

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з курсу

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

*(для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання бакалаврів
за напрямами 6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та 6.050702 – Електромеханіка)*

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Електротехнічні матеріали» (для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання бакалаврів за напрямками 6.050701 – Електротехніка та електротехнології та 6.050702 – Електромеханіка) / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Є. Д. Дьяков. – Х.: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – 39 с.

Укладач: Є. Д. Дьяков

Рецензент: к.т.н., доц. А. В. Хітров

Рекомендовано кафедрою електропостачання міст,
протокол № 5 від 11.04.2013 р.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

1.1 Мета роботи

Вивчити методики визначення питомого об'ємного і поверхневого опорів, провести експериментальні дослідження залежності цих параметрів від зовнішніх факторів для різних зразків твердих діелектриків.

1.2 Загальні положення

Всі практично застосовувані електроізоляційні матеріали під дією прикладеної постійної напруги пропускають якийсь (звичайно досить незначний) струм, якій називається струмом витоку. Цей струм можна подати у вигляді двох складових.

Змінна складова, що змінюється в часі за експонентним законом, називається струмом абсорбції і обумовлена процесами поляризації, що відбуваються в діелектрику.

Постійна складова струму витоку називається наскрізним струмом діелектрика й, у свою чергу, може бути представлена у вигляді двох складових: поверхневого й об'ємного струмів.

Поверхневий струм обумовлений наявністю тонкого електропровідного шару вологи з розчиненими в ньому речовинами, що утворюються внаслідок зіткнення зразка з навколишнім середовищем.

Об'ємний струм являє собою струм, що протікає безпосередньо через об'єм діелектрика.

Цим двом складовим відповідають два опори: поверхневий електричний опір діелектрика R_s і об'ємний електричний опір діелектрика R_v . Величини, зворотні об'ємному й поверхневому опорам, називаються відповідно об'ємною й поверхневою провідністю.

Об'ємний і поверхневий опори залежать як від матеріалу діелектрика, так і від його геометричних розмірів.

Для порівняння якості різних діелектриків користуються величинами питомих опорів.

Питомий об'ємний опір ρ_v у системі СІ чисельно дорівнює опору куба матеріалу з ребром в один метр, обмірюваному при постійній напрузі, коли струм проходить від однієї грані куба до іншої.

Для зразка з постійним поперечним перерізом, рівним площі електродів, питоме об'ємний опір визначається по формулі

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h}, \quad (1.1)$$

де R_v – об'ємний опір зразка діелектрика, Ом;
 S – площа вимірювального електрода, м²;
 h – товщина діелектрика, м.

Питомий поверхневий опір ρ_s чисельно дорівнює опору плоскої ділянки поверхні твердого діелектрика у формі квадрата, обмірюваному при постійній напрузі, коли струм проходить від однієї грані квадрата до іншої.

Для ділянки діелектрика, розташованого між паралельними один одному електродами, питоме поверхневий опір визначається за формулою

$$\rho_s = R_s \frac{b}{a}, \quad (1.2)$$

де R_s – поверхневий опір зразка діелектрика, Ом;
 b – довжина електрода, м;
 a – відстань між електродами, м.

При використанні для виміру R_s електродів у вигляді двох коаксіальних циліндрів формула для визначення ρ_s має вигляд

$$\rho_s = \pi R_s \frac{D + d}{D - d}, \quad (1.3)$$

де R_s – поверхневий опір зразка діелектрика, Ом;
 D – внутрішній діаметр кільцевого електрода, м;
 d – діаметр вимірювального електрода, м.

Під впливом різних зовнішніх факторів величини питомих опорів можуть істотно змінюватися. Так, при підвищенні температури питомий об'ємний опір твердих і рідких діелектриків, як правило, зменшується за експонентним законом:

$$\rho_t = \rho_0 e^{-\alpha t}, \quad (1.4)$$

де ρ_0 – питомий об'ємний опір при температурі навколишнього середовища, Ом·м;
 α – температурний коефіцієнт питомого опору, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 t – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Зменшення опору діелектриків при їхньому нагріванні обумовлено ослабленням молекулярних зв'язків і зменшенням в'язкості речовини. Крім того, внаслідок температурної дисоціації молекул збільшується концентрація іонів і росте їхня рухливість.

Однак у деяких випадках зі збільшенням температури опір діелектрика в певному діапазоні температур може зростати. Дане явище спостерігається, наприклад, для електроізоляційних смол при їхній полімеризації й пов'язаному з цим процесом значним підвищенням в'язкості.

Істотний вплив на величину опору робить вологість навколишнього середовища у зв'язку з тим, що більшість діелектриків здатні поглинати вологу з повітря, яке містить водяні пари. Наявність вологи в діелектрику різко зменшує його опір, тому що вода сприяє дисоціації на іони молекул самої речовини й, крім того, наявні у воді домішки також дисоціюють на іони.

При нагріванні до високих температур діелектрики, що містять воду, втрачають її, у результаті чого їхній опір збільшується.

На величину опору діелектрика також впливає значення прикладеної напруги. При збільшенні напруги опір діелектриків, як правило, зменшується. Виняток становлять високоякісні діелектрики, в яких опір при збільшенні напруги залишається

практично незмінним. Причинами зменшення опору можуть бути виникнення об'ємних зарядів у діелектрику, перерозподілу вологи в порах діелектрика або виникнення додаткової електропровідності в результаті виривання електронів силами поля із часток діелектрика.

1.3 Прилади й обладнання

Для визначення опору зразка діелектрика застосовують прямий або непрямий метод виміру. Прямий метод виміру заснований на використанні приладів, які дозволяють робити відлік вимірюваного опору безпосередньо по шкалі приладу. Як такі прилади можуть бути використані електронні омметри (мегаомметри, тераометри) або мости постійного струму наступних марок: Е 6-13А, ЕК 6-7, Е 6-14, Е 6-17, Ф4102, Р4053, Р4060, Р4056.

При непрямих вимірах значення опору встановлюють розрахунковим шляхом за результатами виміру струму, що протікає в зразку при фіксованій напрузі, або вимірюючи спадання напруги на зразку при відомому струмі в ньому. Для виміру струму й напруг застосовують чутливі магнітоелектричні або електростатичні прилади з електронними або фотогальванометричними підсилювачами.

У лабораторній роботі для випробувань матеріалів використовується метод безпосереднього виміру електричного опору.

Визначення опорів відбувається на плоских зразках електроізоляційних матеріалів. Для випробувань використовується система з трьох електродів: вимірювального, напруги (високовольтного) і охоронного. Два електроди мають циліндричну форму, третій виконаний у вигляді кільця. Залежно від вимірюваної величини ті самі електроди можуть виконувати різні функції.

На рисунку 1.1 показані схеми підключення вимірюваних зразків для визначення опорів: об'ємного (рис. 1.1, а), і поверхневого (рис. 1.1, б). Схеми містять: високовольтний електрод 1; зразок діелектрика 2; охоронне кільце 3; вимірювальний електрод 4.

Застосування для вимірів системи з трьох електродів дозволяє розділити об'ємні й поверхневі струми. У схемі на рисунку 1.1а заземлення охоронного електрода дає змогу виключити вплив поверхневого струму на результат виміру. Аналогічним чином заземлення високовольтного електрода у схемі на рисунку 1.1б виключає вплив на результат виміру об'ємного струму. Електроди розташовані в термошафі, який має захисне блокування. Температура у середині шафи вимірюється термометром.

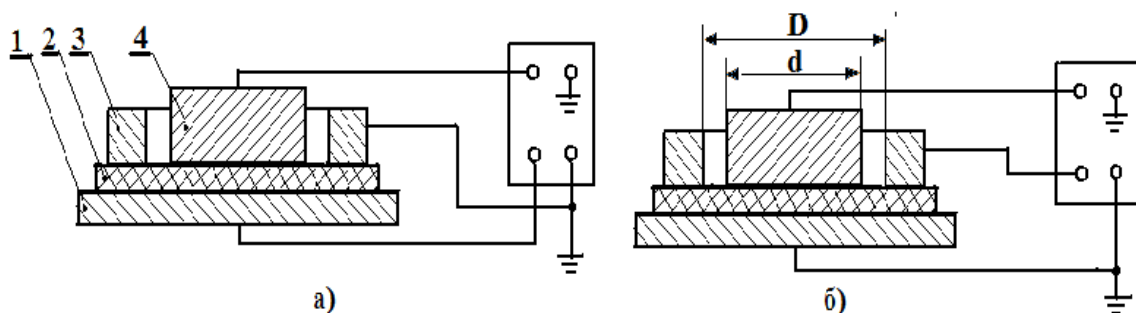


Рисунок 1.1 – Схеми виміру опору діелектриків

1.4 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему для визначення об'ємного опору відповідно до рисунку 1.1а. Штекер «Э» приладу Е 6-17 повинен бути заземлений.

2. У присутності викладача включити вимірювальний прилад. Тривалість часу встановлення робочого режиму приладу 15 хв.

3. Виміряти й записати в таблицю 1.1 параметри охоронного кільця, вимірювального електрода й досліджуваних зразків діелектриків.

Таблиця 1.1 – Параметри досліджуваних зразків діелектрика й основні розміри електродів.

Найменування діелектрика	h, м	Вимірювальний електрод		Охоронний електрод
		d, м	S, м ²	D, м

4. Установити перемикач піддіапазонів у положення «1 МОм».

5. Зробити перевірку стану електричного нуля приладу. Для цього відключити коаксіальний штекер кабелю від коаксіального гнізда приладу й натиснути на кнопку «Вимір». Якщо при цьому спостерігається відхилення стрілки приладу від нульового значення, необхідно здійснити корегування за допомогою ручки >0<. Після корегування відпустити кнопку «Вимір» і підключити коаксіальний штекер до відповідного гнізда приладу.

6. Розташувати один зі зразків досліджуваних діелектриків між електродами.

7. Виміряти за допомогою термометра температуру у термошафі. Результат виміру записати в таблицю 1.2.

8. Натиснути на кнопку «Вимір» і встановити значення опору вимірюваного діелектрика. При незначному відхиленні стрілки приладу від значення «∞» відпустити кнопку «Вимір» і перемкнути поддіапазон виміру. Залежно від обраного піддіапазону виміру відлік проводиться за відповідною шкалою приладу після досягнення вимірюваною величиною сталого значення. Результати виміру записати в таблицю 1.2. По закінченні виміру перемикач піддіапазонів перемкнути в положення «1 МОм».

Таблиця 1.2 – Результати експериментальних досліджень опорів твердих діелектриків

Найменування діелектрика	T, °C	R _v , Ом	R _s , Ом	ρ _v , Ом·м	ρ _s , Ом
--------------------------	-------	---------------------	---------------------	-----------------------	---------------------

9. Зробити вимір об'ємного опору інших зразків твердих діелектриків відповідно до методики, викладеної в п. 6-7. Результати вимірів записати в таблицю 1.2.

10. У присутності викладача зібрати схему для виміру поверхневого опору досліджуваних діелектриків відповідно до рисунку 1.1б.

11. Зробити вимір поверхневого опору твердих діелектриків. Результати виміру записати в таблицю 1.2.

12. Визначити залежність поверхневого й об'ємного опорів від температури. Для цього за вказівкою викладача один із зразків діелектриків помістити в термостат і при трьох-чотирьох значеннях температури виміряти значення поверхневого і об'ємного опорів діелектрика. Результати вимірів записати в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати експериментальних досліджень залежності опорів твердих діелектриків від температури

Найменування діелектрика	T, °C	R _v , Ом	R _s , Ом
--------------------------	----------	------------------------	------------------------

13. Провести розрахунок питомих об'ємних і питомих поверхневих опорів досліджуваних діелектриків, використовуючи формули (1.1), (1.3). Результати розрахунку записати в таблицю 1.2.

14. Побудувати графіки залежності питомих об'ємних і питомого поверхневого опорів від температури: $\rho_v = f(T)$ і $\rho_s = f(T)$.

15. Отримані розрахункові значення питомих опорів порівняти за довідковим даними.

16. Скласти звіт про роботу, що повинен містити формулювання мети роботи, принципові електричні схеми вимірів опорів, заповнені таблиці 1.1-1.3 графіки залежностей $\rho_v = f(T)$, $\rho_s = f(T)$ і висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення поняття «діелектрик» і наведіть конкретні приклади твердих, рідких і газоподібних діелектриків.

2. Поясніть електричні схеми для виміру об'ємного й поверхневого опорів твердих діелектриків.

3. Назвіть фактори, які впливають на величину об'ємного опору.

4. Поясніть фізичну сутність процесу електропровідності діелектриків.

5. Перелічіть параметри, що характеризують електропровідність діелектриків.

6. Назвіть струми, які протікають через діелектрик, що перебуває в змінних і постійному електричних полях.

7. Поясніть причину виміру опору діелектрика через одну хвилину після подачі напруги на зразок.

8. Назвіть фактори, що впливають на величину поверхневого опору.

9. Поясніть механізм електропровідності в рідких діелектриках.

10. Укажіть причини, у зв'язку з якими вимір опорів діелектриків виконується на постійній напрузі.

11. Поясніть механізм електропровідності в газоподібних діелектриках.

Л і т е р а т у р а: [1, с. 30-43; 2, с. 47-60].

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ Й ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ЧАСТОТАХ

2.1 Мета роботи

Вивчити методику експериментального визначення відносної діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат, потужності, що розсіюється в діелектрику, і провести дослідження залежності даних параметрів від зовнішніх факторів.

2.2 Загальні положення

Слід знати, що відносна діелектрична проникність характеризує властивість діелектриків поляризуватися в електричному полі. Цей параметр є кількісною характеристикою процесу поляризації.

Величина відносної діелектричної проникності показує, в скільки разів при незмінній напрузі збільшується ємність або заряд конденсатора заданих геометричних розмірів при заміні вакууму між пластинами конденсатора даним діелектриком.

Відносну діелектричну проникність визначають за формулою

$$\epsilon_r = \frac{Q_o + Q_d}{Q_o} = 1 + \frac{Q_d}{Q_o}, \quad (2.1)$$

де Q_o – заряд конденсатора у випадку, коли між його пластинами перебуває вакуум;

Q_d – заряд, обумовлений поляризацією діелектрика.

З формули (2.1) виходить, що діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці й дорівнює одиниці тільки для вакууму. Для твердих діелектриків ϵ_r може мати різні числові значення у зв'язку з різноманітністю їхніх структур, що володіють різними видами поляризації.

Відносна діелектрична проникність плоского діелектрика, вміщеного між круглими електродами,

$$\epsilon_r = C_d \frac{h}{\epsilon_o S}, \quad (2.2)$$

де C_d – ємність конденсатора з даним діелектриком, Ф;

h – товщина діелектрика, м;

S – площа електрода, м²;

ϵ_r – електрична постійна, $\epsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Абсолютна діелектрична проникність дорівнює добутку відносної діелектричної проникності на електричну постійну:

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_o.$$

Характер впливів температури на відносну діелектричну проникність визначається видом поляризації, властивим даному діелектрику. Так, для матеріалів з електронною поляризацією відносна діелектрична проникність практично не залежить від температури. Для матеріалів з іонною поляризацією при підвищенні температури відносна діелектрична проникність зростає внаслідок зменшення сил взаємодії між іонами кристалічної решітки.

Матеріали з діпольно-релаксаційним механізмом поляризації при нагріванні мають більш складний характер зміни відносної діелектричної проникності. Внаслідок зменшення в'язкості матеріалу відносна діелектрична проникність спочатку зростає, а потім зменшується через підсилення хаотичного теплового руху молекул.

Діелектричними втратами називається потужність, що розсіюється в діелектрику при впливі на нього електричного поля і викликає нагрівання діелектрика.

Втрати енергії в діелектриках спостерігаються як при змінній, так і при постійній напрузі. Діелектричні втрати при постійній напрузі обумовлені в основному струмом наскрізної провідності, тому що час протікання зарядного й абсорбційного струмів після включення напруги незначний. При змінній напрузі через діелектрик протікають, періодично змінюючись, не тільки струм наскрізної провідності, але й струм абсорбції і струм зсуву. За своєю величиною струм абсорбції може перевершувати струм наскрізної провідності й струм зсуву. У зв'язку з цим діелектричні втрати при змінній напрузі в основному обумовлені струмами абсорбції, які є наслідком поляризаційних процесів у діелектрику.

При високій напрузі додаткові діелектричні втрати можуть виникати внаслідок іонізації повітряних включень у діелектрику. Крім того, на величину діелектричних втрат впливає неоднорідність структури діелектрика.

Розрізняють повні й питомі діелектричні втрати. Повні діелектричні втрати – це активна потужність, що розсіюється в повному обсязі діелектрика.

Повні діелектричні втрати при змінній напрузі

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (2.3)$$

де U – робоча напруга, В;

ω – кутова частота, с^{-1} ;

C – ємність конденсатора з даним діелектриком, Ф;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

Вираз для визначення питомих діелектричних втрат має вигляд

$$p = \omega \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2, \quad (2.4)$$

де p – питомі втрати, $\text{Вт}/\text{м}^3$;

E – напруженість електричного поля, В/м.

Для оцінки здатності діелектрика розсіювати потужність в електричному полі можна використовувати кут діелектричних втрат, а також тангенс цього кута.

Кутом діелектричних втрат називається кут, що доповнює до 90° кут фазового зрушення між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі.

Значення $\operatorname{tg} \delta$ для різних діелектриків змінюється в широких межах (від 0,00001 до 0,3).

Характер впливу температури на тангенс кута діелектричних втрат визначається сполукою і структурою матеріалу.

Для неполярних діелектриків характерне збільшення $\text{tg } \delta$ при підвищенні температури, тому що збільшується електропровідність діелектрика, а відносна діелектрична проникність практично не змінюється.

Залежність $\text{tg } \delta$ від температури для полярних діелектриків має більш складний характер, тому що при підвищенні температури одночасно зі збільшенням втрат на електропровідність відбувається нелінійна зміна втрат на поляризацію.

Істотний вплив на величину $\text{tg } \delta$ мають також частота прикладеної напруги і її величина.

2.3 Прилади й обладнання

Визначення ємності й $\text{tg } \delta$ різних діелектриків виконують за допомогою приладу Е 7-11, принцип роботи якого заснований на використанні мостового методу виміру. Принципова електрична схема приладу наведена на рисунку 2.1. На схемі показані вимірювальний електрод 1, охоронне кільце 2, зразок діелектрика 3, високовольтний електрод 4.

У перше плече вимірювального мосту, між вершинами А і В, включається конденсатор, ємність якого необхідно виміряти. У даній роботі – це плоский конденсатор, обкладки якого являють собою два електроди циліндричної форми. Діелектриком служить плоский зразок тієї або іншої товщини. Для зменшення похибки виміру використовується третій електрод – охоронне кільце, що заземлюється з метою відводу поверхневих струмів на землю.

Друге плече вимірювального мосту, що перебуває між вершинами В і С, розділене на сім піддіапазонів від 1 Ом до 1 МОм. Зміна піддіапазонів здійснюється перемикачем «Межі».

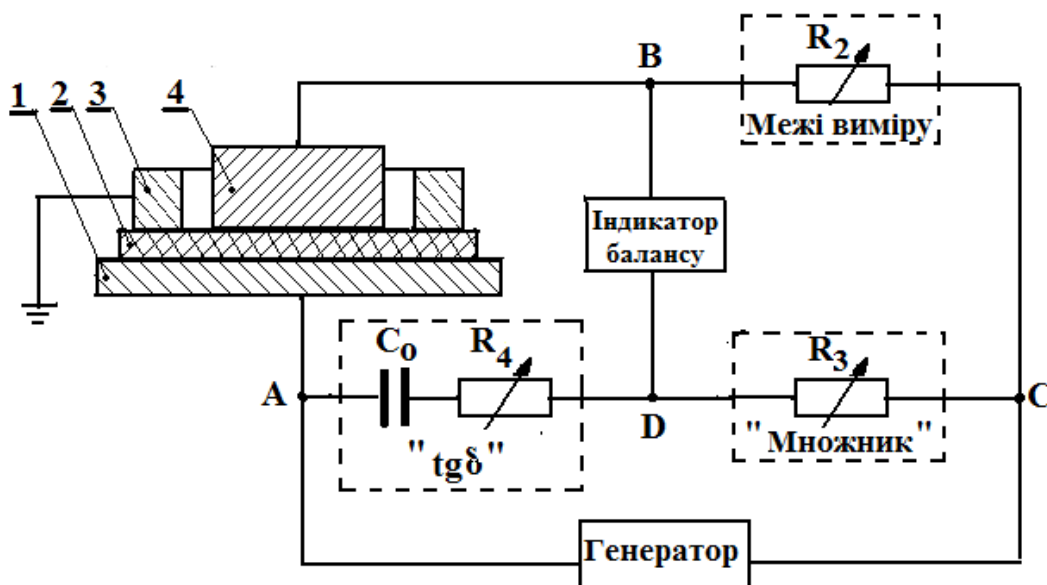


Рисунок 2.1 – Принципова схема для виміру ємності й тангенса кута діелектричних втрат

Третє плече між вершинами С і D складається з послідовно включених декадного механізму опорів і одного змінного резистора, умовно показаних на схемі (рис. 2.1) у вигляді одного опору R_3 . На лицьовій панелі приладу цим плечем є пристрій «Множник».

Четверте плече, що перебуває між вершинами А і D, складається зі зразкового конденсатора C_0 і змінного резистора R_4 , що компенсує втрати у вимірюваному конденсаторі. Опір R_4 відградує у величинах тангенса діелектричних втрат і встановлено на лицьовій панелі приладу.

Напряга на діагональ А - С може подаватися як від генератора, встановленого у приладі, так і від зовнішнього генератора. До діагоналі В - D підключений індикатор балансу вимірювальної схеми.

При рівновазі мосту виконуються умови

$$C_x = C_0 \frac{R_3}{R_2}; \quad \text{tg } \delta = \omega C_0 R_4. \quad (2.5)$$

Таким чином, ємність вимірюваного конденсатора C_x і $\text{tg } \delta$ визначається через відомі величини вимірювального мосту. Для безпосереднього відліку по шкалах приладу опір R_2 і R_3 градуують у значеннях ємності, а опір R_4 – у значеннях $\text{tg } \delta$.

2.4 Порядок виконання роботи

1. Підключити електроди, які використовуються для вимірів, до сполучних кабелів приладу відповідно до схеми (рис. 2.1).
2. Установити органи керування приладу в такі положення:
 - перемикач «L, C, R» у положення «С»;
 - перемикач «Q < 0,5, Q > 0,5, tg δ » у положення «tg δ »;
 - перемикач «Частота» у положення, що відповідає частоті, на якій передбачається робити виміри;
 - перемикач «Межі» у крайнє праве положення;
 - шкалу «tg δ » на нульове значення.
3. У присутності викладача включити вимірювальний прилад. Час прогріву приладу 15 хв.
4. Виміряти й записати в таблицю 2.1 параметри досліджуваних зразків і вимірювального електрода.

Таблиця 2.1 – Параметри досліджуваних зразків діелектрика й вимірювального електрода

Найменування діелектрика	h, м	Вимірювальний електрод	
		d, м	S, м ²

5. Розмістити один з досліджуваних зразків між електродами.

6. Зробити вибір межі виміру. Для цього на шкалі «Множник» установити значення 1,090. Ручку «Чутливість» перевести в положення, що відповідає 70 поділам на індикаторі розбалансу. Натиснути кнопку «Вибір межі», і обертанням перемикача «Межі» вліво змінювати встановлену межу доти, поки знак фази напруги

розбалансу на індикаторі приладу не зміниться на протилежний. Визначивши межу, на який будуть виконуватися виміри, відпустити кнопку «Вибір межі».

7. Зробити урівноваження мосту. Для цього, поступово змінюючи показання шкали перемикачів «Множник», домогтися мінімального відхилення індикатора розбалансу від нульового значення. Потім перейти до зрівноважування мосту за втратами.

Регулювання виконують при поступовому збільшенні чутливості доти, поки будь-який вимір рукояток «Множник» і «tg δ» приводить до збільшення показань індикатора розбалансу.

8. Зробити відлік результату виміру. Обмірювана величина ємності дорівнює відліку по шкалі «Множник», помноженому на значення ємності, вказане в таблиці (розташованої на передній панелі приладу), для відповідного положення перемикача «Межі».

При вимірі ємності на частоті 100 Гц відлік результату виміру повинен бути збільшений в 10 разів.

Обмірювана величина тангенса кута діелектричних втрат відлічується безпосередньо по шкалі «tg δ».

9. Результати вимірів записати в таблицю 2.2.

10. За допомогою термометра визначити температуру навколишнього середовища. Результати виміру записати в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати експериментальних і розрахункових значень

Найменування діелектрика	T, °C	C _x	ε _r	tg δ	P, Вт
--------------------------	-------	----------------	----------------	------	-------

11. Ручку «Чутливість» установити в крайнє ліве положення й у присутності викладача замінити зразок діелектрика. Провести виміру ємності й tg δ установленого зразка відповідно до методики, викладеної в п.п. 2-9.

12. Визначити залежність відносної діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат від температури. Для цього один із зразків досліджуваних діелектриків (за вказівкою викладача) розмістити в термостаті й зробити виміри ємності й тангенса кута діелектричних втрат для трьох-чотирьох значень температури.

13. Визначити відносну діелектричну проникність досліджуваних діелектриків, використовуючи формулу (2.2). Результати розрахунку записати в таблицю 2.2.

14. Побудувати графіки залежностей відносної діелектричної проникності від температури $\epsilon_r = f(T)$ й тангенса кута діелектричних втрат від температури $\text{tg } \delta = f(T)$.

15. Визначити потужність, що розсіюється в досліджуваних діелектриках, використовуючи формулу (2.3). Результати розрахунку записати в таблицю 2.2.

16. Скласти звіт про роботу, що повинен містити формулювання мети роботи, принципову електричну схему, використововану при вимірах, заповнені таблиці 2.1 і 2.2, графіки залежностей $\epsilon_r = f(T)$, $\text{tg } \delta = f(T)$ і висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Поясніть фізичну сутність процесу поляризації діелектриків.
 2. Назвіть основні види поляризації діелектриків.
 3. Дайте визначення відносної діелектричної проникності й наведіть конкретні значення даного параметра для різних діелектриків.
 4. Укажіть фактори, що впливають на величину відносної діелектричної проникності, і наведіть приклади таких залежностей.
 5. Назвіть основні параметри, що характеризують діелектричні втрати.
 6. Наведіть електричні схеми заміщення, використовувані для визначення діелектричних втрат, і побудуйте їхні векторні діаграми.
 7. Назвіть основні види діелектричних втрат.
 8. Назвіть зовнішні фактори, які впливають на величину діелектричних втрат.
 9. Наведіть конкретні приклади залежності діелектричних втрат від зовнішніх факторів для різних діелектриків.
 10. Опишіть принцип роботи електричної схеми експериментальної установки.
- Л і т е р а т у р а: [1, с. 43-58; 2, с. 61-70].

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.1 Мета роботи

Вивчити принцип дії і конструкцію приладів для визначення в'язкості рідких діелектриків, освоїти методику визначення динамічної, кінематичної і умовної в'язкостей.

3.2 Загальні положення

Слід знати, що для рідких діелектриків (електроізоляційних масел, лаків, просочувальних компаундів і подібних їм матеріалів) в'язкість є однією з характеристик, за допомогою якої оцінюються їх технологічні й експлуатаційні властивості. В'язкість – це властивість рідин і газів чинити опір переміщенню однієї їхньої частини щодо іншої.

При ламінарному плині середовища в'язкість проявляється в тому, що при зрушенні сусідніх шарів середовища один відносно одного виникає сила протидії – напруга зрушення, що для звичайних середовищ пропорційне швидкості відносного зрушення шарів.

Коефіцієнт пропорційності називається коефіцієнтом динамічної в'язкості, або динамічною в'язкістю. Вимірюють динамічну в'язкість у паскаль – секундах.

Паскаль-Секунда (Па·с) – це динамічна в'язкість середовища, при ламінарному плині якої в шарах, що перебувають на відстані 1 м, у напрямку, перпендикулярному до плину, під дією тиску зрушення 1 Па виникає різниця швидкостей плину 1 м/с. У практиці випробувань застосовується й інша одиниця в'язкості – пуаз (П); 1 П = 0,1 Па·с.

Вимір динамічної в'язкості виконують на основі закону Стокса або закону Пуазейля.

Крім динамічної в'язкості використовується також кінематична й умовна в'язкість.

Кінематична в'язкість дорівнює відношенню динамічної в'язкості рідини η (Па·с) до її щільності ρ (кг/м³):

$$v = \eta / \rho. \quad (3.1)$$

На практиці кінематичну в'язкість іноді вимірюють у стоксах (Ст) або сантистоксах (сСт):

$$1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$1 \text{ сСт} = 10^{-2} \text{ Ст}.$$

Кінематична в'язкість води при 20 °С приблизно дорівнює 1 сСт. При цій температурі динамічна в'язкість води становить 0,001 Па·с.

В'язкість умовна (ВУ) – характеристика, одержувана при певній методиці випробування. Вона пов'язана з динамічною й кінематичною в'язкістю емпіричними співвідношеннями.

Умовна в'язкість, вимірювана в градусах Енглера (°Е), являє собою відношення часу витікання 200 мл електроізоляційної рідини при заданій температурі до часу витікання 200 мл дистильованої води при 20 °С.

Час витікання 200 мл води при 20 °С називається постійною приладу. Вона дорівнює 50-52 с.

$$ВУ = \frac{t}{t_{\text{пр}}}, \quad (3.2)$$

де t – час витікання 200 мл досліджуваної рідини при заданій температурі, с;

$t_{\text{пр}}$ – постійна приладу; для приладу, використовуваного в цій лабораторній роботі, $t_{\text{пр}} = 50$ с.

Від умовної в'язкості до кінематичної можна перейти, використовуючи графік (рис. 3.1). При $v > 50$ сСт перехід від однієї системи до іншої робиться за формулою

$$ВУ = 0,135v.$$

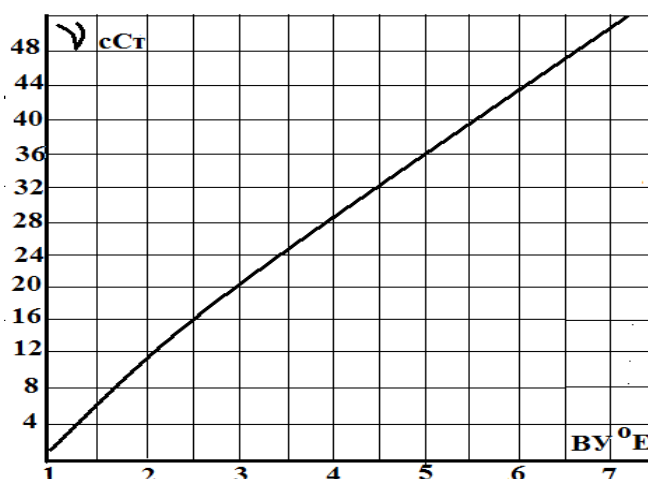


Рисунок 3.1 – Графік переходу від умовної до кінематичної в'язкості

Для виміру в'язкості використовують спеціальні прилади – віскозиметри. За своєю будовою віскозиметри діляться на капілярні, ротаційні й ультразвукові.

3.3 Прилади й обладнання

Як рідкий діелектрик у лабораторній роботі використовуються трансформаторні масла, широко застосовувані в електротехнічній промисловості. Масла, використовувані в трансформаторах, виконують наступні функції: підвищують електроізолюючі властивості твердої ізоляції обмотувальних проводів, а також сприяють відводу тепла від обмоток і магнітопроводу до охолоджуваних стінок бака.

У масляних вимикачах масло забезпечує гасіння електричної дуги й зменшує тертя в механічних вузлах вимикача.

Для визначення умовної в'язкості трансформаторного масла використовується універсальний віскозиметр Енглера (рис. 3.2).

Рідкий діелектрик заливають в латунну склянку 10, що знаходиться усередині латунної посудини 12, яка служить як водяна або масляна баня. У кришці 8 посудини 10 є два отвори: отвір 6 для термометра й отвір 7 для дерев'яного або фібрового конусного стрижня 4. Стрижень 4 своїм вістрям закриває вхід вертикального отвору 3 – циліндричні канали довжиною 20 мм і діаметром 2,8 мм. Під отвір 3 підставляється мірна колба 1, що має оцінку, яка відповідає об'єму 200 мл.

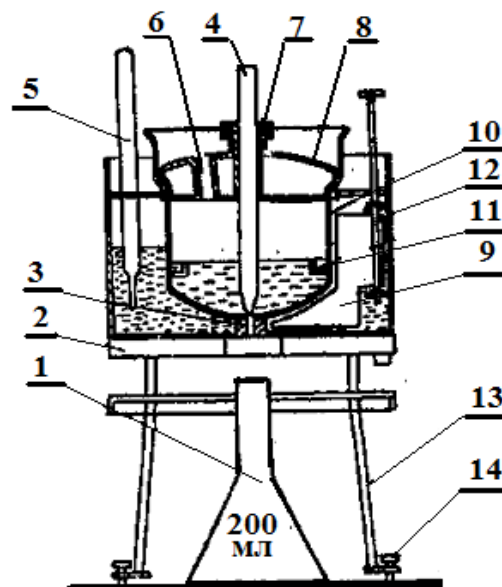


Рисунок 3.2 – Універсальний віскозиметр

Усередині посудини 10 є три покажчики 11, верхні кінці яких повинні одночасно досягати рівня залитої в посудину рідини. Це дає можливість перевірити горизонтальність установки приладу. Регулювання горизонтальності приладу здійснюють за допомогою двох настановних гвинтів 14 на штативі 13.

Рідину в посудині 12 підігрівають за допомогою електронагрівача 2 і перемішують мішалкою 9. Контроль за температурою бані здійснюється за допомогою термометра 5, укріпленого в затиску.

Для визначення в'язкості можна використовувати і більш простий за конструкцією віскозиметр ВЗ-246, що дозволяє визначити в'язкість рідкого діелектрика, не підігріваючи його. Віскозиметр ВЗ-246 (рис. 3.3) складається з посудини 1, в конусному дні якої є стічний отвір діаметром 4 мм, що закривається стрижнем 2. Посудина 1 укріплена на штативі 4 за допомогою власника 3. Віскозиметр уміщає 100 мл випробуваної рідини, в'язкість якої визначається часом витікання цієї кількості рідини з посудини 1.

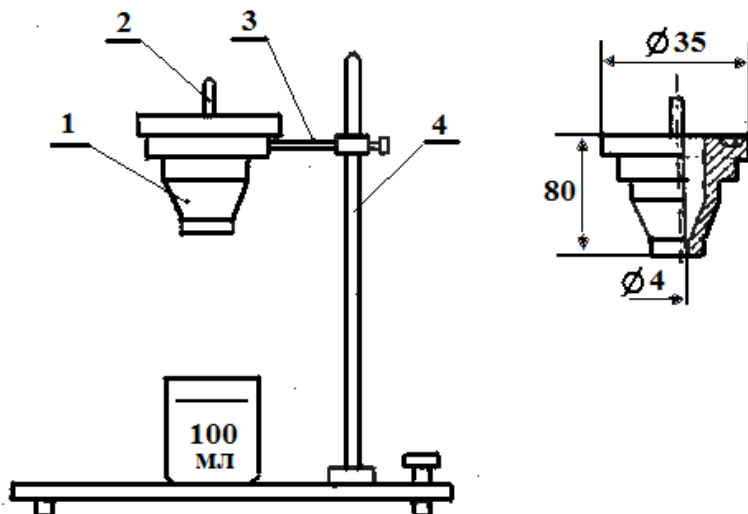


Рисунок 3.3 – Віскозиметр ВЗ-246

3.4 Порядок виконання роботи

1. Зняти кришку 8 (рис. 3.2) посудини 10 і закрити вертикальний отвір 3 стрижнем 4.

2. У посудину 10 залити випробуваний діелектрик до торкання з трьома верхніми кінцями показчиків рівня 11. При необхідності відрегулювати горизонтальність установки приладу настановними гвинтами 14 штатива 13.

3. Закрити посудину 10 кришкою 8 і встановити термометр в отвір 6.

4. Залити в посудину 12 необхідну кількість води й установити термометр.

5. Включити електронагрівач 2 і нагріти воду в посудині 12 до заданої температури.

6. Виключити електронагрівач і, перемішуючи воду мішалкою 9, витримати при досягнутій температурі рідину протягом 5 хв. При цьому температура води в посудині 12 не повинна перевищувати температуру діелектрика більш ніж на 1 °С.

7. Записати температуру діелектрика у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень

Найменування діелектрика	Температура діелектрика $T, ^\circ\text{C}$	Час витікання t, c	$VU, ^\circ\text{E}$	v, cSt

8. Вийняти стрижень 4 і одночасно пустити в хід секундомір. У той момент, коли рівень діелектрика дійде до оцінки 200 мл на мірній колбі, секундомір зупинити.

9. Записати час витікання діелектрика t у таблицю 3.1.

10. Повторити досвід, описаний у п. 2-9, і визначити час витікання 200 мл досліджуваного діелектрика при температурах, зазначених викладачем. Результати вимірів занести в таблицю 3.1.

11. Визначити умовну в'язкість досліджуваного діелектрика. Результати розрахунку занести в таблицю 3.1.

12. Визначити кінематичну в'язкість рідини залежно від величини умовної в'язкості η і записати її величину в таблицю 3.1.

13. Побудувати графік залежності умовної в'язкості досліджуваного діелектрика від температури: $\eta = f(T)$.

14. Визначити динамічну в'язкість досліджуваного діелектрика при температурі 20 °С, використовуючи формулу (3.1).

15. Скласти звіт про роботу, що повинен містити формулювання мети роботи, рисунок віскозиметра, заповнену таблицю 3.1, графік залежності $\eta = f(T)$, висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Назвіть види в'язкості рідин.
2. Перелічіть прилади, за допомогою яких визначається в'язкість рідких діелектриків.
3. Дайте визначення динамічної в'язкості.
4. Дайте визначення кінематичної в'язкості.
5. Дайте визначення умовної в'язкості.
6. Поясніть вплив температури на в'язкість рідких діелектриків.
7. Опишіть конструкцію універсального віскозиметра Енглера.
8. Дайте визначення поняття «постійна приладу».
9. Опишіть методику виміру умовної в'язкості за допомогою віскозиметра Енглера.
10. Поясніть призначення трансформаторних масел.

Л і т е р а т у р а: [1, с. 78-80; 2, с. 113-120].

Лабораторна робота № 4

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Мета роботи

Вивчити методику визначення основних характеристик магнітних матеріалів і провести дослідження процесів намагнічування й перемагнічування феромагнетиків у змінному магнітному полі.

4.2 Загальні положення

Слід знати, що основна причина магнітних властивостей речовини – внутрішні сховані форми руху електричних зарядів, що являють собою елементарні колові струми, які володіють магнітними моментами. Такими струмами є електронні спини й орбітальне обертання електронів в атомах.

Особливі властивості феромагнетиків обумовлені їхньою доменною будовою. Домени являють собою макроскопічні області, намагнічені практично до насичення навіть у відсутності зовнішнього магнітного поля.

Основні характеристики, що визначають поведження феромагнітних матеріалів у магнітному полі: основна крива намагнічування, максимальне значення індукції B_m , залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c , питомі втрати, магнітна проникність μ_r і її залежність від напруженості магнітного поля й температури.

Залежність магнітної індукції попередньо розмагніченого феромагнетика від напруженості магнітного поля, отриману при монотонному збільшенні напруженості, називають початковою кривою намагнічування.

При циклічному перемагнічуванні зміна стану феромагнетика характеризується явищем гістерезису, при якому спостерігається відставання індукції від напруженості поля. Змінюючи амплітудне значення напруженості зовнішнього поля, можна одержати сімейство петель гістерезису. Петлю гістерезису, отриману при індукції насичення, називають граничною. При подальшому збільшенні напруженості поля площа гістерезисної петлі залишається незмінною. Сукупність вершин петель гістерезису утворює основну криву намагнічування феромагнетика.

Напруженість розмагнічуючого поля ($-H_c$), при якій індукція у феромагнетика, попередньо намагніченому до насичення, обертається в нуль, називається коерцитивною силою.

Значення індукції при напруженості зовнішнього магнітного поля, рівної нулю, отримане в процесі розмагнічування зразка, намагніченого до насичення, називається залишковою індукцією (B_r).

По кривій намагнічування можна визначити параметр, що характеризує поведження феромагнетика в зовнішньому магнітному полі, – так звану відносну магнітну проникність:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (4.1)$$

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

Відносна магнітна проникність пропорційна тангенсу кута похилої січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування. Граничне значення магнітної проникності μ_n при напруженості магнітного поля, що прагне до нуля, називається початковою магнітною проникністю.

Крутість окремих ділянок кривій намагнічування і ділянок петлі гістерезису характеризує диференціальна магнітна проникність

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}. \quad (4.2)$$

Процес перемагнічування феромагнетиків у змінному магнітному полі супроводжується втратами енергії, які викликають нагрівання матеріалу. У загальному випадку втрати на перемагнічування складаються із втрат на гістерезис, на вихрові струми й на магнітну післядію. Втратами на магнітну післядію при проведенні інженерних розрахунків, як правило, зневажають. Повна потужність магнітних втрат пропорційна площі динамічної петлі гістерезису. Площа статичної петлі характеризує тільки втрати на гістерезис.

4.3 Прилади й обладнання

Для вивчення основних характеристик феромагнітних матеріалів у цій лабораторній роботі використовується установка, принципова схема якої наведена на рисунку 4.1. Досліджувані зразки кільцевої форми мають первинну обмотку з числом витків W_1 і вторинну обмотку з числом витків W_2 .

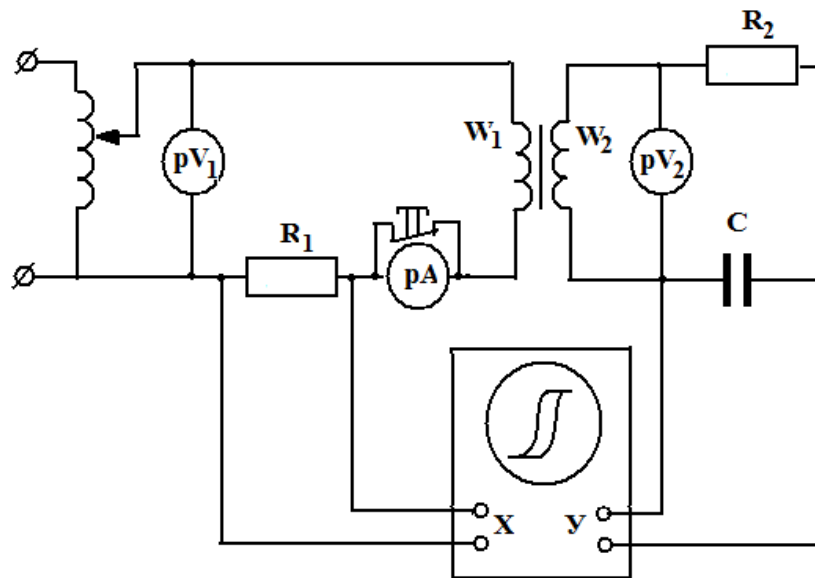


Рисунок 4.1 – Електрична схема випробувальної установки

Первинні обмотки призначені для створення змінного магнітного поля, що намагнічує осердя. Вони підключаються до регульованого джерела змінної напруги заданої частоти.

Відповідно до закону повного струму $I_1 W_1 = \oint H dL \approx HL$ для однорідного зразка з постійним поперечним перерізом величина напруженості визначається за формулою

$$H_m = \frac{\sqrt{2} I_1 W_1}{L}, \quad (4.3)$$

- де I_1 – діюче значення струму в первинній обмотці, А;
- W_1 – число витків у первинній обмотці;
- L – середня довжина магнітної силової лінії, м.

З формули (4.3) випливає, що величина напруженості поля пропорційна значенню струму, що протікає через первинну обмотку. Отже, подаючи на горизон-

тальні пластини відхилення променя осцилографа величину спадання напруги на опорі R_1 , можна на екрані зафіксувати величину напруженості магнітного поля на зразку.

Для того щоб на екрані осцилографа була отримана петля гістерезису, на пластини вертикального відхилення променя необхідно подати напругу, пропорційну індукції магнітного поля в зразку. Відповідно до закону електромагнітної індукції е.р.с. індукції, що виникає у вторинній обмотці, визначається за формулою

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.4)$$

Тому що досліджувані зразки мають постійний поперечний переріз, то можна записати:

$$e_2 = -\frac{d\Psi}{dt} = -W_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (4.5)$$

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

Отже напруга у вторинній обмотці пропорційно похідній $\frac{dB}{dt}$. Щоб подати на вхід вертикального підсилювача осцилографа напругу, пропорційну індукції магнітного поля, необхідно між вторинною обмоткою й осцилографом включити інтегруючу ланку. Із цією метою до вторинної обмотки підключений інтегруючий ланцюжок, що складається з послідовно включених опор R_2 і ємності C . Величини ємнісного опор конденсатора C і індуктивного опор вторинної обмотки підбирають такими, щоб вони були значно менше значення активного опор R_2 . Тоді струм у вторинному ланцюзі можна вважати чисто активним:

$$I_2 \approx \frac{e_2}{R_2}. \quad (4.6)$$

Напругу на обкладках конденсатора C , що подається на пластини вертикального відхилення осцилографа, можна записати у вигляді

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{u_2}{R_2} dt = \frac{w_2 S}{R_2 C} B. \quad (4.7)$$

Отже напруга на конденсаторі C пропорційна індукції магнітного поля у феромагнітному зразку.

Максимальне значення індукції B_m у зразку визначається за формулою

$$B_m = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi f W_2 S}, \quad (4.8)$$

де U_2 – діюче значення напруги, що відраховується по вольтметру у вторинній обмотці;
 f – частота прикладеної напруги.

Таким чином, подаючи одночасно на пластини горизонтального й вертикального відхилення променя осцилографа спадання напруги на опорі R_1 і конденсаторі C , на екрані одержимо в деякому масштабі петлю гістерезису.

Масштаб петлі гістерезису визначається за крайніми точками зображення на екрані осцилографа:

$$m_H = \frac{H}{I_H}; \quad m_B = \frac{B}{I_B}, \quad (4.9)$$

де H – напруженість магнітного поля при даній величині струму в первинній обмотці, А/м;

I_H – половина довжини горизонтального розгорнення, мм;

B – індукція при даній величині поля, що намагнічує, Тл;

I_B – половина довжини вертикального розгорнення, мм.

За масштабом зображення площі петлі гістерезису визначають питомі втрати в зразку:

$$p = \frac{S \cdot m_n \cdot m_B \cdot f \cdot 10^{-3}}{\gamma}, \quad (4.10)$$

де S – площа петлі гістерезису, мм²;

f – частота, Гц;

γ – питома вага матеріалу, г/см³.

4.4 Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему випробувальної установки відповідно до рисунку 4.1.
2. Параметри зразків досліджуваних матеріалів записати в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри зразків магнітних матеріалів

Зразок	Геометричні розміри й обмотувальні дані				Максимальні допустимі струми і напруги		Положення перемикачів на щиті		Щільність матеріалу
	S_2 , м ²	L , м	W_1 , витків	W_2 , витків	I_1 , А	U_2 , В	$П_R$	$П_C$	γ , г/см ³

3. Включити в схему один із зразків магнітних матеріалів.

4. Установити перемикачі $П_R$ і $П_C$, розташовані на стенді (на рис. 4.1 дані перемикач не показані), у положення, зазначені в таблиці 4.1.

5. У присутності викладача включити живлення установки й вимірювальних приладів. Час прогріву приладу 5-10 хв.

6. При натиснутій кнопці K_H регулятором установити в обмотці, що намагнічує, струм, необхідний для насичення феромагнетика. Величина струму для кожного зразка не повинна перевищувати значень, вказаних у таблиці 4.1.

7. Виміряти величину напруги на вторинній обмотці. Результати вимірів занести в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати експериментальних досліджень параметрів магнітних матеріалів

Зразок	Номер виміру	Експериментальні й розрахункові параметри							
		$I_1,$ А	$U_2,$ В	$H,$ А/м	$B,$ Тл	μ_r	$P_{уд},$ Вт/кг	$B_r,$ Тл	$H_c,$ А/м

8. За допомогою ручок «Посилення» осцилографа відрегулювати зображення петлі гістерезису, щоб воно максимально заповнювало екран.

9. По відповідних формулах визначити величини напруженості поля H , амплітудне значення індукції B в зразку і магнітної проникності μ_r . Результати розрахунків занести в таблицю 4.2.

10. Перезняти петлю гістерезису з екрана осцилографа на міліметровий папір і визначити її площу.

11. Визначити масштаб по осі напруженості магнітного поля m_H , використовуючи формулу (4.9). Для визначення довжини горизонтального розгорнення ручки посилення осцилографа по вертикальній осі поставити в нульове положення. Після виміру ручки вертикального розгорнення поставити у вихідне положення.

12. Визначити масштаб по осі індукції m_B , використовуючи формулу (4.9). Ручка посилення горизонтального розгорнення осцилографа в цьому випадку повинна бути переведена в нульове положення. Після виміру довжини вертикального розгорнення необхідно ручку горизонтального розгорнення повернути у вихідне положення.

13. Визначити величину питомих магнітних втрат, використовуючи формулу (4.11). Результати розрахунку записати в таблицю 4.2.

14. Послідовно зменшуючи амплітуду струму в ланцюзі, що намагнічує, за допомогою регулятора, повторити виміру за п.п. 7-13 мінімум для трьох значень струму

15. За експериментальним даними побудувати графіки залежності $B = f(H)$; $\mu = f(H)$.

16. Відключити живлення установки й у присутності викладача замінити зразок магнітного матеріалу. Зробити вимір основних характеристик установленого зразка відповідно до методики, викладеної в п.п. 3-15.

17. Отримані експериментальні й розрахункові значення основних параметрів досліджуваних зразків порівняти з довідковими даними.

18. Скласти звіт про роботу, що повинен містити формулювання мети роботи, принципову електричну схему експериментальної установки, заповнені таблиці 4.1, 4.2, графіки залежності $B = f(H)$; $\mu = f(H)$ і висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні характеристики магнітних матеріалів.
2. Опишіть процес намагнічування магнетика.
3. Наведіть класифікацію матеріалів за магнітними властивостями.
4. Назвіть види магнітних втрат, укажіть фактори, які роблять на них вплив.

5. Дайте характеристику властивостей діамагнетиків і парамагнетиків.
6. Дайте характеристику властивостей феромагнетиків.
7. Опишіть принцип роботи експериментальної установки для вивчення явища гістерезису.
8. Перелічіть області використання магнітотвердих і магнітом'яких матеріалів.

Л і т е р а т у р а: [1, с. 275-299; 2, с. 336-350].

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

5.1 Мета роботи

Вивчити вплив температури на значення величини питомого опору і на підставі дослідних даних встановити значення температурного коефіцієнта питомого опору провідників.

5.2 Загальні положення

Металеві провідники мають гарну тепло- і електропровідність. Електричний опір і зворотний йому параметр – електропровідність різних матеріалів залежать від структури провідника, температури й характеризується значеннями питомого електричного опору й, відповідно, питомої електропровідності.

Згідно з квантовою теорією металів питома електропровідність визначається за виразом

$$\gamma = A\bar{\lambda}, \quad (5.1)$$

де A – коефіцієнт, що не залежить від температури й обумовлений числом вільних електронів в одиниці об'єму металу й енергетичним станом електронних орбіт;

$\bar{\lambda}$ – середня довжина вільного пробігу електронів, що в області температур від $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ для металів визначається як

$$\bar{\lambda} \approx T^{-1}, \quad (5.2)$$

де T – температура провідника, К.

Таким чином, питомий опір металів (ρ) відповідно до даних досвідів змінюється прямо пропорційно температурі.

Залежність питомого опору провідника від температури (для вказаного інтервалу температур) визначається за виразом:

$$\begin{aligned} \rho_t &= \rho_n [1 + \alpha_p (T_t - T_n)], \\ R_t &= R_n [1 + \alpha_R (T_t - T_n)], \end{aligned} \quad (5.3)$$

де ρ_t і R_t – значення питомого опору і опору відповідно при поточних температурах T_t , °C;

ρ_H і R_H – значення питомого опору і опору відповідно при початковій температурі T_H , °C;

α_ρ і α_R – значення температурного коефіцієнта відповідно питомого опору і опору, 1/°C.

З огляду на те, що

$$R_t = \rho_t \frac{L}{S}, \quad (5.4)$$

де L – довжина провідника;

S – площа поперечного перерізу провідника;

можна показати, що $\alpha_\rho = \alpha_R$.

З виразу (5.3) маємо:

$$\alpha_\rho = \alpha_R = \frac{\rho_t - \rho_H}{\rho_H} \bigg/ T_t - T_H = \frac{R_t - R_H}{R_H} \bigg/ T_t - T_H, \quad (5.5)$$

звідки випливає визначення α_ρ як відношення збільшення питомого електричного опору (опору) до його первісного значення при зміні температури на 1 °C (1/°C).

Для більшості металів в інтервалі температур від 0 до 100 °C α_ρ змінюється в межах $(3,3 \div 6,2) \cdot 10^{-2}$ 1/°C. Залежність ρ і γ від температури для чистих металів і деяких сплавів пояснюється залежністю λ від температури.

У деяких металах і сплавах виявлене явище надпровідності (сплави вісмуту із золотом, карбідів молібдену й вольфраму, свинцю, цинку, алюмінію та ін.), що полягає в тому, що нижче деякої критичної температури питомі опори цих речовин стають нікчемно малими.

На практиці часто за величиною обмірюваного опору знаходять значення температури провідника, наприклад, для мідних обмоток електричних машин і трансформаторів при відомих початкових (паспортних) значеннях опору за виразом

$$T_t = R_t \frac{(235 + T_H)}{R_H} - 235. \quad (5.6)$$

5.3 Прилади й обладнання

У шафу термостата 1 вміщені досліджувані провідникові матеріали ($R_1 \div R_6$). Значення температури T_H фіксується за допомогою ртутного термометра 2. Вимір значень електричних опорів виконують за допомогою вимірника Е- 7-13 (4). Досліджувані опори підключаються до приладу за допомогою перемикача 3. Принципова схема установки зображена на рисунку 5.1.

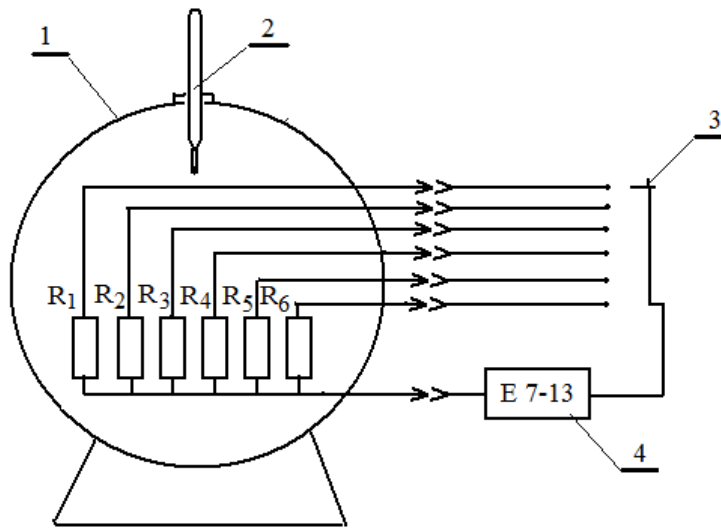


Рисунок 5.1 – Принципова схема установки

5.4 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою для виміру залежності опору зразків випробуваних провідникових матеріалів від температури.
2. Під керівництвом викладача підключити до мережі й відградувати вимірник E 7-13.
3. Записати в таблицю 5.1 геометричні параметри досліджуваних провідникових матеріалів.

Таблиця 5.1 – Геометричні параметри досліджуваних зразків провідникових матеріалів

Положення перемикача	Матеріал провідника	Параметри провідника		
		довжина, м	діаметр, мм	площа перерізу, мм ²
1	Мідь	41	0,335	
2	Нікель	14	0,5	
3	Вольфрам	4,6	0,11	
4	Залізонікелевий сплав	3,5	0,25	
5	Константан	30	0,07	
6	Манганін	4,3	0,23	

4. Виміряти значення початкової температури термошафи (T_H) за допомогою термометра.
5. Змінюючи положення перемикача від 1 до 6, виміряти значення опорів зразків при початковій температурі. Результати вимірів записати в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахункові значення параметрів опорів

Положення перемикача	Параметр	Температура, °C				
1	ρ_t					
	R_T/R_H					
	α_R					
2	ρ_t					
	R_T/R_H					
	α_R					
3	ρ_t					
	R_T/R_H					
	α_R					
4	ρ_t					
	R_T/R_H					
	α_R					
5	ρ_t					
	R_T/R_H					
	α_R					
6	ρ_t					
	R_T/R_H					
	α_R					

6. Включити електронагрівач термостата. У процесі нагрівання зробити виміри опорів зразків провідникових матеріалів не менш ніж при чотирьох значеннях температури. Під час вимірів опорів нагрівач термостата необхідно відключати.

У якості термодатчика використовують зразок з мідного провіда (положення перемикача 1), градуйована функція якого представлена на рисунку 5.2. Дані вимірів опору зразків записати в таблицю 5.2.

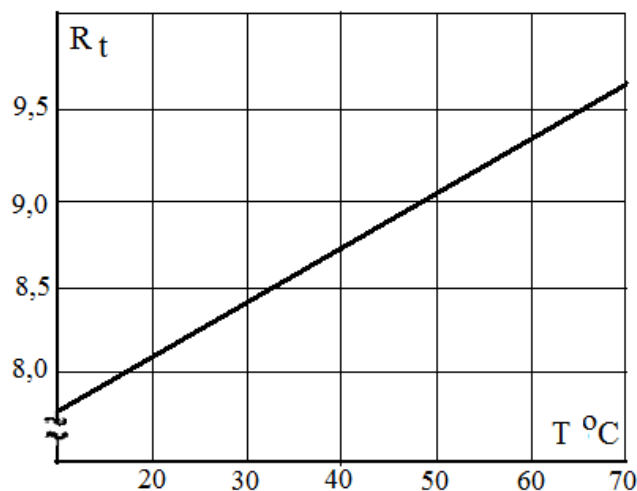


Рисунок 5.2 – Залежність $R_t = f(T)$ для термодатчика

7. Використовуючи експериментальні дані, знайти значення питомих опорів провідникових матеріалів за формулою

$$\rho_t = R_t \frac{S}{L}.$$

Результати розрахунку записати в таблицю 5.2.

8. Знайти для кожного зразка значення температурного коефіцієнта питомого опору α_p для найбільшого інтервалу температур, використовуючи формулу (5.5). Порівняти отримані результати з довідковими даними.

9. Скласти звіт по роботі, що повинен містити мету роботи, схему вимірів, заповнені таблиці 5.1, 5.2, графіки залежностей $\frac{R_t}{R_n} = f(T)$ і висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Укажіть причини залежності електричного опору провідникових матеріалів від температури.

2. Якою характеристикою визначається зміна опору провідника від температури?

3. Які металеві провідники мають незначні значення температурного коефіцієнта опору?

4. У чому відмінність електричної провідності провідників першого роду від провідників другого роду?

5. Від яких факторів залежить питома електрична провідність металевих провідників?

6. Охарактеризуйте застосування провідникових матеріалів з тими або іншими параметрами.

7. Перелічіть основні марки міді, що застосовуються в електротехнічній промисловості.

Л і т е р а т у р а: [1, с. 186-229; 2, с. 294-307].

Лабораторна робота № 6

ВИЗНАЧЕННЯ ДУГОСТІЙКОСТІ ТВЕРДИХ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

6.1 Мета роботи

Вивчити методику визначення дугостійкості матеріалів і провести експериментальні дослідження дугостійкості твердих діелектриків.

6.2 Загальні положення

Слід знати, що під дугостійкістю електроізоляційних матеріалів розуміють їхню здатність довгостроково протистояти впливу електричної дуги, зберігаючи при цьому в заданих межах електричні й фізико-хімічні характеристики.

Електрична дуга може виникати в камерах контактів пакетних вимикачів та інших комутаційних апаратів. У результаті впливу електричної дуги електроізоляційні матеріали насичуються вуглецем, розтріскуються і стають непридатними для подальшого використання. У зв'язку з цим матеріали, що піддаються у процесі експлуатації впливу електричної дуги, обов'язково випробовують на дугостійкість.

Розрізняють стійкість електроізоляційних матеріалів до дії електричної дуги при високій (понад 1000 В) змінній напрузі і малих струмах і при впливі дуги, створюваної постійною напругою до 1000 В.

Стійкість матеріалів до впливу дуги змінної напруги визначається відповідно до ГОСТ 10345. 1-78. Для цього два електроди, до яких прикладена змінна напруга, розташовують поблизу поверхні випробуваного зразка. Під впливом електричної дуги в поверхневому шарі електроізоляційного матеріалу утворюється струмопровідна перемичка між електродами. Опір цієї перемички менше, ніж опір повітряного проміжку між електродами. У зв'язку з цим дуга шунтується струмопровідною перемичкою і гасне. Момент появи перемички фіксується за загасанням дуги. Таким чином, параметрами дугостійкості в цьому випадку є час, необхідний для утворення струмопровідної перемички на досліджуваному зразку, і струм дуги.

Випробування матеріалів на стійкість до впливу електричної дуги постійної напруги проводяться відповідно до ГОСТ 10345. 2-78. Згідно із затвердженою методикою, на досліджуваній зразок впливають електричною дугою постійного струму при напрузі між електродами 220 В. Залежно від стану випробуваного зразка відповідно до таблиці 6.1 визначають клас стійкості даного матеріалу до впливу електричної дуги постійної напруги.

Таблиця 6.1 – Класи стійкості матеріалів до дії дуги постійної напруги до 1000 В

Клас	Горіння дуги при відстані між електродами менше або рівному 20 мм	Струмопровідна перемичка у випробуваному матеріалі		Процес, що протікає у випробуваному матеріалі
		під час горіння дуги	після охолодження зразка	
L1	Не припиняється	Утвориться	Зберігається	Обвуглюється і горить
L2	Припиняється	Те ж	Те ж	Розтріскується
L3	Не припиняється	" – "	" – "	Деструкція не відбувається
L4	Припиняється	Не утворюється	" – "	Плавиться і випаровується
L5	Не припиняється	Те ж	" – "	Деструкція не відбувається
L6	Припиняється	" – "	" – "	Те ж

Існуючі методи випробувань дозволяють лише порівняти дугостійкість різних матеріалів, причому результати випробувань, проведених у лабораторних умовах, можливо, будуть істотно відрізнятися від тих даних, які можуть бути отримані в реальних умовах експлуатації.

6.3 Прилади й обладнання

Випробування на стійкість до дії дуги змінного струму проводять на установці, зовнішній вигляд якої зображений на рисунку 6.1.

Установка містить підставку 1, яка за допомогою мікрометричного гвинта може переміщуватися у вертикальному напрямку, і два стояки 2 із затисками для кріплення електродів 3. Всі елементи установки розташовані на підставці 4. Електроди, які використовують для випробувань, мають вольфрамові наконечники, кут зрізу до осі яких становить 30° . Відстань між електродами встановлюється 6,5 мм.

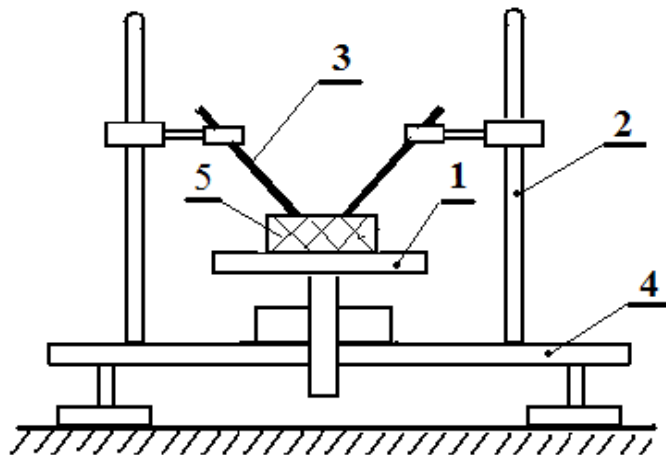


Рисунок 6.1 – Установка для випробування зразків на дугостійкість

Схема розташування електродів на зразку показана на рисунку 6.2.

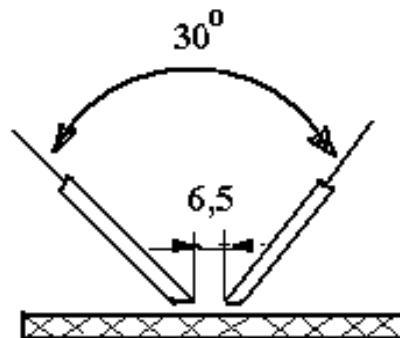


Рисунок 6.2 – Схема розташування електродів на зразку матеріалу

Принципова електрична схема приладу наведена на рисунку 6.3. Електроди підключаються до вторинної обмотки трансформатора потужністю 1-2 кВА. Середня точка вторинної обмотки заземлюється. Однак можливо використання трансформаторів із незаземленою середньою точкою, але в цьому випадку заземлюється один з електродів. Послідовно з електродами включений обмежувальний опір R . Величина струму, що протікає в другому ланцюзі, контролюється міліамперметром з межами вимірів 10...100 мА. Для виміру напруги на електродах використовують вольтметр V . Час горіння дуги фіксують секундоміром

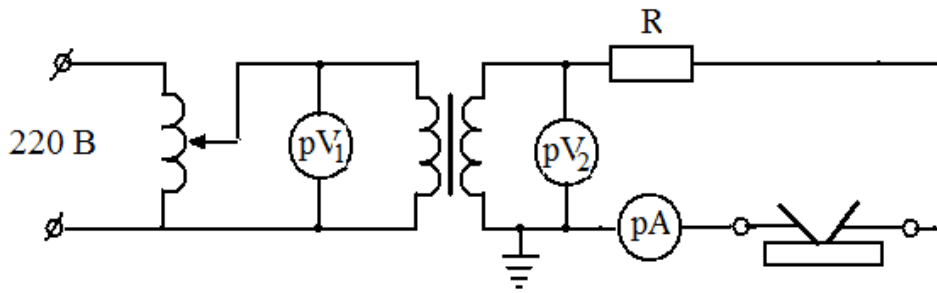


Рисунок 6.3 – Принципова електрична схема установки

Для випробувань використовують плоскі матеріали довільної форми товщиною не менше 3 мм, площа яких дозволяє розташовувати електрод на відстані не менше 8 мм від краю зразка. При проведенні декількох випробувань на одному зразку відстань між окремими зонами випробувань повинна бути не менше 15 мм.

За результат окремого випробування беруть сумарний час у секундах від початку випробування до моменту утворення струмопровідної перемички. За остаточний результат визначення стійкості матеріалів до дій дуги змінної напруги приймають середній арифметичний час всіх випробувань зразків.

Для матеріалів, у яких струмопровідна перемичка не утворюється, а відбувається їхнє плавлення або запалення, визначають глибину плавлення або ерозії і час від початку випробувань до моменту припинення.

Для проведення випробувань на стійкість матеріалів до дії дуги постійного струму використовують джерело, що дозволяє одержати напругу 220 ± 5 В з амплітудою пульсацій змінної складової, що не перевищує 5%. Напруга дуги контролюється вольтметром з похибкою виміру 2%. У зв'язку з тим, що похибка міліамперметра, призначеного для виміру струму дуги, не нормується, під час випробувань використовують індикатор. Для обмеження струму служить резистор R, величина опору якого 20 Ом.

Електрична дуга збуджується між вугільними необмідненими круглими електродами марки СК-8 діаметром 8 мм. Кінці електродів заточують на конус з кутом при вершині 60° . Вершини конусів закруглюють до радіуса 0,4...0,6 мм. Установка містить пристрій, що дозволяє розсовувати електроди у процесі випробувань із швидкістю 1 мм/с. Відстань між електродами фіксується за шкалою.

Для випробувань використовують плоскі зразки товщиною 12 мм круглої або квадратної форми. Діаметр кола або сторона квадрата повинна бути не менше 80 мм. При товщині випробуваного матеріалу менше 12 мм допускається складати кілька зразків щільною стопкою до одержання необхідної товщини.

За результатами випробувань матеріал відносять до одного із шести класів. Критерії вибору класу матеріалу наведені в таблиці 6.1.

6.4 Порядок виконання роботи

1. Для випробувань на стійкість матеріалів до дій електричної дуги змінного струму встановити електроди 3 на підставку 1 відповідно до рисунку 6.2. Потім підставку відвести долілиць від електродів на відстань 15 мм.

2. У присутності викладачів включити вимикач і за допомогою автотрансформатора Т1 підвищити напругу до розряду в повітрі між електродами. Після регулювання вимикач відключити.

3. Розташувати випробуваний електроізоляційний матеріал на підставці 1 й за допомогою мікрометричного гвинта підняти до зіткнення зразка 5 з електродами 3.

4. Виключити вимикач S. У момент виникнення дуги між електродами включити секундомір. При переході дуги на поверхню зразка або утворенні на поверхні матеріалу струмопровідної перемички секундомір виключити й відключити напругу. Результат випробувань записати в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати експериментальних досліджень стійкості діелектриків до дії електричної дуги змінної напруги

Найменування діелектрика	Напруга на вторинних обмотках	Струм дуги, мА	Час горіння дуги, с	Дугостійкість зразка, с
--------------------------	-------------------------------	----------------	---------------------	-------------------------

5. Змінити місця розташування електродів на зразку й повторити випробування за п. 3, 4.

6. За результатами шести випробувань кожного зразка визначити їх дугостійкість. Результати записати в таблицю 6.2.

7. Для випробувань на стійкість матеріалів до дії електричної дуги постійного струму розташувати досліджуваній зразок горизонтально плоскою поверхнею впритул до електродів.

8. У присутності викладача включити напругу й одночасно включити пристрій розсування електродів. При досягненні відстані між електродами 20 мм їхнє розсування припинити й відключити напругу.

9. Не міняючи положення електродів, через 1 хв включити напругу на 2-3 с і визначити наявність або відсутність струмопровідної перемички.

10. За результатами випробувань відповідно до таблиці 6.1 визначити клас дугостійкості досліджуваного матеріалу. Результати записати в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Результати експериментальних досліджень стійкості діелектриків до дії електричної дуги постійної напруги

Горіння дуги при відстані між електродами менше або рівному 20 мм	Струмопровідна перемичка у випробуваному матеріалі		Процес, що протікає у випробуваному матеріалі	Клас
	під час горіння дуги	після охолодження зразка		

11. Скласти звіт про роботу, що повинен містити формулювання мети роботи, принципові електричні схеми вимірів дугостійкості, заповнені таблиці 6.2, 6.3 і висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Поясніть, як виконується класифікація матеріалів за стійкістю до дії дуги постійного струму.
2. Дайте визначення дугостійкості електроізоляційних матеріалів.
3. Укажіть параметри, що характеризують стійкість матеріалів до дії дуги змінного струму.
4. Перелічіть вимоги до зразків випробуваних матеріалів.
5. Назвіть фактори, які можуть впливати на стійкість матеріалів до дії дуги змінного струму.
6. Поясніть призначення резистора в електричній схемі для випробування матеріалів до дії дуги змінного струму.

Л і т е р а т у р а: [4, с. 397-400].

Лабораторна робота № 7

ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРЯДИ ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ДІЕЛЕКТРИКА

7.1 Мета роботи

Використовуючи експериментальні установки, вивчити фізичні процеси виникнення електричного розряду на поверхні твердого діелектрика і вплив питомої поверхневої ємності на розвиток розряду.

7.2 Загальні положення

Різноманіття ізоляційних конструкцій із твердим діелектриком може бути зведене до трьох характерних випадків (рис. 7.1).

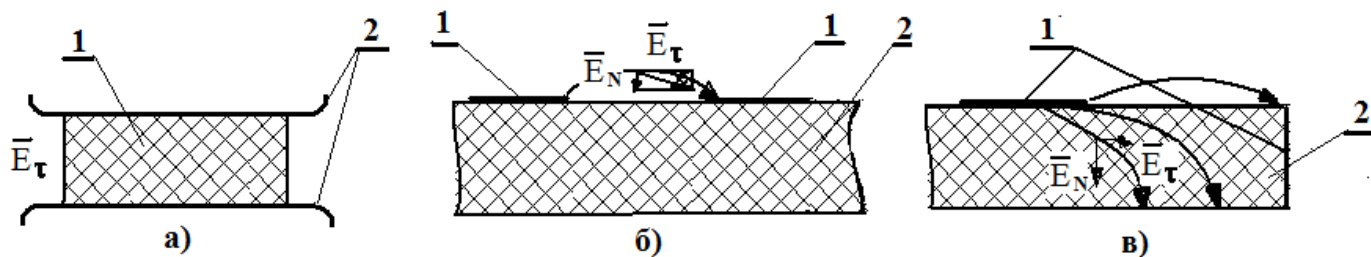


Рисунок 7.1 – Характерні розташування твердого діелектрика в електричному полі

При розміщенні діелектрика в однорідному полі (рис. 7.1, а) поверхня розділу діелектрика і повітря розташована уздовж силових ліній напруженості електричного поля (E_t). На рисунках 7.1б і 7.1в показане положення діелектрика в кон-

струкціях з неоднорідним полем. У першому випадку (рис. 7.1, б) у всіх точках поверхні діелектрика, за винятком дуже малих її ділянок поблизу електродів, переважає тангенціальна складова напруженості поля E_t , в іншому випадку (рис. 7.1, в) – навпаки.

Залежно від форми електричного поля на характер розвитку розряду і величину розрядної напруги впливають різні фактори.

При вміщенні діелектрика в однорідне поле природно було б припустити, що сталість напруженості поля не змінюється, пробій може відбутися в будь-якому місці, а розрядна напруга виявиться такою ж, як і для чисто повітряного проміжку. Однак у дійсності розряд відбувається завжди по поверхні діелектрика і має вигляд ковзних термоіонізованих світних каналів. Такий розряд називається ковзким.

Значну роль у зниженні розрядних напруг відіграє адсорбована волога. Матеріали, що володіють великою поверхневою гігроскопічністю (деревина, бакелізований папір), дають більше зниження розрядних напруг, ніж малогігроскопічні матеріали (парафін, вініпласт).

Разом з тим має значення тривалість прикладеної напруги. Більше в порівнянні з імпульсами зниження електричної міцності при прикладенні постійної або змінної напруги свідчить про відносно повільний розвиток процесу.

Адсорбована поверхнею діелектрика волога містить дісоційовані іони. В електричному полі порівняно повільно (через малу провідність зволоженого шару) відбувається перерозподіл зарядів на поверхні діелектрика. Поле поблизу електродів підсилюється, а в середині проміжку послаблюється. У результаті цього величина розрядної напруги зменшується. При імпульсах електричне поле в проміжку не встигає істотно спотворитися, тому величина розрядної напруги знижується в меншій мірі.

Крім зволоження поверхні діелектрика великий вплив на величину розрядної напруги можуть мати повітряні прошарки між діелектриком і електродами. У цих прошарках через різницю в діелектричних проникностях повітря і діелектрика створюється місцеве збільшення напруженості поля й виникає іонізаційний процес. Продукти іонізації виходять на поверхню, що приводить до значного (іноді вдвічі й більше) зниження розрядної напруги.

Таким чином, під однорідним електричним полем розуміється таке поле, в якого щільність електричних силових ліній напруженості E , що перетинають площадку, розташовану перпендикулярно до ліній поля, однакова у всіх точках.

У реальних конструкціях такого поля не існує через зазначені перекручування, а також крайових ефектів, шорсткостей і т.д., тому більш точна назва однорідного поля – квазіоднорідне поле («квазі» – майже).

Розташування діелектрика, показане на рисунку 7.1б, характерно для опорних ізоляторів. Електричне поле в цій конструкції неоднорідне, тому розрядні напруги нижче, ніж у випадку, показаному на рисунку 7.1а.

Гігроскопічні властивості діелектрика в цьому випадку мало впливають на величину розрядних напруг, оскільки процеси на його зволоженій поверхні можуть лише трохи збільшити й без того значну неоднорідність поля. Нецільне прилягання діелектрикам до електродів у реальних конструкціях обов'язково усувається за допомогою цементуючих замазок або прокладок.

Нижній електрод (фланець) опорного ізолятора звичайно буває з'єднаний із заземленими конструкціями, що мають значні розміри. Внаслідок цього напруженість поля у фланця зменшується і розряд починається з іншого електрода (шапки), що перебуває під високим потенціалом.

У конструкції, показаній на рисунку 7.1в, характерної для прохідних ізоляторів, у короткого електрода при відносно невеликій напрузі виникає коронний розряд у вигляді смужки рівного й неяскравого світіння.

Коронний розряд – розряд у локальному проміжку неоднорідного поля, що виникає в зоні найбільшої концентрації силових ліній напруженості електричного поля.

При збільшенні напруги область коронування розширюється і на поверхні діелектрика з'являються численні слабкосвітні канали (стримери), спрямовані у бік протилежного електрода. Ця форма стримерного розряду обумовлює ковзний розряд.

Чим більше величина струму в каналі ковзного розряду, тим вище провідність каналу й потенціал на його кінці, тим швидше росте довжина ковзного розряду й нижче виявляється розрядна напруга.

Величина струму при змінній напрузі визначається ємністю каналу розряду стосовно протилежного електрода. При однакових прикладених напругах струм у каналі буде тим значніше, чим більше величина цієї ємності. Очевидно, чим більше ємність, тим нижче повинна бути розрядна напруга при сталій відстані між електродами по поверхні діелектрика.

Як величина, що характеризує ємність каналу, приймається питома поверхнева ємність, тобто ємність одиниці поверхні, по якій розвивається розряд стосовно протилежного електрода.

Для наближеного розрахунку напруг поверхневого розряду можуть бути використані наступні емпіричні формули:

а) при відсутності нормальної складової напруженості електричного поля

$$U = 14 + 3,36l, \quad (7.1)$$

де U – розрядна напруга, кВ;

l – розрядна відстань, см;

б) напруга початкових ковзних розрядів при наявності нормальної складової напруженості електричного поля (формула Рота)

$$U_{ск} = \frac{1,36}{C 0,44} \cdot 10^{-4}, \quad (7.2)$$

де C – питома поверхнева ємність, що являє собою ємність одиниці поверхні, на якій розвивається розряд, стосовно протилежного електрода, $\Phi/\text{см}^2$.

Для плоского діелектрика величина питомої поверхневої ємності

$$C = \frac{8,66 \cdot 10^{-14} \epsilon_r}{h}, \quad (7.3)$$

де ϵ_r – відносна діелектрична проникність (5,5...5,7 – порцеляна, скло; 5,3...5,5 – бакеліт);

h – товщина діелектрика, см.

Для порожнистого циліндричного діелектрика

$$C = \frac{2 \cdot 8,66 \cdot 10^{-14} \epsilon_r}{D \ln \frac{D}{d}}, \quad (7.4)$$

де D і d – зовнішній і внутрішній діаметри діелектрика, см.

7.4 Прилади й обладнання

Спрощена експериментальна схема установки показана на рисунку 7.2.

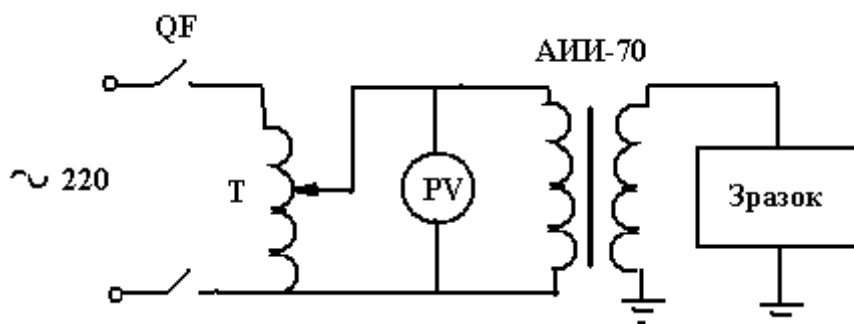


Рисунок 7.2 – Принципова електрична схема установки

Джерелом напруги промислової частоти служить випробувальний трансформатор апарата АИИ-70 на 50 кВ (діюче значення). Напруга його регулюється за допомогою автотрансформатора й вимірюється з боку нижчої напруги вольтметром PV_1 . Рубильник служить для комутації напруги випробувальної установки й створення видимого розриву.

Для одержання розрядних напруг в однорідному полі використовується проміжок між двома дисками із закругленими краями (електроди Роговського). У проміжок вміщуються діелектричні циліндри різної висоти h , зроблені з гігроскопічного й малогігроскопічного матеріалів (рис. 7.1, а).

Розрядні напруги по поверхні діелектрика при вміщенні його в неоднорідне поле з переважно тангенціальною складовою вивчаються на конструкції, зображеній на рисунку 7.3а. Електроди являють собою металеві кільця 1, відстань між якими можна змінювати в широких межах. Як твердий діелектрик використовуються скляні, порцелянові або бакелітові трубки.

Вивчення розрядних напруг у неоднорідному полі з великою нормальною складовою проводиться по конструкції, показаній на рисунку 7.3б.

Для збільшення нормальної складової усередину трубки вводиться заземлений електрод 3 таким чином, щоб внутрішній кінець його перебував приблизно посередині трубки. Переміщуючи кільце 2 по поверхні трубки, можна міняти відстань L між електродами. Питома поверхнева ємність у цьому пристрої не змінюється.

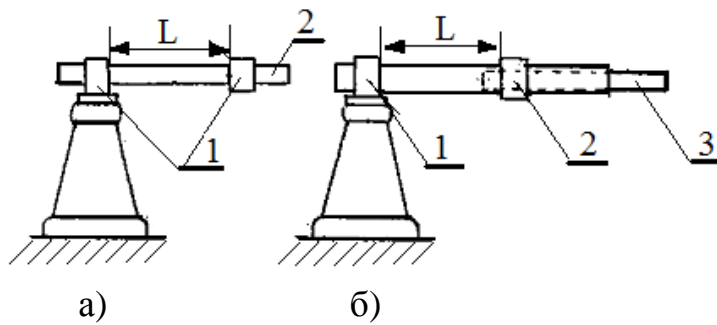


Рисунок 7.3 – Установка для проведення дослідів

7.4 Порядок виконання роботи

1. Перед початком роботи ознайомиться зі схемою установки, розташуванням її елементів і об'єктів випробування і правилами безпечної роботи на установці.
2. Підключити до трансформатора як випробуваний об'єкт установку з електродами Роговського (рис. 7.1, а).
3. Змінюючи відстань між електродами, встановити значення розрядних напруг. Вимірювані значення занесіть у таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Значення розрядних напруг проміжку

Відстань між електродами, l , см	Повітряний проміжок					Діелектрики														
						гігроскопічний					малогігроскопічний									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5					
Розрядна напруга U_p ,																				
Середній градієнт напруги E , кВ/см																				

4. Визначити розрядні напруги проміжку з вміщеним між електродами твердим діелектриком, спочатку виконаним з гігроскопічного, а потім з малогігроскопічного діелектрика. Результати вимірів занести в таблицю 7.1. побудувати графік залежності $U_p = f(l)$. Визначити середні розрядні градієнти напруги й побудувати графіки $E_{cp} = \varphi(l)$.
 5. Підключити до трансформатора як випробуваний об'єкт установку (рис. 7.3, а), подавши на один з електродів напругу, а інший заземливши.
 6. Змінюючи відстань між електродами l , визначити розрядні напруги по поверхні діелектрика. Величину встановлювати в межах від 1 до 3 см. Результати вимірів занести в таблицю 7.2.
- Побудувати графіки залежності $U_p = f(l)$ й $E_{cp} = \varphi(l)$.

Таблиця 7.2 – Значення розрядних напруг по поверхні діелектрика

Відстань між електродами, l, см	Неоднорідне поле					
	з переважною тангенціальною складовою			з переважною нормальною складовою		
	1	2	3	1	2	3
Розрядна напруга U_p , кВ						
Середній градієнт напруги E_p , кВ/см						

7. Підключити до трансформатора як випробуваний об'єкт установку (рис. 7.3, б), подавши напругу на електрод 2 і заземливши трубку 3.

8. Витримуючи відстані l такими ж, як у п. 6, знайти значення розрядних напруг по поверхні діелектрика. Результати вимірів занести в таблицю 7.2.

9. За результатами дослідів п.п. 6, 8 побудувати криві залежності $U_p = f(l)$ і $E_{cp} = \varphi(l)$.

10. За вказівкою викладача зробити контрольні розрахунки й зіставити результати з обмірюваними значеннями. Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Чим можна пояснити розбіжність у значеннях розрядної напруги, отриманих при експериментах (табл. 7.1) для різних матеріалів?

2. Що таке розрядна напруга, який її фізичний зміст?

3. Що таке однорідне і неоднорідне поля?

4. Зіставте значення розрядних градієнтів і поясніть результати зіставлення.

5. Що таке корона і який її фізичний зміст?

Л і т е р а т у р а: [2, с. 75-88].

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Колесов С. Н., Колесов И. С. Электротехнические и конструкционные материалы. – К.: Транспорт, 2003.
3. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. – М.: Высш. шк., 1986.
4. Довідник по електротехнічних матеріалах: В 3т. / Під ред. Ю. В. Корицького та ін. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1982.

ЗМІСТ

Стор.

Лабораторна робота 1. Дослідження електропровідності твердих діелектриків	3
Лабораторна робота 2. Визначення відносної діелектричної проникності й тангенса кута діелектричних втрат твердих діелектриків при підвищених частотах	8
Лабораторна робота 3. Визначення в'язкості рідких діелектриків	13
Лабораторна робота 4. Визначення основних характеристик феромагнітних матеріалів	17
Лабораторна робота 5. Дослідження залежності питомого опору провідникових матеріалів від температури	23
Лабораторна робота 6. Визначення дугостійкості твердих електроізоляційних матеріалів	27
Лабораторна робота 7. Електричні розряди по поверхні твердого діелектрика	32

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з курсу

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

(для студентів 2 курсу денної і 3 курсу заочної форм навчання бакалаврів
за напрямками 6.050701 – Електротехніка та електротехнології
та 6.050702 – Електромеханіка)

Укладач **ДЬЯКОВ Євген Дмитрович**

Відповідальний за випуск *В. М. Гаряжа*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Г. О. Павлова*

План 2013, поз. 208 М

Підп. до друку 09.09.2013 р.

Друк на ризографі.

Тираж 50 пр.

Формат 60×84/16

Ум. друк. арк. 1,7

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4705 від 28.03.2014 р.