обчислення питомого об'ємного опору відсутність заземлення охоронного кільця на досліджуваному зразку?
4. Якими методами визначається опір діелектрика?
5. У чому полягає відмінність в електропровідності твердих діелектриків у слабких та сильних електричних полях?
6. Чим пояснюється залежність питомого об'ємного і питомого поверхневого опорів від прикладеної напруги і температури?
7. Чому зі збільшенням часу витримки діелектрика під напругою опір його знижується?
8. Які фактори впливають на величину поверхневого опору діелектрика?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

1. Мета роботи

Вивчення методики визначення електричної міцності твердих діелектриків. Дослідження залежності електричної міцності від ряду факторів (товщини діелектрика, виду напруги, часу випробувань площі і форми електродів).

2. Підготовка до роботи

Підготовка до лабораторної роботи включає проробку теоретичного матеріалу з розділу «Пробій діелектриків».

В результаті підготовки до лабораторної роботи студент повинен

знати:

- мету і зміст роботи, порядок виконання дослідів;
- визначення напруги пробою, електричної міцності та напруженості перекриття;
- вплив різних факторів на електричну міцність твердих діелектриків;
- закономірності електричного виду пробою твердих діелектриків;
- види випробувань електроізоляційних матеріалів на електричну міцність;

вміти:

- користуватися універсальною пробійною установкою;
- проводити розрахунок електричної міцності E_{np} і напруги пробою U_{np} для неоднорідних ділянок ізоляції;
- застосовувати теоретичні положення при аналізі результатів досліджень твердих діелектриків.

3. Загальні положення

У сучасній електротехніці знайшли застосування найрізноманітніші види твердих діелектриків. Однак усі вони підлягають загальним законам, що визначають їхню електричну міцність.

Найбільш характерною особливістю твердих діелектриків, яка відрізняє їх від рідких і газоподібних діелектриків, є втрата ними після пробою електроізоляційних властивостей.

Порушення електричної міцності твердих діелектриків може бути наслідком його пробою як крізь об'єм, так і по поверхні. Пробій поверхнею зазвичай називають поверхневим перекриттям діелектрика. Якщо пробій крізь об'єм, в основному, визначається будовою діелектрика, то розряд по його поверхні залежить не тільки від властивостей самого матеріалу, але і від стану його поверхні, а також навколишнього середовища.

Під пробоем твердого діелектрика мається на увазі процес порушення електричної міцності в його об'ємі – утворення наскрізного провідного каналу від електроду до електроду.

Звичайно для найпростішого випадку під електричною міцністю мається на увазі така величина напруженості електричного поля E_{np} , при якій діелектрик втрачає свої електроізоляційні властивості, тобто пробивається. З величиною пробивної напруги U_{np} і товщиною діелектрика h пробивна напруженість зв'язана співвідношенням

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h} \left[\frac{\kappa B}{мм}, \frac{MB}{м} \right],$$

яке є справедливим для випадку, коли електричне поле в діелектрику однорідне.

Крім хімічної будови, на величину E_{np} твердих діелектриків впливає його фізична структура. Матеріали пористої і неоднорідної будови, як правило, мають знижену величину E_{np} , але будучи просоченими електроізоляційними речовинами, у багато разів збільшують свою електричну міцність. Так наприклад, кабельний папір у не просоченому стані має електричну міцність порядку 3-5 кВ/мм, а в просоченому – 40-80 кВ/мм.

Для забезпечення надійності роботи діелектриків їхня робоча напруга $U_{роб}$ повинна бути значно нижче пробивної напруги U_{np} . Відношення $\frac{U_{np}}{U_{роб}}$ називається коефіцієнтом запасу електричної міцності і для кожного виду діелектрика встановлюється в залежності від його фізико-хімічних властивостей і умов роботи.

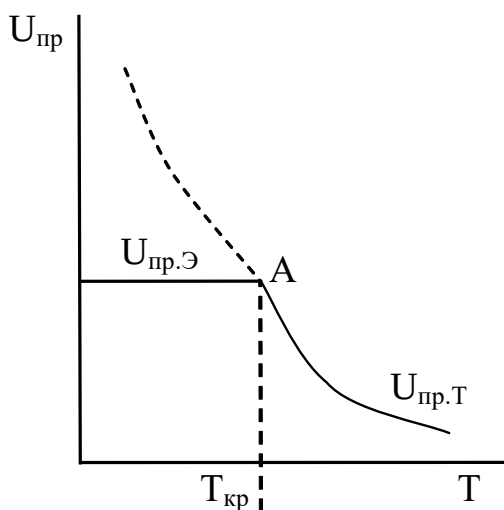


Рис. 1. Залежність пробивної напруги від температури

На величину електричної міцності твердих діелектриків істотно впливає температура. На рис. 1 приведена залежність пробивної напруги від температури. Характерний злам кривої в точці А властивий усім твердим

діелектрикам (для кожного при своїй температурі). Із графіка видно, що при низьких температурах U_{np} не залежить від температури, тобто тут відбувається електричний пробій. Вище деякої критичної температури відбувається різке зниження U_{np} і звідси вже починається розвиток теплового пробою. При визначенні форми пробою, властивих випробуванню діелектрикам, варто мати на увазі, що відмінності в їхніх видах характерні лише для початкової стадії розвитку процесу, тому не слід визначати форму після пробою зразка. В усіх випадках місце пробою у твердому діелектрику (кратер) являє собою пропалений чи обвуглений слід, внаслідок впливу на матеріал електричної дуги.

Наступним важливим фактором, що по різному позначається при електричному і тепловому пробі, є форма електричного поля. Електричний пробій, як процес чисто електричний, залежить від величини і форми електричного поля. Тепловий пробій визначається величиною струму, а струм залежить від прикладеної напруги й електропровідності діелектрика, через що в цьому випадку не доводиться очікувати будь-якої значної залежності пробивної напруги від величини напруженості електричного поля і його форми.

Час дії напруги і швидкість її росту також впливають на результати визначення електричної міцності. З цього погляду розрізняють короткочасне, хвилинне і тривале випробування. Під короткочасним випробуванням розуміють звичайно таке випробування, при якому виробляється плавне зростання напруги зі швидкістю приблизно 1 кВ/с. При цьому визначається короткочасна електрична міцність.

При хвилинному випробуванні до зразка швидко прикладається напруга, свідомо нижча, ніж пробивна. Ця напруга діє одну хвилину. Потім, підвищуючи напругу на 10%, щораз повторюємо витримку, доводячи такими

ступенями величину напруги до пробою. Це випробування дає значення однохвилинної електричної міцності.

При тривалому випробуванні на зразок подається спочатку напруга, що дорівнює половині пробивної (при короткочасному випробуванні), потім через кожні 30 хвилин напруга збільшується ступенями в 5% до пробою діелектрика.

4. Обладнання і прилади

В роботі як регульоване джерело високої напруги використовується універсальна пробивна установка УПУ, що живиться від мережі змінного струму напругою 220 В. Основу цієї установки складає підвищуючий трансформатор, високовольтний випрямляч з малим коефіцієнтом пульсацій (повна схема установки УПУ та інструкція з користування представлені на робочому місці).

Блок-схема випробувальної установки наведена на рис. 2. Випробуваний зразок 4 міститься між випробувальними електродами 2 і 3, що знаходяться в захисній шафі 5. Передній щиток шафи має блокування по вхідній напрузі (установка включається тільки при закритому передньому щитку). Випробувальні електроди підключаються до вихідних затискачів "+" "-" або "~" УПУ в залежності від роду обраної напруги.

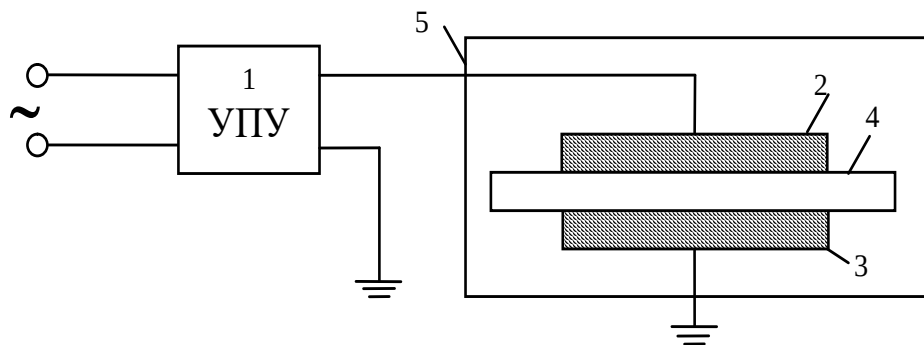


Рис. 2. Блок-схеми випробувальної установки

5. Засоби безпеки

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, що пройшли інструктаж з техніки безпеки, про що робиться запис у спеціальному журналі.

При виконанні лабораторної роботи необхідно дотримувати наступного правила техніки безпеки:

- не торкатися до труб водопроводу й опалювальної системи;
- не включати без дозволу вимірювальні прилади у мережу;
- не витягати блоки стенда;
- не залишати без нагляду включений стенд і прилади;
- негайно відключати живлення при виникненні несправностей;
- виключати живлення блоків стенда й вимірювальних приладів по закінченні роботи на стенді.

6. Порядок виконання роботи

Дослід 1. Визначення залежності електричної міцності твердого діелектрика від його товщини.

Тип діелектрика і його товщина задаються керівником.

Помістити діелектрик між електродами і, плавно підвищуючи напругу, визначити пробивну напругу не менш ніж у трьох місцях для кожної товщини діелектрика. За даними дослідів визначаються середні значення пробивних напруг і напруженості для кожної товщини діелектрика.

Пробій фіксується за показами вольтметра і загорянню індикаторної лампочки. Дані експерименту заносяться в табл. 1.

Таблиця 1

Найменування діелектрика	Від напруги	Середня товщина діелектрика h , мм	Значення пробивної напруги				Абсолютне відхилення				Відносне відхилення	Пробивна напруженість $E_{пр}$, кВ/мм
			U_1 , кВ	U_2 , кВ	U_3 , кВ	$U_{ср}$, кВ	Δ_1 , кВ	Δ_2 , кВ	Δ_3 , кВ	$\Delta_{ср}$, кВ	δ , %	

Середня пробивна напруга визначається як середнє арифметичне значення всіх напруг, які отримали в кожному експерименті. Абсолютне відхилення значень пробивної напруги визначається як різниця між середнім значенням і кожним із трьох значень пробивної напруги для кожної товщини діелектрика. Відносне відхилення визначається відношенням середнього абсолютного відхилення до середнього значення пробивної напруги.

Дослід 2. Визначення середньої напруженості перекриття.

Помістити зразок твердого діелектрика (конденсаторний папір, пластинка скла чи ізоляційна плівка) так, щоб відстань між електродами, виміряне по поверхні діелектрика, складала 1, 2, 3, 5, 7 мм. При цих відстанях визначити напругу перекриття при постійній і змінній напругах. Результати досліджень звести в табл. 2.

Таблиця 2

Вид напруги	Відстань L , мм	Напруга перекриття U_n , кВ	Напруженість перекриття E_n , кВ/мм

При проведенні дослідів звернути увагу на явища, що передують перекриттю (явище корони).

7. Обробка експериментальних даних

За даними табл. 1 визначити абсолютне та відносне відхилення пробивної напруги:

$$\Delta_n = U_{cp} - U_n$$

$$\delta = \frac{\Delta_{cp}}{U_{cp}} \cdot 100\%$$

Побудувати графіки залежностей $U_{np} = f(h)$, $E_{np} = f(h)$.

За даними табл. 2 побудувати графіки $U_n = f(L)$, $E_n = f(L)$.

8. Вказівки по складанню звіту

Звіт про лабораторну роботу повинен містити:

- номер, найменування та мету лабораторної роботи, а також метрологічні характеристики засобів вимірювань, використовуваних у роботі;
- номер і найменування кожного досліду;
- схеми, таблиці, графіки, основні розрахункові формули і результати розрахунків до кожного досліду;
- короткі висновки за результатами кожного досліду.

Схеми і графіки повинні бути виконані згідно ЄСКД і ДСТУ.

9. Питання для самоперевірки

1. У чому суть електричної і теплової форм пробою твердих діелектриків?
2. Як експериментально установити ту чи іншу форму пробою твердих діелектриків?
3. Чим пояснити нелінійність зміни U_{np} при збільшенні товщини твердого діелектрика?
4. Чому зі збільшенням площі електродів можливе зменшення пробивної напруги діелектрика?

5. Які умови варто дотримувати при електричній формі пробою для одержання найбільш близьких до істини значень пробивної напруги?

Правила виконання лабораторних робіт

За час чотиригодинного заняття студенти повинні виконати лабораторну роботу, оформити звіт і здати залік з даної роботи. Зазначена програма може бути реалізована тільки в тому випадку, якщо студенти відповідним чином будуть підготовлені до заняття. Тому спочатку проводиться допуск до лабораторної роботи. Студенти, що не одержали допуск, усуваються від виконання даної роботи. Перед початком циклу лабораторних робіт навчальна група поділяється на бригади з 2-3 чоловік, за кожною з яких на час навчального семестру закріплюється стенд УДЛС-1 під порядковим номером від 1 до 10, комплект елементів за тим же номером і набір вимірювальних приладів. Перехід студентів з однієї бригади в іншу протягом семестру, зміна стенда, комплекту елементів або приладів, закріплених за стендом, категорично заборонені.

До кожного лабораторного заняття студенти повинні готуватися завчасно, попередньо ознайомившись з описом роботи, повторивши відповідний теоретичний матеріал за конспектом лекцій і за рекомендованою літературою і частково заготовивши звіт з лабораторної роботи. Заготовка звіту повинна містити схеми дослідів, таблиці для занесення експериментальних і розрахункових даних, формули, необхідні для розрахунків, і міліметровий папір, на якому нанесені координатні осі для побудови графіків. Студенти, що не мають заготовок звіту чи не підготовлені теоретично, до роботи не допускаються.

Перед виконанням роботи кожна бригада студентів повинна одержати у викладача набір елементів до свого стенда і перевірити відповідно до опису на кришці шухляди комплектність набору. У випадку невідповідності складу набору опису, необхідно сповістити про це викладачу. По закінченні роботи на стенді всі елементи необхідно вставити у відповідні гнізда, провідники акуратно укласти в

правий відсік шухляди і, переконавшись у комплектності, здати набір викладачеві.

Студенти зобов'язані дбайливо ставитися до лабораторних стендів і вимірювальних приладів. Категорично забороняється робити позначки і написи на блоках стенда, набірному полі і вимірювальних приладах. Забороняється без необхідності перемикати тумблера, крутити ручки стенда УДЛС-1 і вимірювальних приладів. Під час роботи студенти несуть повну відповідальність за збереженість і справність устаткування.

Заняття повинні проводитися у творчій діловій атмосфері при дотриманні порядку і тиші в лабораторії.

Під час перерви слід припинити роботу на стенді, виключити його блоки, вимірювальні прилади і провітрити приміщення. Староста групи поряд із викладачем несе відповідальність за підтримку дисципліни й порядку при проведенні робіт у лабораторії.

Експериментальні дані заносяться в чернетку і пред'являються викладачеві наприкінці кожного досліду. У випадку одержання невірних результатів досліди повторюються. Після перевірки правильності результатів усіх дослідів викладач робить відмітку про виконання роботи, а студенти приступають до оформлення й здачі звіту.

У випадку, якщо студент не встиг оформити звіт, він повинний представити його на наступному занятті для здачі викладачеві при співбесіді. Якщо звіт оформлений правильно і викладач переконується в розумінні студентом сутності роботи, методики одержання результатів і вірності інтерпретації отриманих даних, робота зараховується. Пропущені, незакінчені чи невірно виконані роботи відпрацьовуються в дні, погоджені з викладачем.

Правила безпеки в електротехнічній лабораторії

До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, що пройшли інструктаж із правил техніки безпеки з наступним записом про це в спеціальному журналі. На передню панель стенда УДЛС-1 виведені напруги, що не становлять небезпеки для життя людини. Усі джерела живлення мають захист від перевантажень. Тому зборку, перевірку й включення електричних кіл студенти проводять самостійно.

Однак слід враховувати, що все устаткування лабораторії, включаючи стенди і вимірювальні прилади, підключено до мережі живлення 380/220 В. У зв'язку з цим слід дотримуватися наступних правил безпеки.

1. При роботі зі стендами забороняється:

- доторкатися до труб водопроводу й опалювальної системи;
- самостійно включати вимірювальні прилади у мережу;
- відключати заземлення вимірювальних приладів;
- класти на стенди сумки, портфелі, одяг і т.п.;
- виймати блоки стенда;
- ремонтувати блоки стенда і вимірювальні прилади;
- самостійно змінювати запобіжники;
- залишати без нагляду включений стенд і вимірювальні прилади.

2. У випадку ушкодження блоків стенда чи вимірювальних приладів слід негайно відключити їх від мережі живлення і сповістити про це керівника.

3. По закінченні роботи на стенді необхідно виключити живлення всіх активних блоків стенда і вимірювальних приладів.

4. Якщо в лабораторії стався нещасний випадок, слід негайно відключити живлення лабораторії, надати потерпілому першу допомогу і повідомити про те, що трапилося, керівника.

Правила оформлення звітів з лабораторних робіт

Звіт виконується або на спеціальному бланку, або на аркушах папера формату А4 (210 x 297). Для звіту можна використовувати розгорнуті аркуші учнівських зошитів, укорочені до установленого формату. На титульному листі вказується: назва академії, кафедри, номер та найменування лабораторної роботи, прізвище та група студента, прізвища студентів, разом із якими була виконана робота, номер стенда, дата виконання та прізвище керівника. Аркуші звіту заповнюються тільки з однієї сторони й акуратно зшиваються або склеюються.

Звіт повинен містити: ціль роботи, перелік використовуваних приладів і блоків, опис дослідів і висновки за результатами роботи. Опис дослідів рекомендується проводити в такому порядку:

- назва (ціль) дослідів;
- схема дослідів;
- таблиці результатів вимірів і обчислень;
- обробка експериментальних даних і необхідні розрахунки;
- графіки, діаграми, рисунки;
- висновки з дослідів.

При написанні звіту слід залишати поля: ліворуч - 25 мм, праворуч - 10 мм, зверху й знизу - по 20 мм. Звіт повинен бути написаний чітко й акуратно.

Математичні символи дозволяється застосовувати тільки разом із цифровими значеннями чи літерними позначеннями.

Наприклад, $\sin 45^\circ$, $\lg n$, $\arctg \frac{b}{a}$ і т.п.

Розмірність величин вказується тільки після числових значень, у

заголовках таблиць і на графіках. У тексті розмірність величин дається без скорочень прописом.

При записі експериментальних даних і в процесі розрахунків слід користатися не тільки основними, але і додатковими одиницями вимірів для того, щоб числові значення використовуваних величин знаходилися в межах від 0,01 до 1000. Нижче наведені приклади правильного і неправильного запису.

Правильно	Неправильно
2 мГн	0,002 Гн
0,13 мА	0,00013 А
0,05 мкФ	50000 пФ
$7 \cdot 10^{-3}$ В (7 мВ)	0,007 В

При обробці дослідних даних і проведенні розрахунків слід чітко уявляти точність обмірюваних, вихідних даних і параметрів елементів для того, щоб число значущих цифр визначалося межами похибок величин, що входять у розрахунки. Наприклад, $U = 13,6\text{В}$, $I = 20,5\text{мА}$, тоді розрахунковий опір буде

$$R = \frac{13,6}{20,5 \cdot 10^{-3}} = 663,41 \text{ Ом}.$$

На підставі вихідних даних необхідно округлити: $R = 663 \text{ Ом}$.

Запис результатів розрахунку слід робити так, щоб усі значущі цифри були вірні і лише остання цифра може мати похибку, що не перевершує одну-дві одиниці того розряду, у якому вона знаходиться. При цьому слід користатися наступним правилом. Цифра якого-небудь розряду наближеного числа вважається вірної, якщо це число має абсолютну похибку не більше половини одиниці цього розряду; якщо ж похибка більше половини якого-небудь розряду, то цифра цього розряду й цифри наступних розрядів вважаються сумнівними. Якщо не зазначена похибка числа, то вважається, що цифри цього числа вірні, а

гранична абсолютна похибка його дорівнює половині одиниці останнього розряду. Наприклад, абсолютна похибка числа 27,33 мА складає $\pm 0,005$ мА, 27,3 мА - $\pm 0,05$ мА, 27 мА - $\pm 0,5$ мА.

Схеми повинні виконуватися олівцем за допомогою креслярських приладь і відповідно до вимоги ЄСКД.

Графіки повинні виконуватися на міліметровому папері, розмір якого відповідає формату А4. Координатні осі без стрілок повинні мати масштабні шкали, при цьому число одиниць виміру в 1 см повинно виражатися числами $(1,2 \text{ чи } 5) \cdot 10^n$ де n - будь-яке ціле число. Позначення величини, що відкладається за віссю абсцис, указується над віссю, а її розмірність - під віссю абсцис. Позначення величини, що відкладається за віссю ординат, указується праворуч, а її розмірність - ліворуч від осі ординат.

Експериментальні точки наносяться на графіки наступними умовними знаками: $\cdot$, $\times$, Δ , $\square$, $\bigcirc$ і т.п. Необхідно пам'ятати, що всі експериментальні точки мають цілком визначені похибки вимірів, у зв'язку з чим при побудові графіків слід робити графічне усереднення. При цьому лінії графіків можуть і не проходити через експериментальні точки. Якщо на одному графіку необхідно розмістити кілька кривих, що представляють функції одного аргументу, то будується ряд осей ординат, на яких указуються відповідні масштаби.

Таблиці повинні бути накреслені під лінійку за зразками, які наведені в інструкції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електротехнічні матеріали: Курс лекцій. Частина 1. Діелектричні матеріали. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка за освітніми програмами ««Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини й апарати», «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Управління, захист та автоматизація енергосистем» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Кириленко, К.В. Кириленко. В.М. Головка. – Електронні текстові дані (1 файл 6,698 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45608/1/Dielektrychni_materialy-1.pdf

2. Електротехнічні матеріали: навч. посібн. / А.С. Головченко, Д.В. Ципленков, А.А.Колб, А.В. Ніколенко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» - Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 184 с.

3. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонтєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Тарасенко Анатолій Іванович
Мосієнко Ганна Миколаївна

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні вказівки
до проведення лабораторних занять для здобувачів вищої освіти
першого (бакалаврського) рівня за спеціальностями
015.33 «Професійна освіта (Енергетика, електротехніка та електромеханіка)»,
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 28.03.2025. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 2,99. Обсяг 16.645. Зам. № 135/25.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна