

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

**КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ
МАТЕРІАЛИ**

**Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності:**

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Затверджено на засіданні кафедри
автоматизації виробничих процесів,
протокол №1 , від 30.08.2020р.

м. Кропивницький
2020 р.

Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт з курсу: «Конструкційні та електротехнічні матеріали» для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, Сербул О.М., Дідик О.К., Мірошніченко М.С. - Кропивницький: ЦНТУ, 2020. -38 с.

Укладачі: Сербул О.М., канд. техн. наук, доцент;

Дідик О.К., канд. техн. наук, доцент;

Мірошніченко М.С., канд. техн. наук, доцент.

Рецензент: Осадчий С.І., д-р. техн. наук, професор.

Дійсні методичні вказівки складені у відповідності з програмою курсу “Конструкційні та електротехнічні матеріали” для використання студентами спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. До них введені типові лабораторні роботи, що охоплюють вузлові теми курсу.

В кожній лабораторній роботі коротко визначається мета її проведення, наводяться загальні відомості, опис установок і даються рекомендації до проведення експериментів і обробки результатів досліджень, в заключній частині наводиться перелік рекомендованої літератури.

Виконання студентами лабораторних робіт сприяє закріпленню отриманих знань і набуттю умінь та навиків по вимірюванню основних параметрів електротехнічних матеріалів.

Виконанню кожної лабораторної роботи повинно передувати вивчення відповідної теоретичної частини курсу. Так як проведення лабораторних занять може випереджувати викладений на лекціях матеріал (особливо на вечірніх і заочних факультетах), то теоретичні відомості дані в дещо розширеному плані, що повинно забезпечувати студентам підготовку до занять.

Лабораторна робота № 1

Визначення питомого опору твердих діелектриків.

Мета роботи: вивчити стандартний метод визначення питомого об'ємного і питомого поверхневого опорів;
визначити залежність питомого опору діелектриків від застосованих напруг, протяжності його дії, температури, вологості.

1.1. Короткі відомості

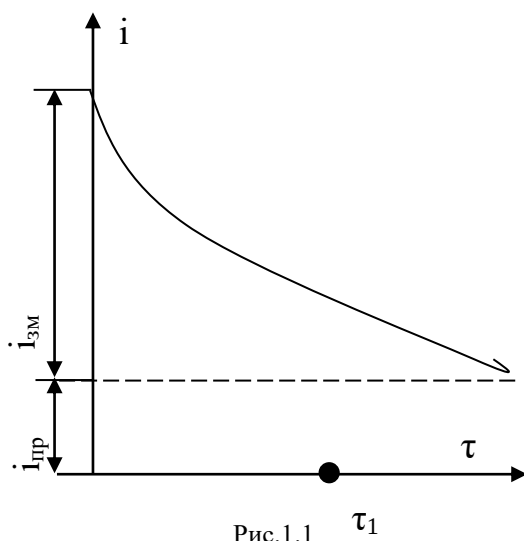
Будь-який реальний діелектрик володіє певною електропровідністю. Якщо помістити діелектрик в електричне поле, то через нього почне протікати струм, що складається зі струму провідності i_{np} та струму зміщення $i_{зм}$:

$$i = i_{np} + i_{зм}$$

Струм провідності в твердих діелектриках має іонний, електронний і змішаний (іонно-електронний) характер. Але в більшості випадків він має іонний характер, що пов'язано з наявністю вільних іонів як самого діелектрика, так головним чином домішок.

Струм зміщення зв'язаний з поляризаційними процесами. При сповільнених видах поляризації (іонно-релаксаційної, дипольної, спонтанної) він проявляється в значному ступені і носить назву струму абсорбації.

Залежність струму в діелектрику від часу $i = f(\tau)$ зображена на рис.1.1. В



початковий момент часу струм зміщення $i_{зм}$ має найбільше значення, а в момент τ_1 він практично дорівнює нулю, тобто при $\tau > \tau_1$ через діелектрик протікає в основному струм провідності. Для практичних розрахунків прийнято вважати $\tau_1 = 1 \text{ хв}$.

Опір діелектрика визначається за формулою:

$$R_{U3} = \frac{U}{I_{np}}$$

де U – прикладена до діелектрика напруга.

В твердих діелектриках струм провідності протікає двома шляхами: через товщину матеріалу та по поверхності матеріалу, тому його представляють у вигляді двох складових – об'ємного i_v і поверхневого i_s (рис.1.2.):

$$i_{np} = i_v + i_s$$

В зв'язку з цим розрізняють об'ємний R_v і поверхневий R_s опори діелектрика. Вони сполучені паралельно і їх загальний опір:

$$R_{из} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}$$

Для оцінювання ізоляційної якості діелектрика (в ланцюзі постійного струму) вводиться поняття питомого об'ємного ρ_v та поверхневого ρ_s опорів.

Питомий об'ємний опір ρ_s — це опір куба даного матеріалу з ребром в 1 метр при умові, що струм протікає між його протилежними межами.

В плоскому зразку його об'ємний опір (в рівномірному електричному полі).

$$R_V = \rho_v \frac{h}{S}$$

де h - товщина зразка, S – площа електроду.

Звідки $\rho_v = R_V \frac{S}{h}$. В СІ питомий об'ємний опір вимірюється в ом-метрах (ом м).

Питомий поверхневий опір ρ_s – це опір ділянки поверхні діелектрика у вигляді квадрату похідних розмірів при умові, що струм протікає між його протилежними сторонами.

Якщо ділянка поверхні діелектрика має форму прямокутника, то його поверхневий опір

$$R_S = \rho_s \frac{l}{b},$$

де l -відстань між електродами (висота прямокутника); b -ширина електроду (ширина основи прямокутника). В СІ одиницею питомого поверхневого опору є ом.

З урахуванням сказаного завдання визначення ρ_v та ρ_s діелектрика зводиться до вимірювання R_V та R_S .

Повні опори діелектрика R_V та R_S визначають, вимірюючи струм, що протікає через зразок відповідно i_v та i_s за відомої прикладеної напруги:

$$R_V = \frac{U}{i_v}; R_S = \frac{U}{i_s}.$$

Вимірювання необхідно виконувати при постійній напрузі U , так як при змінній напрузі через зразок, окрім струму провідності, буде протікати також і струм зміщення.

Для розділення струмів i_v та i_s застосовують систему, що складається з трьох електродів: високовольтного, вимірювального та охоронного. Два електроди мають циліндричну форму, а третій виконаний у вигляді кільця (Рис.1.3, 1.4).

Розміри електродів і спосіб нанесення їх на зразок встановлені ГОСТ 6433.2-71.

На рис .1.3 та 1.4 :0 - зразок; ВЕ - високовольтний електрод; ВЕ – вимірювальний електрод; ОЕ –охоронний електрод; $R_{ш}$ – шунт.

Для вимірювання відповідної сили струму служить гальванометр.

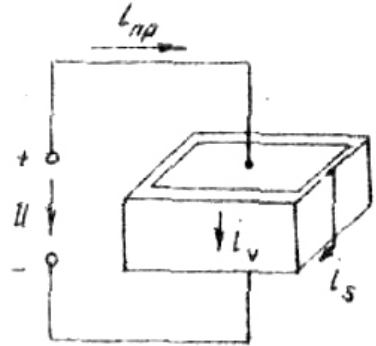


Рис .1.2

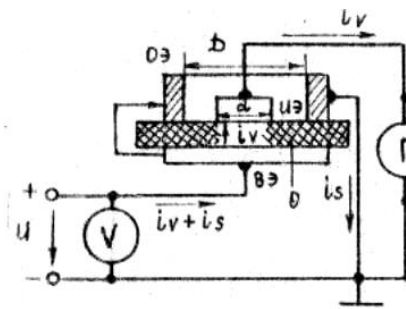


Рис. 1.3

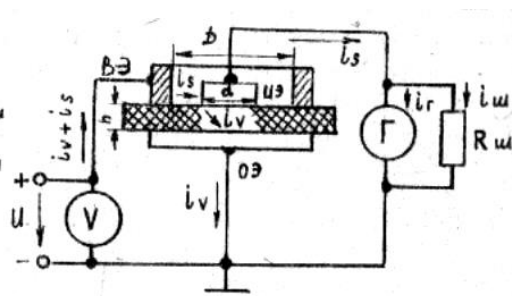


Рис. 1.4

Для обмеження струму через гальванометр використаний шунт $R_{ш}$. Коефіцієнт шунта k рівний відношенню вимірюваного струму до струму гальванометра:

для схеми рис. 1.3 $k = \frac{i_V}{i_G}$

для схеми рис. 1.4 $k = \frac{i_S}{i_G}$

З теоретичного курсу відомо, що в наведених електродах ρ_V та ρ_S визначають за формулами:

$$\rho_V = \frac{U}{C_r \alpha k} \frac{\pi d^2}{4h}; \quad \rho_S = \frac{2\pi U}{C_r \alpha k \ln \frac{D}{d}}$$

де U — прикладена напруга; d — діаметр вимірюваного електроду; C_r — постійна гальванометра; α — відхилення стрілки гальванометра; k — коефіцієнт шунта; h — товщина зразка; D — діаметр кільцевого електроду.

При розрахунках всі величини, що мають розмірності, необхідно виражати в одиницях СІ.

1.2. Опис установки та методичні вказівки.

Досліджувана установка (рис. 1.5) складається з автотрансформатора, високовольтного випрямлювача, трьох електродів (між якими розташовується досліджуваний діелектрик), гальванометра та універсального шунта.

Випрямляч зібраний за мостовою схемою на напівпровідникових діодах. Для згладжування пульсації служить Т-подібний фільтр. Посилуючий трансформатор Тр-1 забезпечує на виході випрямляча напруги 1600-1700 В. Вихідна напруга вимірюється вольтметром V і поступає на зразок. За допомогою автотрансформатора можна регулювати напругу, що надходить на первинну обмотку трансформатора Тр-1 (вхід випрямляча), а звідси, і напруга на виході випрямляча.

За допомогою перемикача П І можна або подавати напругу на зразок (положення 1), або замкнути на коротко вихід випрямляча (положення 2), що необхідно для розрядки конденсатора фільтра C . Перевід перемикача ПІ в положення 2 можливе лише при вимкненій установці. За допомогою універсального шунта $R_{ш}$ можна змінити силу струму, що протікає через

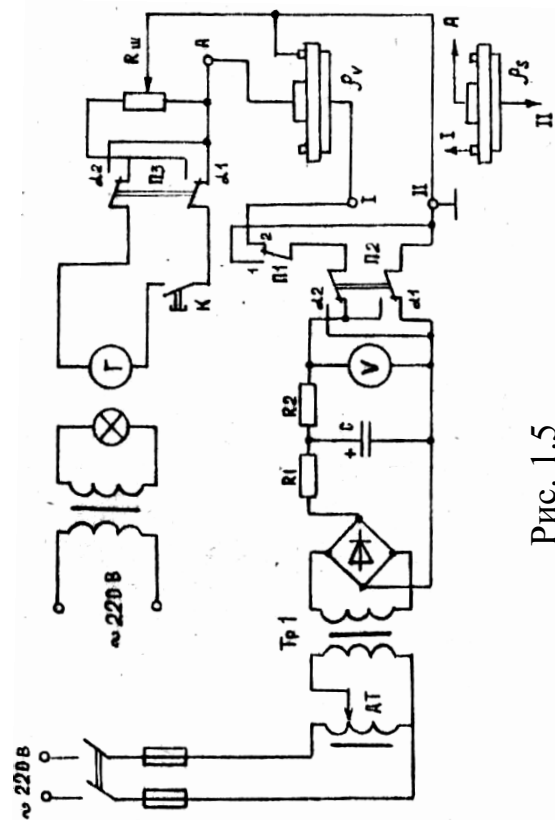


Рис. 1.5

гальванометр і таким чином змінити граничні виміри приладу. Коефіцієнт шунта можна вибрати рівним 1, 10, 100.

За допомогою перемикачів П 2 та П 3 можна змінити напрям струмів через зразок і гальванометр. Для включення гальванометра служить кнопка К. Положення $\alpha 1$ цих перемикачів відповідає одному напрямку струму, а положення $\alpha 2$ - протилежному напрямку.

Підключення електродів зразка для вимірювання ρ_v та ρ_s видно зі схеми.

Окрім наведених приладів на робочому місці є також термостат, ексикатор та секундомір.

1.3. Порядок виконання роботи

Зібрати схему рис. 1.5 і після перевірки її керівником приступити до проведення експерименту. При цьому для всіх дослідів необхідно дотримуватися такої послідовності:

1. Встановити універсальний шунт в положення $K_{max} = 100$.
2. За допомогою автотрансформатора встановити напругу, при якій буде проводитись вимірювання.
3. Встановити перемикачі П2 та П3 в положення $\alpha 1$.
4. Через 1 хв. виміряти силу струму, що проходить через зразок. Для цього нажати кнопку К і, підбираючи коефіцієнт шунта, добитися відхилення стрілки гальванометра на величину, придатну для вимірювання.
5. Виконати друге вимірювання сили струму в тому ж напрямі, але при протилежній полярності (П 2 та П 3 встановити в положення $\alpha 2$). Для

розрахунків прийняти середнє значення відхилень стрілки гальванометра при обох полярностях.

6. Відключити живлення схеми і за допомогою перемикача П 1 розрядити конденсатор фільтра С.

Дослід 1.

Визначити залежність ρ_v та ρ_s від напруги для двох-трьох зразків. Границі вимірювання напруги задаються керівником. Дані вимірювань та обчислень зводяться в табл.1.1

Таблиця 1.1

Матеріал і його товщина	Дані вимірювань					Дані обчислень
h, м	U, В	K	$\alpha 1$	$\alpha 2$	α_{cp}	ρ_v Ом м або ρ_s Ом

Дані для розрахунку: $D = \dots$ м
 $d = \dots$ м
 $Cr = \dots$ А/дел

Побудувати графіки: $\rho_v = f(U)$
 $\rho_s = \psi(U)$

Дослід 2.

Визначити залежність ρ_v від температури для одного зразка. Для цього зразок разом з електродами поміщають в термостат. Кількість точок, інтервал зміни температури та напруга задаються керівником. Результати вимірювань та розрахунки зводяться в табл. 1.2

Таблиця 1.2

Матеріал і його товщина	Дані вимірювань					Дані розрахунків
l, m	t^0, C	K	$\alpha 1$	$\alpha 2$	α_{cp}	ρ_v Ом м

Дані для розрахунків: $U = \dots$ В

Побудувати графік залежності $\rho_v = \theta(t^0)$, при $U = const$ (D, d , і Cr – такіж, що й у першому досліді).

Дослід 3.

Визначити залежність ρ_v та ρ_s від вологості навколишнього середовища. Для цього ряд зразків з одного й того ж матеріалу поміщають в ексікатори, в яких в результаті різних концентрацій вологопоглинаючих сумішей створюється різна вологість. Напруга задається керівником. Дані вимірювань та розрахунки заносяться до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Матеріал і його товщина, м	Дані вимірювань					Дані розрахунків	
	$\varphi \%$	K	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha_{\text{ср}}$	ρ_v , Ом м	ρ_s Ом

Дані розрахунків: $U = \dots V$
 $t = \dots ^\circ C$

(D, d та Cr – такі, що і в першому досліді).

Побудувати графіки: $\rho_v = \psi_1(\varphi)$;
 $\rho_s = \psi_2(\varphi)$.

1.4. Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1) схему установки (рис.1.5);
- 2) розрахункові формули;
- 3) таблиці експериментальних і розрахункових даних;
- 4) графіки функцій: $\rho_v = f(U)$;

$$\rho_s = \varphi(U);$$

$$\rho_v = \theta(t);$$

$$\rho_v = \psi_1(\varphi);$$

$$\rho_s = \psi_2(\varphi).$$

Контрольні запитання

1. Дати визначення ρ_v та ρ_s та вказати одиниці їх вимірювання.
2. Дати опис схеми установки (рис. 1.5).
3. Чи можуть значення ρ_v та ρ_s бути критерієм для оцінки ізоляційних властивостей діелектрика:
 - а) в ланцюгах постійного струму,
 - б) в ланцюгах змінного струму?
4. Чому для вимірювання ρ_v та ρ_s необхідне джерело постійного струму?
5. Чому для вимірювання ρ_v та ρ_s використовують три електроди?
6. Поясніть хід залежностей $\rho_v = f(U)$; $\rho_s = \varphi(U)$; $\rho_v = \theta(t)$; $\rho_v = \psi_1(\varphi)$; $\rho_s = \psi_2(\varphi)$ (1, с.33-49; 2, с. 61-73; 3, с.122-130).

Лабораторна робота № 2.

Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат та діелектричної проникності твердих діелектриків.

Мета роботи: познайомитися з мостовим методом вимірювання $\operatorname{tg}\delta$ та ϵ при частоті 50 Гц.

2.1. Короткі відомості

Відносна діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат — найважливіша характеристика електроізоляційних матеріалів.

Відносна діелектрична проникність показує у скільки разів збільшується ємність конденсатора C_0 , якщо вакуум між його пластинами замінити даним діелектриком $C\delta$:

$$\epsilon = \frac{C_\delta}{C_0}$$

Кут діелектричних втрат δ — це кут, доповнюючий кут зсуву фаз φ між струмом та напругою в ланцюзі, в якому знаходиться конденсатор з даним діелектриком:

$$\varphi + \delta = 90^\circ.$$

На практиці частіше користуються не кутом втрат, а його тангенсом $\operatorname{tg}\delta$.

Діелектричні втрати — це активна сила, що виділяється діелектриком, працюючому при змінній напрузі. Вона обчислюється за формулою:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta$$

де U — діюче значення прикладеної до діелектрика напруги; $\omega = 2\pi f$ — кутова частота; C — ємність пристрою з даним діелектриком.

Тангенс $\operatorname{tg}\delta$ дуже чутливий до зміни якості ізоляції: вологість і забруднення ізоляції ведуть до збільшення $\operatorname{tg}\delta$. Тому, вимірюючи $\operatorname{tg}\delta$, контролюють стан ізоляції трансформаторів конденсаторів, електричних машин, високовольтних вводів, кабелів та іншого обладнання.

Існують різні методи вимірювання $\operatorname{tg}\delta$ і ϵ (мостові, резонансні, з застосуванням “биений” та інші). В запропонованій роботі застосований мостовий метод.

2.2. Опис установки та методичні вказівки.

На рис. 2.1 показана принципова схема мосту змінного струму.

В плечах мосту знаходяться комплексні опори Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 . До одної діагоналі мосту підводиться напруга живлення $U_{\sim}$, до другої підключений гальванометр.

Умови балансу мосту (відсутність струму в вимірювальній діагоналі):

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$$

Для вимірювання $\text{tg}\delta$ та ϵ користуються схемою, зображеною на рис. 2.2.

До клем X—X підключений досліджуваний діелектрик, зображений послідовною еквівалентною схемою $C_x R_x$.

В якості Z_2 використовується еталонний повітряний конденсатор C_0 ;

В якості Z_4 паралельно включені активні опори R_4 і регулюєма ємність C_4 ; в якості Z_3 — регульований активний опір R_3 .

Плечі мосту мають такі значення повних опорів:

$$Z_1 = R_x - \frac{j}{\omega C_x}$$

$$Z_2 = \frac{-j}{\omega C_0}$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

Для послідовної схеми заміна конденсатора з втратами

$$\text{tg}\delta = \omega C_x R_x.$$

Змінюючи величини R_3 та C_4 , досягають відсутності струму в вимірювальній діагоналі, тоді по умові балансу

$$\left(R_x - \frac{j}{\omega C_x} \right) \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} = \frac{-j R_3}{\omega C_0}$$

Після перетворення отримаємо:

$R_4 R_x \omega^2 C_x C_0 - j R_4 \omega C_0 = j R_3 \omega C_x + \omega^2 C_x C_4 R_4 R_3$ Прирівнюючи окремо дійсні та уявні частини, знаходимо, що:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_0}$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}$$

($C_0 = 100$ пф). Звідси $\text{tg}\delta = \omega C_x R_x = \omega C_4 R_4$.

Якщо вибрати $R_4 = \frac{10^4}{\pi} = 3183$ Ом, то

$$\omega R_4 = 2\pi f \cdot \frac{10^4}{\pi} = 2 \cdot 50 \cdot 10^4 = 10^6 \text{ та } \text{tg}\delta = 10^6 C_4.$$

Отже, якщо відградувати шкалу магазину ємностей C_4 в мікрофарадах, то поділки шкали дадуть $\text{tg}\delta$.

Вимірявши C_x за формулою (2.1), можна визначити відносну діелектричну проникність з формули ємності плоского конденсатора, пФ:

$$C_x = \frac{\varepsilon S}{4\pi \cdot 0,9h}$$

де S – площа верхнього електроду, см^2 ; h – товщина зразка, см .

Знаючи C_x та $\text{tg}\delta$, можна визначити:

втрати в діелектрику, Вт:

$$P = U^2 \omega C_x \text{tg}\delta$$

де U – вимірюється в вольтах; C_x – в фарадах;

питомі втрати, Вт/м:

$$P_{yo} = \frac{P}{V} = \frac{P}{Sh}$$

Для вимірювань використовується установка з мостом типу Р 525, схема якої показана на рисунку 2.3.

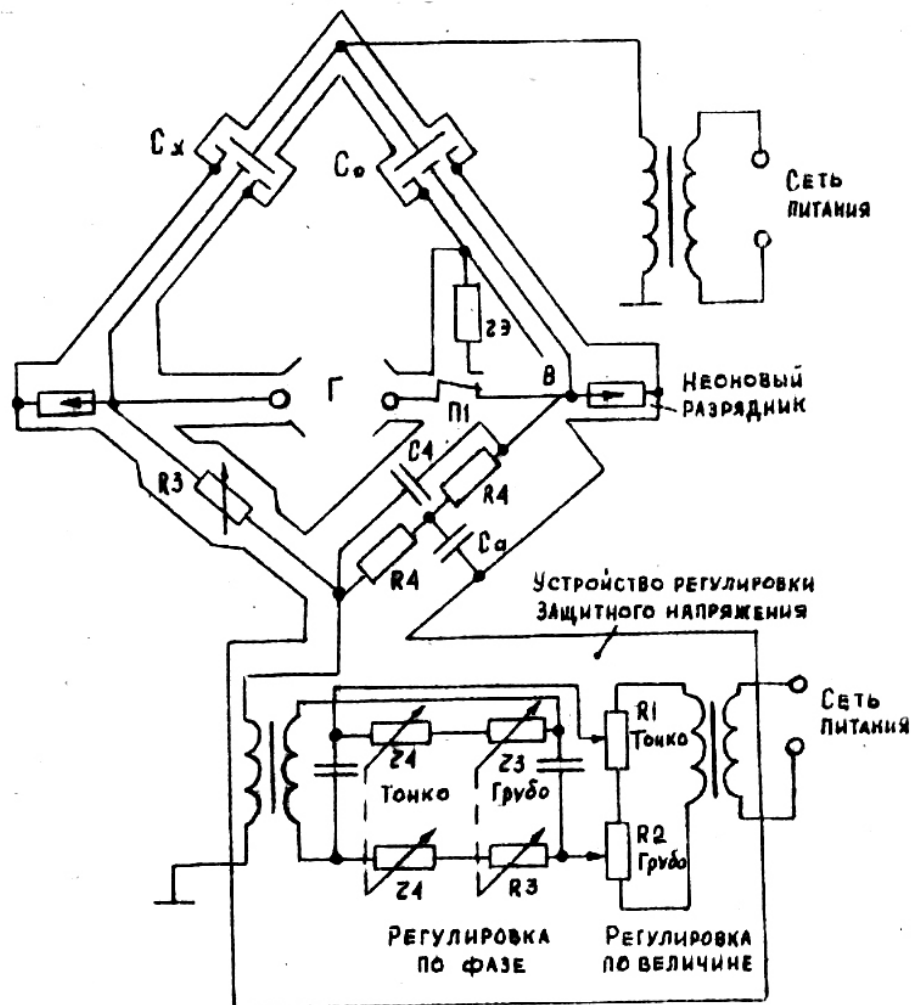


Рис. 2.3

Окрім розглянутих елементів (рис. 2.2) є ще ряд додаткових елементів:

підсилювач U для збільшення чутливості гальванометра;

неонові розрядники (неонові лампи СН –2А), підключені в точки a та b схеми для захисту оператора від високої напруги (у випадку пошкодження C_x або C_o)

Всі елементи мосту та з'єднувальні дроти розміщені в заземлені екрани, що захищають схему від дії зовнішніх електричних та магнітних полів.

Від середньої точки опору R4 приєднаний конденсатор C_a , що служить для вирівнювання паразитних ємностей між плечима мосту та екрану.

Для компенсації струмів втрат через ізоляцію схеми на екран є прилад, який створює захисну напругу, яка повинна бути рівною за величиною і протилежною за фазою падіння напруги на R3, з тим, щоб точка a і приєднаний до неї гальванометр риси б потенціал землі, що і забезпечує рівність струмів в плечах мосту при його врівноваженні.

Схема для створення захисної напруги містить розподільувач R1 – R2 для регулювання захисної напруги і фазорегулятор r_4 – r_3 для регулювання фазового зміщення. Контроль за встановленням потрібної величини і фази захисної напруги здійснюється за відсутністю струму в нульовому індикаторі (підсилювач з гальванометром) при підключенні його між точкою a і екраном через резистор Rэ (перемикач П 1 переведений до резистора Rэ). Вимірювальний електрод, розташований на зразку, оточується заземленим захисним кільцем для відводу на землю струмів втрат, що йдуть по поверхні зразку і для вирівнювання поля на краю вимірювального електроду.

На панелі мосту у верхньому ряді розташовані ручки регулювання опору R3, в середньому ряді – ручки регулювання ємності C4, визначаючий значення $\text{tg}\delta$, і в нижньому ряді – ручки регулювання захисної напруги за величиною і фазою.

По вертикалі на лівій стороні панелі розташовані зажими: 1) для заземлення; 2) для приєднання C_0 ; 3) для приєднання зразка S_x ; 4) вхід підсилювача (там же розташований перемикач П 1).

Вказівки з техніки безпеки

Увага! Висока напруга, створювана установкою, небезпечна для життя.

До роботи на установці допускаються особи, що мають право працювати на високовольтних установках.

Перед початком роботи необхідно вивчити принцип дії установки, правила експлуатації, порядок проведення випробувань. Необхідно суворо дотримуватися правил техніки безпеки.

Працювати на установці дозволяється лише одному члену бригади, який має допуск до роботи з установками, напруга яких вища 1000 В. Решта членів бригади повинні знаходитись на відстані не менше 1,5 м від установки (оператора). Приступаючи до роботи, оператору слід перевірити надійність заземлення.

Оператор повинен працювати тільки в гумових рукавицях і чоботах, стоячи на діелектричному килимку; суворо дотримуватись послідовності включення та виключення установки. Після виключення установки за допомогою вимикача оператор повинен вийняти вилку живлення з розетки, щоб створити розрив в ланцюзі живлення. Тільки після цього він може зняти рукавиці.

2.3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему. Всі елементи схеми повинні отримати живлення від одних і тих же фаз і тієї ж мережі. Живлення високовольтного трансформатора здійснюється через автотрансформатор.

2. Встановити ручки підсилення підсилювача і чутливості гальванометра в положення мінімуму.

3. Встановити ручки нижнього ряду на нулю.

4. Встановити перемикач П1 в середнє положення, а ручку пристрою, що регулює напругу на первинних зажимах підвищуючого трансформатора, в положення, що відповідає мінімуму напруги.

5. Включити Со та Сх (досліджуємий конденсатор або тримач зразка).

6. Після перевірки схеми керівником включити рубильники живлення і плавно підвищувати напругу на зажимах підвищуючого трансформатора до величини, що вимагають умови випробовування досліджуємого об'єкту, одночасно спостерігаючи за неоновими розрядниками.

7. Встановити П1 в положення "Осн. мост" і перевести ручку підвищення підсилювача в середнє положення; почерговим повертанням ручок декад R3 і середнього ряду добитись рівноваги мосту, поступово збільшуючи чутливість гальванометра і підсилення підсилювача.

Після досягнення рівноваги ручку чутливості гальванометра повернути в початкове положення.

Лабораторна робота №3 Електрична міцність твердих діелектриків

Мета роботи: вивчити методику визначення електричної міцності діелектриків; дослідити залежність електричної міцності від товщини діелектрика, виду напруги, часу прикладання напруги; ознайомитися з явищем поверхневого перекриття.

3.1. Короткі відомості

Електрична міцність - одна з основних характеристик діелектрика. Кожний діелектрик, знаходячись в електричному полі, втрачає свої електроізоляційні властивості, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Це явище називається пробоем діелектрика.

Значення напруги, при якій відбувається пробій, називається пробивною напругою U_{np} відповідне значення напруженості поля - пробивною напруженістю або електричною міцністю діелектрика E_{np} . Для рівномірного електричного поля $E_{np} = \frac{U_{np}}{h}$, де h - товщина діелектрика .

В СІ електрична міцність вимірюється у вольтах на метр /В/м/. На практиці допускається вимірювання електричної міцності в кіловольтах на міліметр (кВ /мм) або в мегавольтах на метр Мв/м). Співвідношення між

одинацями таке: $1 \text{ кВ /мм} = 1 \text{ МВ/М} = 10^6 \text{ В/м}$.

Розрізняє чотири види пробою твердих діелектриків.

1. Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків.
2. Електричний пробій макроскопічно неоднорідних діелектриків.
3. Тепловий пробій.
4. Електрохімічний пробій.

Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків.

Цей вид пробою спостерігається в діелектриках однорідної структури (без грубих сторонніх включень, у тому числі і газових) і має місце, коли виключений вплив електропровідності і діелектричних втрат, що обумовлюють нагрівання матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. Сутність процесу пов'язано з ударною іонізацією в твердому тілі: з небагатьох початкових електронів створюється електронна лавина.

Характерні ознаки даного виду пробою:

- 1) швидкий розвиток процесу, $\tau_{np} = 10^{-7} - 10^{-8}, \text{с}$;
- 2) електрична міцність може приймати великі значення до 1000 кВ /мм ;
- 3) E_{np} майже не залежить від товщини діелектрика і часу прикладання напруги;
- 4) E_{np} не залежить від температури (в певному інтервалі);
- 5) U_{np} в неоднорідному полі значно нижче, ніж U_{np} в однорідному полі (при одній і тій же товщині h).

Електричний пробій макроскопічно неоднорідних діелектриків.

Такий вид пробою має місце в технічних діелектриках із сторонніми включеннями (твердими, газовими) і так само, як і пробій макроскопічно однорідних, пов'язаний з ударною іонізацією і відрізняється вельми швидким розвитком процесу. Проте тут є свої особливості:

- 1) E_{np} зменшується із збільшенням товщини діелектрика;
- 2) E_{np} в неоднорідному полі може бути вищим, ніж в однорідному.

Це пояснюється тим, що із збільшенням товщини діелектрика або ступеню однорідності поля в межі поля потрапляє велике число слабких місць чужорідних включень (головним чином газових), що полегшує виникнення пробою.

Тепловий пробій твердих діелектриків

Тепловий пробій - це процес термічного руйнування діелектрика, що знаходиться в електричному полі.

Під дією як внутрішніх (діелектричні втрати), так і зовнішніх чинників (нагріву ізоляції в електричних машинах через дроти і сердечник) температура

діелектрика підвищується, відбувається його розтріскування, обвуглювання, проникнення в тріщини повітря і іонізація останнього.

Характерні ознаки теплового пробою:

- 1) порівняно повільний розвиток процесу (десятки секунд, хвилини, годинник);
- 2) пробою передують нагрів діелектрика .
- 3) E_{np} зменшується із збільшенням товщини діелектрика (погіршуються умови тепловіддачі);
- 4) E_{np} зменшується із збільшенням тривалості додатку напруги;
- 5) E_{np} зменшується із збільшенням частоти поля (оскільки збільшується діелектричні втрати $P = U^2 \cdot \omega C \tan \delta$) ;

Якщо діелектрик працює в плоскому конденсаторі, то з урахуванням того, що теплота відводиться головним чином через електроди, напруга теплового пробою, кВ:

$$U_{np} = 115 \sqrt{\frac{\sigma \cdot \delta h}{\varepsilon f \cdot \tan \delta_0 \cdot TK_{\tan \delta}}}$$

де σ - коефіцієнт тепловіддачі діелектрика, Вт/(м² · К); h - товщина діелектрика, м; ε – відносна діелектрична проникність; f - частота, Гц; $TK_{\tan \delta} = \frac{1}{\tan \delta} \frac{d \tan \delta}{dt}$ температурний коефіцієнт $\tan \delta$, К⁻¹

Електрохімічний пробій .

Цей вид пробою пов'язаний з гальванічними, іонізаційними і хімічними процесами, що розвиваються в діелектрики під дією електричного поля. Спостерігається в постійних і змінних полях низької частоти.

Через вказані процеси в діелектрики виділяються хімічно активні речовини (озон, оксиди азоту), які погіршують його електроізоляційні властивості, що, зрештою, приводить до пробою. Процес розвивається дуже повільно (місяці, роки) і на практиці носить назву старіння діелектриків.

3.2. Опис установки і методичні вказівки

Випробування електричної міцності діелектриків в даній роботі проводиться за допомогою установки УПУ-1М, призначеної для визначення E_{np} (або U_{np}) при постійній або змінній напрузі до 10 кВ, а також для оцінки струму витoku ізоляції випробовуваних об'єктів.

Схема електрична принципова за установку УПУ-1М показана на рис. 3.1.

Основною частиною установки служить високовольтний випрямляч, в який входять: силовий трансформатор Т р4, високовольтний кенотрон Л2, конденсатор фільтру С2 і автотрансформатор Тр3. Решта частини установки складається з елементів захисту і схем індикації. В схему входять також два

понижувачі трансформатори Тр1 і Тр2.

З трансформатора Тр1 знімається напруга накалу ламп Л2 і Л5 і напруга для живлення випрямного моста Д1; з трансформатора Тр2 - напруга накалу ламп Л3 і Л4, причому перша напруга використовується ще і для калібрування індикаторів струму і напруги. Всі ці напруги стабілізовані бареттером Л1. Автотрансформатор Тр3 служить для плавної зміни вихідної напруги.

З трансформатора Тр4, потужність якого не менше 1 кВ-А, знімається вихідна змінна напруга (виводи 4-6). Частина напруги вторинної обмотки (виводи 5-6) використовується для отримання вихідної постійної напруги. Вихідна напруга розбита на під діапазони 1 кВ, 3 кВ, 10 кВ. Перемикаються піддіапазони перемикачем В4а

Випрямляч виконаний на лампі Л2 і служить для отримання постійної вихідної напруги, що знімається з катода лампи Л2(+) і вивід 6 вторинної обмотки трансформатора Тр4 через ланцюг : міст Д5-Д8 - ділянка індикатора струму ИПП). Для згладжування пульсацій випрямленої напруги включений фільтр, що складається з конденсатора С2 .

До елементів захисту відносяться елементи блокування (В1, В5, В6, В8, В9, В10), реле Р1, лампа Л3 і розрядник РІ:

В1 - колодка блокування, розриває коло живлення установки при витяганні її з футляра;

В5 - мікро вимикач, замикає коло живлення реле Р1 1-2 при виводі ручки "Вихідна напруга" вліво повністю. При цьому контакти реле 7-8 замикають живлення автотрансформатора Тр3 . При повороті ручки управо мікро вимикач розмикається, проте, обмотка реле 1-2 залишиться включеною через контакти самоблокування 5-6;

В6 – мікро вимикач, замикає коло живлення силового трансформатора Тр4 при натисненні ручки "Вихідна напруга". При повороті цієї ручки вправо на виході установки з'являється напруга;

В8 - мікро вимикача, забезпечує проходження струму навантаження через індикатор ИП1 при роботі установки в режимі постійної напруги. Спрацьовування мікро вимикач в цьому випадку досягається введенням штекера в гніздо постійної напруги на вихідній платі. При роботі установки в режимі змінної напруги індикатор ИП-1 замкнутий;

В9 – мікро вимикач, розмикає коло живлення моста Д1 (а значить і котушки реле Р1) при відкритті захисної кришки, тим самим знімаючи високу напругу на виході;

В10 - кнопка блокування, розриває коло живлення установки при відкритті дверей загороди (дверці високовольтної камери).

Реле Р1 відключає вихідну напругу при перевантаженнях установки. Воно має два обмотки: 1-2 і 3-4, які живляться від випрямних мостів Д1 і Д2. По обмотці 3-4 проходить сила струму навантаження. Його магнітний потік в сердечнику реле направлений назустріч потоку, створюваному силою струму обмотки 1-2, і зменшує його при силі струму навантаження 60...100 мА настільки, що реле відпускає і розриває коло живлення автотрансформатора Тр3. Налаштовується реле потенціометрами Р1 і Р2.

Розрядник РІ захищає міст Д5-Д8 при КЗ з утворенням дуги на виході установки.

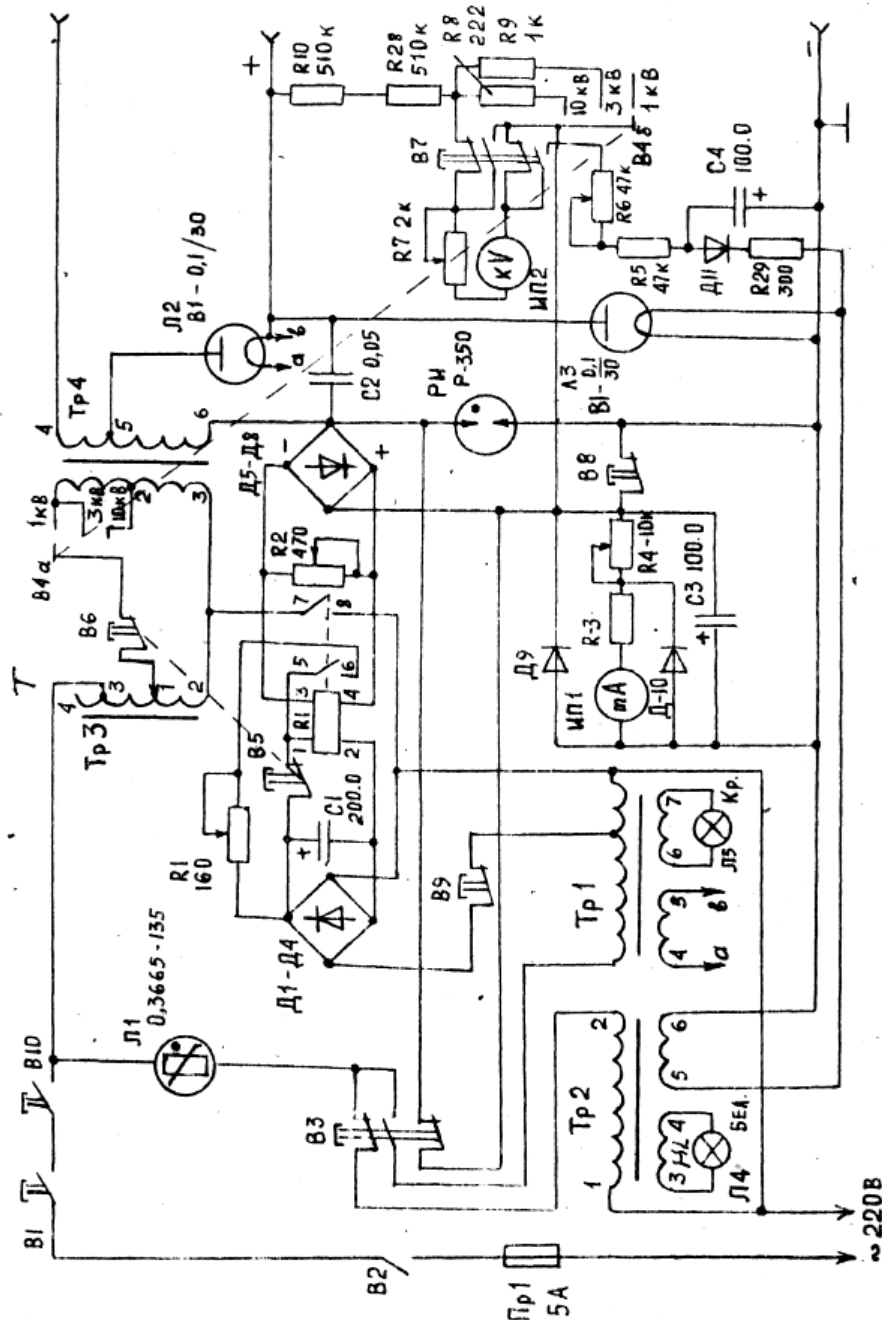


Рис. 3.1

Прилад ИП12 з межами 1кВ, 3 кВ, 10 кВ служить для вимірювання вихідною постійної і змінної (діючого значення) напруги . Послідовно з

приладом включена коло резисторів R10-R2B. Перемикання шкали вимірювання проводиться перемикачем В 4 δ. Градування приладів ИП1 по точці 0,1 мА і ИП2 по точці 10 кВ здійснюється потенціометрами Р4 і Р6. Постійна напруга для калібрування створюється випрямлячем ДП і фільтрується конденсатором С4 .

Вказівки по техніці безпеки.

Увага ! Висока напруга, що розвивається установкою, небезпечна для життя.

До роботи на установці допускаються люди , мають право працювати на високовольтних установках. Перед початком роботи необхідно вивчити принцип дії установки, правила експлуатації, порядок проведення випробувань. Необхідно суворо дотримувати правила техніки безпеки.

Працювати на установці дозволяється тільки одному члену бригади – оператору, що призначається викладачем. Решта членів бригади повинна знаходитися не менше 1,5 м від установки (оператора).

Оператор повинен працювати тільки в гумових рукавичках (стоячи на діелектричному килимку), суворо дотримуючи послідовність включення і виключення установки. Після виключення установки за допомогою вимикачів оператор зобов'язаний вийняти вилку живлення з розетки, щоб створити видимий розрив в ланцюзі живлення. Тільки після цього він може зняти рукавички.

Правила експлуатації установки .

Перед початком роботи вивчити розташування ручок і кнопок управління на лицьовій панелі установки. Розгортання установки проводити в наступному порядку:

- 1) перевірити заземлення і надійність контакту клеми заземлення;
- 2) під'єднати один з високовольтних електродів до клеми "Земля", інший - до гнізда постійного "-" або "~" напруги і закрити захисну кришку;
- 3) помістити випробовуваний діелектрик між електродами у високовольтній камері і закрити дверці камери;
- 4) включити установку, дотримуючи таку послідовність: вставити вилку в розетку, включити тумблер на щитку живлення робочого місця, вставити ключ в замок - вимикач "Сеть 220" і повернути його в положення "Вкл.", при цьому загориться біла сигнальна лампочка;
- 5) перевірити калібрування вимірювальних приладів. Для цього треба вставити штекер в гніздо "-" і натискувати кнопку "Контроль". При цьому стрілка індикатора струму повинна встановитися в точці 0,1 мА ,а стрілка індикатора напруги - в точці 10 кВ. При невиконанні цієї умови необхідно правим потенціометром (R6) відкалібрувати індикатор напруги, а потім лівим потенціометром (R4) - індикатор струму;
- 6) вставити перемикачем вибраний діапазон напруги (1; 3 або 10 кВ).

3.3. Порядок проведення випробувань

При випробуванні необхідно:

- 1) лівою рукою натиснути кнопку "Вкл.", при цьому повинна загорітися червона сигнальна лампочка, а біла - згаснути;
- 2) правою рукою вивести ручку автотрансформатора "Вихід напр." вліво повністю (повинне бути клацання), потім натиснути на неї і, обертаючи в право, стежити за показаннями кіловольтметра, у момент пробією стрілка кіловольтметра відхилиться вліво, при цьому потрібно негайно відпустити кнопку і ручку;
- 3) після проведення кожного випробування необхідно вимкнути установку за допомогою вимикачів і обов'язково вийняти вилку з розетки.

Порядок виконання роботи .

I. Визначити залежність електричної міцності конденсаторного паперу від її товщини (числа листів). Число листів задається керівником. Залежність зняти як для постійної, так і для змінної напруги. В обох випадках піднімати напругу плавно з швидкістю приблизно 1 кВ/с .

Пробій фіксується по відхиленню стрілки кіловольтметра вліво. Після пробією негайно відключити установку. Дані вимірювання і обчислень зводяться в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Назва діелектрика	Число листів	Товщина Н,мм	U_{np} ,"-", кВ	E_{np} "-"," кВ/мм

По даними табл. 3.1 побудувати графіки $U_{np} = f(h)$ і $E_{np} = \varphi(h)$ для обох видів напруг.

2. Дослідити залежність пробивної напруги від часу його приложення для конденсаторного паперу при змінній напрузі.

Зразок набирається з трьох або чотирьох шарів паперу. З табл.3.1 узяти $U_{np} \sim$ для такого зразка. Потім при напругах, рівних $0,7 U_{np}$, $0,8 U_{np}$, $0,9 U_{np}$, зразок витримується до пробією 5 хв. Час від початку подання напруги до пробією виміряти секундоміром. Якщо протягом 5 хв. пробією не відбудеться, випробування припиняють.

Значення напруги, відповідної витримці 5 хв., записують "Зразок не пробився", а на графіку $U_{np} = f(\tau)$ криву проводять трохи вище за цю точку .

Оскільки при випробуванні неминучий розкид пробивних напруг, можливий пробій при $U = 0.94 U_{np}$, при $\tau = 0$, в цьому випадку вимірювання слід повторити на новому зразку. Отримані дані зводяться в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Назва зразку та його товщина	Пробивна напруга $U_{np} \sim$, кВ	τ с
	0,9 U_{np}	
	0,8 U_{np}	
	0,7 U_{np}	

За даними таблиці 3.2 побудувати графік $U_{np} = f(\tau)$.

3. Дослідити явище поверхневого перекриття. Встановити зразок з твердого діелектрика (пластина з гетинакса) так, щоб відстань між краями електродів, вимірювання по поверхні твердого діелектрика, складало 5...6 мм і визначити напругу перекриття при постійній і змінній напругах.

При проведенні випробування звернути увагу на явища, передуючі перекриттю, - поява корони і ковзаючих розрядів. Відзначити, як протікає це явище при постійній і змінній напругах. Результати дослідження занести в звіт.

3.4. Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1) схему установки (рис. 3.1);
- 2) розрахункові формули, таблиці експериментальних і розрахункових даних;
- 3) графіки $U_{np} = f(h)$ і $E_{np} = \varphi(h)$ постійної і змінної напруг, $U_{np} = f(\tau)$ - для змінної напруги;
- 4) дані спостережень явища поверхневого перекриття;
- 5) аналіз отриманої залежності.

Контрольні питання

1. Що називається електричною міцністю діелектрика і в яких одиницях вона вимірюється?
2. В чому суть теорії пробою газів?
3. Поясніть теорію стримерів.
4. Як залежить електрична міцність газу від тиску?
5. Чому створення строгої теорії пробою рідин зустрічає труднощі?
6. Пояснити основні види пробою твердих діелектриків.
7. Пояснити схему установки (рис. 3.1).
8. Пояснити хід залежності $U_{np} = f(h)$ і $E_{np} = \varphi(h)$ $\tau = \varphi(h)$.
9. Пояснити явище поверхневого перекриття.

Фізичні властивості трансформаторного масла

Мета роботи:

- 1) ознайомитися з приладами для визначення в'язкості, густини і коефіцієнта об'ємного розширення трансформаторного масла;
- 2) визначити залежність в'язкості і густини трансформаторного масла від температури.

4,5.1. Короткі відомості

Трансформаторне, а також конденсаторне і кабельне масла відносяться до найважливіших рідких діелектриків, використовуваних в електротехніці. Їх одержують ступеневою перегонкою нафти. Спочатку при нагріванні нафти до 300°C відділяють легкі фракції - бензин, гас, лігроїн. З частини (мазуту), що залишилася, при нагріванні більше 300°C одержують масла - солярове, веретенне, машинне і ін.

Трансформаторне, конденсаторне і кабельне масла одержують з солярового масла послідовною обробкою його кислотою і лугом, промивкою водою, очищенням за допомогою адсорбентів і фільтрів, сушкою.

Трансформаторне масло застосовують для заливки силових трансформаторів. При цьому переслідують дві цілі: по-перше, поліпшення якості ізоляції трансформатора (за рахунок заповнення маслом пір паперу і картону і проміжків між проходами обмоток); по-друге, поліпшення відведення теплоти від частин трансформатора, що нагріваються, - обмоток, сердечника (за рахунок конвекції). Конвекція масла у великій мірі залежить від його в'язкості. Тому в'язкість є важливим параметром масла. Крім того, трансформаторне масло використовують для заливки масляних вимикачів, де воно виконує функції ізоляції і гасіння електричної дуги.

На трансформаторне масло існує ГОСТ 982-68, згідно якому нормуються наступні параметри масла:

1. В'язкість (кінематична) $(17... 18,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C;
 $(6,5... 6,7) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 50°C;
2. Кислотне число 0,03 - 0,1 г *КОН* / кг.
3. Температура спалаху пари в 135...140°C.
4. Температура застигання -45°C.
5. Значення $\text{tg } \delta$ при частоті 50 Гц
0,003 при 20°C,
0,025 при 70°C.

Такий важливий параметр як електрична міцність E_{np} , ГОСТом не нормується, оскільки E залежить від ступеня очищення масла. Проте згідно "Правилам технічної експлуатації електростанцій" (ПТЕ) нормується значення пробивної напруги $U_{пр}$ при відстані між електродами 2,5 мм.

В процесі експлуатації масло старіє. В результаті хімічних процесів в ньому утворюються продукти старіння - кислоти, смоли. Деякі з них розчинні в маслі, інші (нерозчинні) випадають у вигляді осаду, покриваючи обмотки і сердечник трансформатора. В результаті старіння істотно погіршуються параметри масла.

Процес старіння можна уповільнити введенням в масло інгібіторів (амидопирин). Постаріле масло піддають очищенню - регенерації (головним чином за допомогою адсорбентів).

В даній роботі досліджуються в'язкість, густина і коефіцієнт об'ємного розширення в залежності від температури.

Для розрахунку маслonaповнених пристроїв (наприклад, трансформаторного бака) необхідно знати густину масла, залежність густини від температури $\rho = f(t)$ і температурний коефіцієнт об'ємного розширення

$$TK_v = \frac{1}{v} \frac{dv}{dt}$$

При зміні температури масла його об'єм змінюється згідно із законом:

$$V_1 = V_{нач} [1 + TK_v (t_1^0 - t_{нач}^0)]$$

де $V_{нач}$ - початковий об'єм масла при температурі $t_{нач}^0$; V_1 - об'єм масла при температурі t_1^0 .

В'язкість масла, як вказувалося, сильно впливає на процес охолодження трансформатора, крім того, в'язкість також робить вплив на електричні параметри масла $tg \delta$ електропровідність.

Динамічна в'язкість η - коефіцієнт внутрішнього тертя рідини, входить у формулу Стокса:

$$F = 6\pi\eta RV$$

де F - сила опору рідини, діюча на кульку радіусу R , що рухається із швидкістю V .

Одиниця динамічної в'язкості в СИ – паскаль - секунда (Па·с).

Кінематична в'язкість ν пов'язана з динамічною в'язкістю таким чином:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

де ρ - густина, $кг/м^3$.

Одиниця кінематичної в'язкості в СИ - $м^2/с$.

Умовна в'язкість – в градусах Енглера (E°), визначається за допомогою вискозиметра Енглера по формулі

$$E^0 = \frac{\tau_1}{\tau_6}$$

де τ_1 - час закінчення випробовуваної рідини в кількості 200 мл з вискозиметра при даній температурі; τ_6 - водне число вискозиметра - час закінчення 200 мл дистильованої води за нормальних умов.

Кінематична в'язкість пов'язана з умовною в'язкістю наступною емпіричною формулою:

$$\gamma = [0,07E^0 + \frac{0,03}{\sqrt{E^0}} - \frac{0,109}{E^0} + \frac{0,015}{(E^0)^{10}}] \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

Побудований по цій формулі графік дозволяє перейти від умовної в'язкості до кінематичної (рис. 4,5.1).

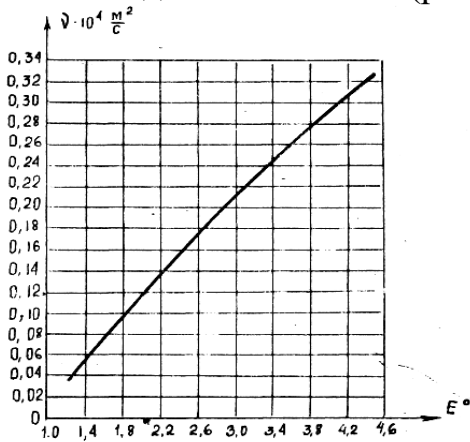


Рис. 4,5.1

Визначивши умовну в'язкість E^0 експериментальним шляхом, за допомогою графіка рис. (4,5.1) легко можна перейти до кінематичної в'язкості γ за допомогою формули (4,5.2) - до динамічної η .

Динамічна в'язкість η служить експоненціальною функцією температури:

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{\epsilon}{T}},$$

де T - абсолютна температура, К; η_0 і ϵ - константи, постійні для даної рідини.

Константи η_0 і ϵ - досліджувані трансформаторні масла визначаються наступним чином. Після логарифмування рівняння (4,5.5) отримаємо

$$\ln \eta = \ln \eta_0 + \frac{\epsilon}{T}.$$

Графік функція $\ln \eta = f(\frac{1}{T})$ являє собою прямою. Її легко можна побудувати по двох точкам, координати яких беруться з табл. 4,5.1 (крайні значення). Графічно визначаються константи η_0 і ϵ ($\ln \eta_0$ - відрізок, що відсікається на осі ординат; ϵ - кутовий коефіцієнт прямої).

4,5,2. Опис установки і методичні вказівки

Робота складається з двох частин: № 4 і 5.

№ 4. Визначення в'язкості трансформаторного масла

Умовна в'язкість E^0 визначається за допомогою вискозиметра Енглера (рис. 4,5.2).

Віскозиметр складається з двох резервуарів: зовнішнього Р2 і внутрішнього Р1. Внутрішній резервуар має сферичне дно, в центрі якого впаяна стічна труба, що калібрується, Tr з платинородія діаметром 2,8 мм завдовжки 20 мм. Стічна труба закривається штепселем Шт. Під нею встановлена колба з відміткою 200 мл. У внутрішній резервуар заливається досліджувана рідина - масло (по рівню штифтів, укріплених на внутрішній стінці). Зовнішній резервуар заливається водою. Для підігріву служить електронагрівальний елемент R_N .

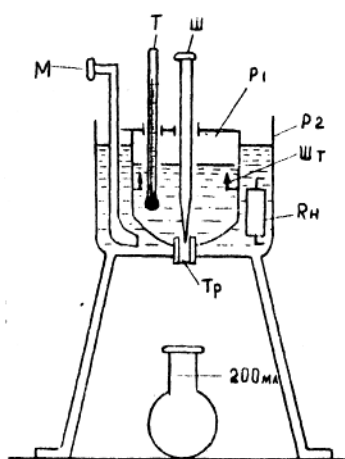


Рис. 4.5.2

Для рівномірного нагріву за допомогою мішалки М перемішують рідину в зовнішньому резервуарі. Для вимірювання температури досліджуваної рідини служить термометр Т, поміщений у внутрішній резервуар.

На робочому місці знаходиться також електричний секундомір. В'язкість виміряють в такій послідовності:

- 1) заливають зовнішній резервуар водою, а внутрішній - маслом (по рівню штифтів), закривають кришку і вставляють термометр;
- 2) визначають в'язкість при кімнатній температурі. Для цього поміщають колбу під отвір, виймають штепсель і одночасно пускають секундомір. Коли рівень масла в колбі досягне відмітки 200 мл, секундомір зупиняють і закривають штепселем отвір трубки. Відлік ведуть по нижньому краю меніска, промінь зору повинен бути перпендикулярний до осі колби;
- 3) включають нагрівальний елемент і визначають в'язкість при більш високих температурах.

№ 5. Визначення густини і TK_v

На робочому місці є мензурка з маслом, в яку занурюють термометр, ареометр і пробірку з маслом, забезпечену капілярною трубкою з шкалою. Об'єм масла визначають як суму об'ємів пробірки і трубки; об'єм пробірки треба розрахувати (діаметр пробірки $D = 1,6$ см, довжина $L = 12,8$ см). Один великий розподіл трубки відповідає 0,33мл.

Масло підігрівають за допомогою водяної бані.

4.5.3. Порядок виконання роботи

№ 4. Визначення залежності в'язкості масла від температури

Залити резервуар P_1 маслом, а P_2 - водою. Зміряти в'язкість масла в інтервалі температур від кімнатної до $60...70^\circ\text{C}$ (6...8 точок). Провести необхідний розрахунок. Дані експерименту і розрахунку звести в табл. 4,5.1.

Таблиця 4,5.1

$t^\circ\text{C}$	τ, c	0E	ν		η		$\ln \eta$	T_K	$\frac{1}{T}$ K^{-1}
			Ст	M^2/c	пуаз	Па · с			

Графічним шляхом, використовуючи дані табл. 4,5.1, визначити постійні

$$\eta_0 \text{ і } \epsilon \text{ для рівняння } \eta = \eta_0 e^{\frac{\epsilon}{T}}$$

Побудувати графік функції $E^0 = f(t^0)$.

№5, Визначення густини і коефіцієнта об'ємного розширення при різних температурах

В судину з маслом поміщаються ареометр, термометр і пробірка з маслом, забезпечена трубкою з шкалою. Об'єм масла визначають як суму об'ємів пробірки і трубки.

Визначити густину і об'єм масла для різних температур (узяти ті ж точки t^0 , що і в першому досліді). По даним експеримента визначити коефіцієнт об'ємного розширення TK_v . Дані експерименту і обчислень звести в табл. 4,5.2.

Таблиця 4,5.2

t °C	ρ		V		TK_v K^{-1}
	г/см ³	г/м ³	см ³	м ³	

Побудувати графіки функцій $\rho = f(t^0)$ $V = f(t^0)$

4,5.4. Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1) короткий опис методики визначення в'язкості з малюнком вискозиметра;
- 2) таблиці вимірювань і обчислень;
- 3) графіки функцій;
- 4) висновок про придатність масла.

Контрольні питання

1. Як одержують трансформаторне масло?
2. В чому різниця між трансформаторним, кабельним і конденсаторним маслами?
3. Які параметри трансформаторного масла нормуються ГОСТом?
4. Як визначається електрична міцність трансформаторного масла?
5. Які функції виконує трансформаторне масло в трансформаторах?
6. Що таке старіння масла? Які чинники сприяють старінню? Що таке інгібітори? Як проводиться регенерація масла?
7. Що таке температурний коефіцієнт об'ємного розширення TK_v , з якою метою проводиться зняття залежності $TK_v = f(t^0)$?
8. Що таке в'язкість (динамічна, кінематична, умовна)? Чому в'язкість відноситься до важливих параметрів масла?

Лабораторна робота № 6

Дослідження сегнетоелектриків

Ціль роботи:

- 1) вивчити осцилографічний метод виміру ємності і втрат у діелектрику;
- 2) вивчити основні властивості сегнетоелектриків:
 - а) залежність відносної діелектричної проникності від напруженості поля;
 - б) залежність діелектричних втрат сегнетоелектричного конденсатора від прикладеної напруги.

6.1. Короткі відомості

Сегнетоелектрики утворюють особливу групу діелектриків. Завдяки доменній структурі ця група володіє спонтанної (самовільною) поляризацією, а також деякі особливі властивості.

1) нелінійна залежність електричної індукції (зміщення) від напруженості електричного поля $D=F(E)$. Графік цієї залежності представляє петлю гістерезиса, тобто поведінку сегнетоелектрика в електричному полі аналогічно поведінку ферромагнетика в магнітному полі;

2) дуже велике значення відносної діелектричної проникності ? (до 10000);

3) своєрідна температурна залежність $E=F(t)$. Наявність у цієї залежності точки Кюрі;

4) наявність п'єзоефекта.

Сегнетоелектрики використовуються для виготовлення варікондів (нелінійних конденсаторів, ємність яких залежить від прикладеної напруги), діелектричних підсилювачів, генераторів, стабілізаторів, п'єзодатчиків і ін.

6.2. Опис установки і методичні вказівки

Схема для дослідження зображена на рис. 6.1.

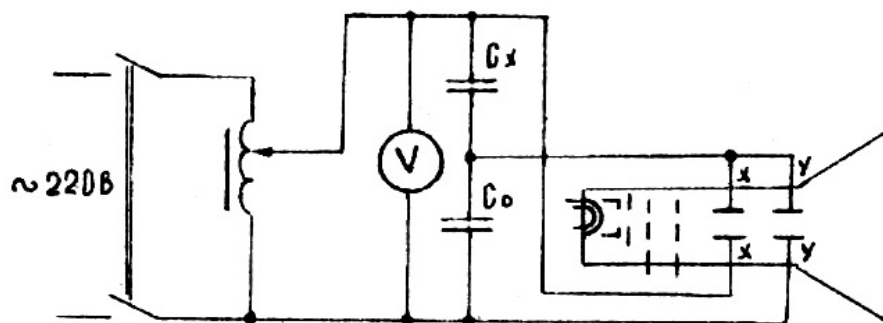


Рис. 6.1

Основним приладом служить електронний осцилограф. Для визначення

заряду, ємності і втрат конденсатор з досліджуваним діелектриком C_x з'єднується послідовно зі зразковим конденсатором C_0 (C_0 має рисі втрати і його ємність не змінюється зі зміною прикладеної напруги). Напруга U_x конденсатора C_x подається на пластини горизонтального відхилення електронно-променевої трубки осцилографа, напруга U_0 конденсатора C_0 - на пластини вертикального відхилення. При послідовному з'єднанні двох конденсаторів їхні заряди рівні:

$$Q_x = Q_0 = C_0 U_0 = C_x U_x ,$$

а саме напруга U_0 пропорційно заряду Q_x і на екрані осцилографа створюється координатна система Q_x, U_x .

Якщо досліджуваний конденсатор не має втрат, то U_x і U_0 збігаються по фазі (рис. 6.2), і виникаюча на екрані фігура Ліссажу має вид похилої прямої (рис. 6.3).

Тангенс кута між віссю абсцис і цієї прямої у визначеному масштабі дорівнює ємності конденсатора C_x , тому що $C_x = \frac{Q_x}{U_x}$

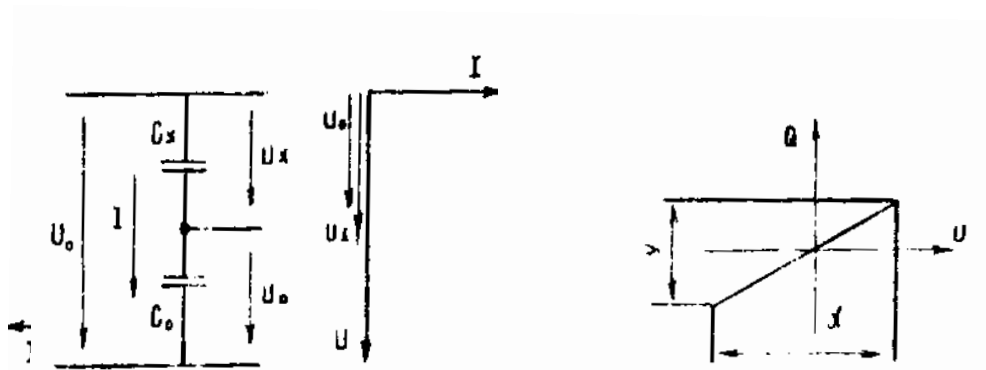


Рис. 6.2

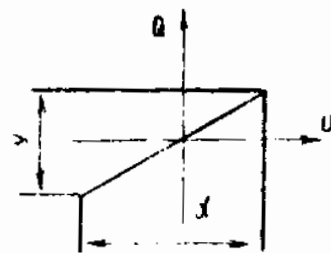


Рис. 6.3

Якщо досліджуваний конденсатор має втрати, то між U_x і U_0 буде зсув фаз на кут δ (см.схему заміщення і векторну діаграму на рис. 6.4), і фігура Ліссажу на екрані осцилографа, буде мати вид еліпса (рис. 6.5).

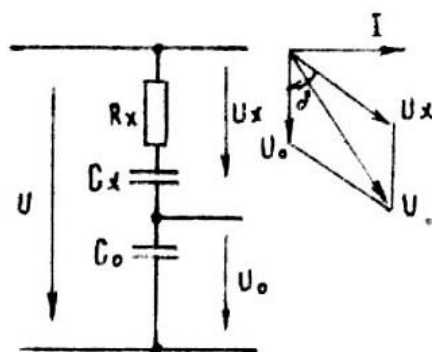


Рис. 6.4

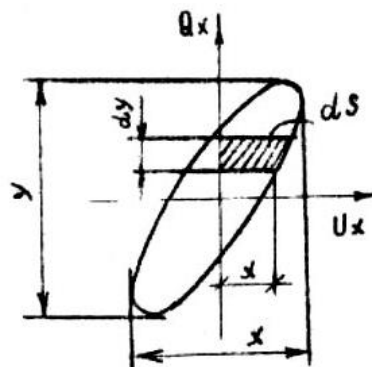


Рис. 6.5

Активна енергія, виділяема в досліджуваному конденсаторі за один

період:
$$m_y y = \frac{1}{C_0} \int i dt \quad (6.1)$$

де U_x і i – миттєві значення напруги і струму.

Миттєве значення напруги на конденсаторі C_0 вимірюється вертикальним відхиленням променя y , помноженим на масштаб вертикального відхилення m_y :

$$U_0 = m_y y.$$

З іншого боку,
$$W = \int_0^T U_x i dt$$

Отже,
$$U_0 = \frac{q}{C_0} = \frac{1}{C_0} \int i dt$$

Після диференціювання одержимо.

$$d_y = \frac{i dt}{m_y C_0}$$

Миттєве значення напруги на конденсаторі C_0 вимірюється горизонтальним відхиленням променя x , помноженим на масштаб горизонтального відхилення: $U_x = m_x x$.

Елемент площі еліпса (див. рис. 6.5)

$$ds = x dy = \frac{U_{x_0}}{m_x} \frac{i dt}{m_y C_0}$$

Уся площа еліпса

$$S = \frac{1}{m_x m_y C_0} \int_0^T U_x i dt$$

З огляду на (6.1), одержимо

$$W = m_x m_y C_0 S$$

Якщо m_x і m_y мають одиницю вольтів на метр (В/м), площа S виражена в квадратних метрах (m^2), а C_0 - у фарадах (Ф), то W виражається у ватт-секундах (Вт•с).

Активна потужність, виділяема в конденсаторі з втратами:

$$P = U_x^2 \cdot 2\pi f C_x \operatorname{tg} \delta$$

З іншого боку,

$$T = \frac{1}{f} \quad P = \frac{W}{T}$$

де f період.

Тому
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{W}{2\pi U_x^2 C_x}$$

де U_x - діюче значення напруги на C_x .

Значення ємності в даному випадку знаходиться зі співвідношення

$$C_x = \frac{Q_{x \max}}{U_{x \max}}$$

де $Q_{x \max}$ і $U_{x \max}$ - амплітудні значення заряду і напруги.

Приведені розрахунки дозволяють по зображенню на екрані осцилографа визначити ємність конденсатора C_x і втрати в ньому, а по цих величинах розрахувати значення ϵ і $\text{tg} \delta$ діелектрика конденсатора.

Якщо в якості C_x використовувати конденсатор із сегнетоелектриком, то на екрані осцилографа з'явиться петля гістерезиса (рис. 6.6). Розрахунки в цьому випадку ведуться аналогічно розрахункам для конденсатора з втратами.

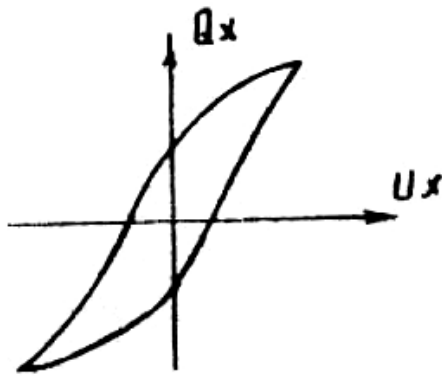


Рис. 6.6

6.3. Порядок виконання роботи

6.3.1. Градуїровка

осей осцилографа

Якщо до вертикальних пластин осцилографічної трубки подати відому напруга U_y (діюче її значення), то на екрані з'явиться вертикальний відрізок, довжина в якого пропорційна подвоєній амплітуді прикладеної напруги. Масштаб по вертикальній осі

$$m_y = \frac{2U_{y \max}}{y} = \frac{2\sqrt{2}U_y}{y}$$

Аналогічно для горизонтальної осі:

$$m_x = \frac{2\sqrt{2}U_x}{x}$$

Подаючи різні напруги безпосередньо від автотрансформатора (4-5 значень) спочатку на вертикальні пластини, а потім - на горизонтальні, визначають m_y і m_x після чого обчислюють їхнє середньоарифметичне значення.

Дані градуїровки заносяться в табл. 6.1 і 6.2.

Таблиця 6.1

U_x	В					
x	М					
m_x	В/М					

Таблиця 6.2

U_y	В					
y	М					
m_y	В/М					

Середнє значення $m_y =$
Масштаб для зарядів

Середнє значення $m_x =$

$$m_q = m_y C_0,$$

C_0 - у фарадах.

6.3.2. Дослідження для конденсатора без втрат

До клем C_x схеми підключається конденсатор з рисими втратами. По відхиленню проміня осцилографа визначаються заряд і ємність конденсатора при 6...8 значеннях напруги, подавано на схему.

Для полегшення звіту при визначенні вертикальних відхилень рекомендується відключати горизонтально відхиляючі пластини, а при визначенні горизонтальних відхилень – вертикально відхиляючі пластини. При цьому під x варто розуміти половину довжини горизонтального відрізка на екрані, а під y - половину довжини вертикального відрізка.

Отримані дані заносяться в табл. 6.3.

Примітка. Зняти осцилограму для останньої точки U -схеми.

Таблиця 6.3

U схеми	В						
x	м						
U_x	В						
y	м						
Q_x	К						
C_x	Ф						

По отриманим даним побудувати графіки $C_x=f(U)$ і $Q_x=f(U)$.

6.3.3. Дослідження для конденсатора з втратами

До клем C_x підключається конденсатор із втратами. На кальку переносяться з екрана осцилографа еліпси, отримані при 6...8 значеннях поданої напруги. Їхні площі визначаються по формулі

$S=\pi ab$ де a і b - півосі еліпса, м.

По приведених формулах визначаються втрати W і $\operatorname{tg}\delta$. Результати експерименту і розрахунку заносяться в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

U схеми	В						
x	м						
y	м						
S	м ²						
U_x	В						
Q	Кл						
C_x	Ф						
W	Вт·с						
$\operatorname{tg}\delta$	-						

За даними табл. 6.4 побудувати графіки:

$$C_x = f(U_x),$$

$$Q_x = f(U_x),$$

$$W = f(U_x),$$

$$\operatorname{tg} \delta = f(U_x).$$

6.3.4. Дослідження для конденсатора із сегнетоелектриком

До клем C_x підключається конденсатор із сегнетоелектриком (його геометричні розміри зазначені на робочому місці). Для 6...8 значень U схеми зарисювати на міліметровці петлі гістерезиса і визначити x , y , U_x , C_x і т.д. Петлі гістерезиса варто розбити на фігури, близькі до паралелограмів, за допомогою горизонтальних прямих і визначити в такий спосіб площа петлі. Діелектрична проникність і напруженість поля визначаються рівняннями:

$$E = \frac{U}{h}, \quad \varepsilon = 4\pi \cdot 0,9 \cdot 10^{12} \frac{C \cdot h}{S},$$

h - товщина діелектрика, S - площа пластин.

Результати вимірів і розрахунків зводяться в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

U	x	y	S	U_x	Q_x	C_x	ε	E	W	$\operatorname{tg} \delta$
B	м	м	м ²	B	K	Ф	-	B/м	Bт·с	-

Дані зразка: матеріал...

товщина $h =$ м

площа $S =$ м².

За даними табл. 6.5 побудувати графіки:

$$Q = f(U_x),$$

$$W = f(U_x),$$

$$\operatorname{tg} \delta = f(U_x),$$

$$\varepsilon = f(E).$$

6.4. Зміст звіту

Звіт повинний містити:

- 1) схему дослідження; схему для визначення масштабів;
- 2) таблиці, графіки, осцилограми для всіх досвідів;
- 3) короткі відомості про сегнетоелектриків.

Контрольні питання

1. Як визначаються масштаби по вертикальній і горизонтальній осях осцилографічної трубки?

2. Чому на екрані осцилографа (схема рис. 6.1) можна спостерігати залежність $Q = f(U_x)$ для досліджуваного конденсатора?

3. Відмінні риси сегнетоелектриків. Назвіть області застосування сегнетоелектриків.

4. Як графічно визначається ємність досліджуваного конденсатора?

5. Як визначаються діелектричні втрати?

(1, с. 18, 29, 30 – 32, 50; 2, с. 52 – 65, 187, 218, 224 – 230; 4, с. 208 – 241).

Лабораторна робота № 7

Визначення характеристик магнітних матеріалів

Ціль роботи: ознайомитися з осцилографічним методом визначення основних характеристик магнітних матеріалів.

7.1. Короткі відомості

Магнетики - це матеріали, для яких відносна магнітна проникність μ значно більше одиниці. До них відносяться залізо, нікель, кобальт, їхні сплави, сплави хрому і марганцю, а також ферити - магнітні напівпровідники.

Як відомо, для характеристики магнітного поля служать два вектори: вектор напруженості $\vec{H}$ і вектор магнітної індукції $\vec{B}$, зв'язані простою залежністю: $\vec{B} = \mu_{\alpha} \vec{H}$, де $\mu_{\alpha} = \mu_0 \mu$ абсолютна магнітна проникність;

μ_0 - абсолютна магнітна проникність вакууму, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_{α} - відносна магнітна проникність, що залежить від середовища, тобто від матеріалу.

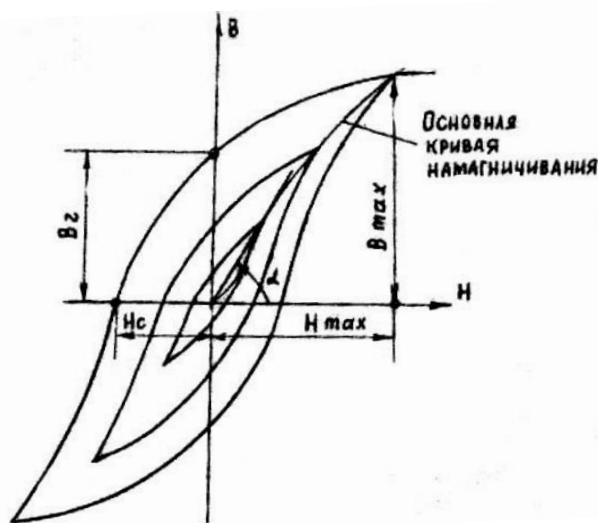


Рис. 7.1

Для магнітних матеріалів залежність $B = f(H)$ носить нелінійний характер. При зміні H в інтервалі від $-H_m$ до $+H_m$ (і зворотно) графік функції являє собою замкнуту криву - петлю гістерезиса.

На рис. 7.1 представлено сімейство петель гістерезиса для різних H_m . Крива, що проходить через вершини петель гістерезиса, називається основною кривою намагнічування. Як видно з цієї кривої, спочатку при зростанні H

росте і B , потім, досягши максимуму (B_{max}), індукція вже майже не зростає. Це режим насичення. Відносна магнітна проникність

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_B}{m_H} \operatorname{tg} \alpha,$$

де m_B і m_H - масштаби по координатних осях;
 α - кут між віссю абсцис і січною, про-
 ходячою через початок координат.

Кут α при збільшенні H спочатку
 росте, потім, пройшовши максимум, починає
 зменшувати. Тому залежність $\mu=f(H)$ має
 вид, показаний на рис. 7.2.

Початкове значення відносної
 магнітної проникності μ_H (при $H = 0,1 \text{ А/м}$)
 і її максимальне значення $\mu_{\max}$ відносяться до
 параметрів магнітних матеріалів.

Виберемо із сімейства петель гістерезиса найбільшу, тобто розглянемо
 граничний гістерезисний цикл (рис. 7.1).

Координати вершини цієї петлі - $B_{\max}$ і $H_{\max}$.

Якщо зразок магнітного матеріалу намагнітити до насичення, а потім
 зняти зовнішнє поле, що намагнічує, то магнітна індукція зменшиться до
 значення B_r . Значення індукції B_r при $H=0$ називається залишковою магнітною
 індукцією. Щоб позбутися від залишкового намагнічування матеріалу, потрібно
 прикласти визначене значення напруженості в зворотному напрямку, що
 називається коерцитивною силою H_c .

Величини μ , $\mu_{\max}$, $B_{\max}$, $H_{\max}$, B_r , H_c є параметрами феромагнетика. Крім
 них до параметрів відносяться втрати на гістерезис P_r , втрати на вихрові
 струми P_b і температурний коефіцієнт відносної магнітної проникності, K^{-1} :

$$TM_{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt}.$$

Магнітні матеріали підрозділяються на дві основні групи: магнітно-м'які
 і магнітно-тверді.

Магнітно-м'які матеріали мають рису коерцитивну силу H_c і велику
 магнітну проникність μ . Вони застосовуються для виготовлення
 магнітопроводів трансформаторів, електричних машин, електровимірювальних
 приладів і т.д.

Магнітно-тверді матеріали відрізняються великий коерцитивною силою і
 рисою магнітною проникністю. Вони використовуються для виготовлення
 постійних магнітів.

7.2. Опис установки і методичні вказівки

Схема досліджень показана, на рис. 7.3. у неї входять осцилограф,
 автотрансформатор, вимірювальні прилади, резистор R_1 , що інтегруючу ланку
 R_2C і феромагнітний зразок, що має форму тора, на ньому намотані дві
 обмотки: первинна з числом витків W_1 і вторинна з числом витків W_2 .

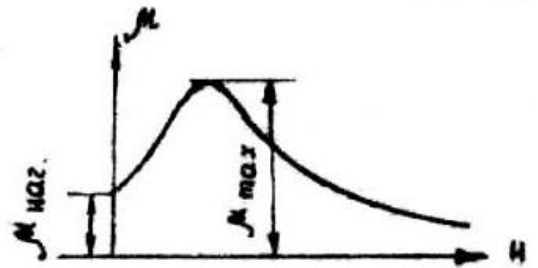


Рис. 7.2

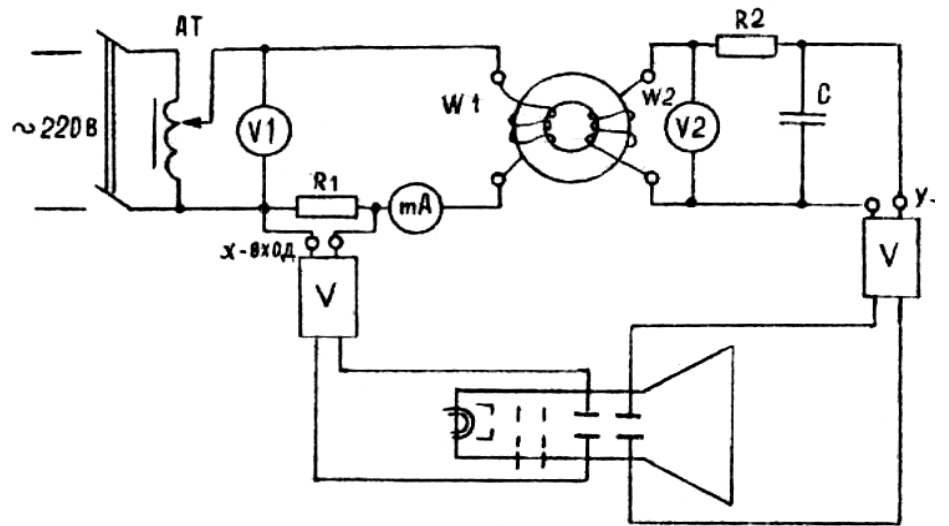


Рис. 7.3

Якщо на первинну обмотку подати змінну напруга, то через неї потече струм I_1 , і в сердечнику збудиться зміна магнітне поле, напруженість якого пропорційна струму :

$$H_m = \frac{\sqrt{2}I_1W_1}{l},$$

де H_m - амплітуда напруженості магнітного полючи, А/м; I_1 - діюче значення струму, А; W_1 - число витків першої обмотки; l - довжина середньої магнітної лінії, м.

Спадання напруги на резисторі R_1 , пропорційне струму ($U=I_1R_1$), подається на x-вхід осцилографа. Отже, відхилення проміння по горизонталі пропорційно напруженості магнітного поля H .

В вторинній обмотці зразка наводиться ЕДС

$$l_2 = \frac{d\psi}{dt} = -\frac{W_2 d\Phi}{dt} = -\frac{W_2 S dB}{dt},$$

де ψ - потікосцеплення; W_2 - число витків другої обмотки; Φ - магнітний потік; S - площа поперечного перерізу зразка; B - магнітна індукція.

До клем другої обмотки (напруга на цих клеммах $U_2=l_2$) підключена інтегруюча ланка R_2C , де $R_2 \gg 1/\omega$, тому струм вторинної обмотки можна вважати (у першому наближенні) чисто активним:

$$L_2 \approx \frac{U_2}{R_2} = \frac{l_2}{R_2} = \frac{W_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}.$$

(Знак "-" опущений, що як не має тут фізичного змісту).

Напруга на ємності C

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \int \frac{W_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt} dt = \frac{W_2 S}{R_2} B.$$

Постійна інтегрування дорівнює нулю, тому що напруга U_c не містить постійної складовий.

Напруга U_c , пропорційне індукції B , подається на в Y-вхід осцилографа. Отже, відхилення проміння по вертикалі осцилографічної

трубки пропорційно індукції B . Тому промінь вималює на екрані осцилографа графік функції $B=f(H)$ - петлю гістерезиса.

Максимальне значення індукції в зразку визначається з рівняння, Вб/м^2 :

$$B_m = \frac{U_z}{4,44 W_2 f \cdot S} ,$$

де U_z - діюче значення напруги другої обмотки, В; $f = 50$ Гц - частота мережі; S - площа поперечного перерізу зразка, м^2 .

Змінюючи напругу на первинній обмотці зразка, одержимо ряд петель гістерезиса. Значення H_m і B_m для вершин цих петель розраховуються по рівняннях (7.1) і (7.2).

7.3. Порядок виконання роботи

1. Після обробки схеми і перевірки її керівником включити осцилограф і подати напругу на першу обмотку зразка. Відрегулювати фокусування, яскравість і посилення x – і y – входу осцилографа.

2. Зняти за показниками міліамперметра і вольтметрів дані для розрахунку основної кривої намагнічування. Межі зміни I_1 задаються керівником. Дані вимірів і розрахунку звести в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Параметри образца	Дані вимірювання			Дані обчислення			
	U_1 В	U_2 В	I_1 А	B_m Гс	B_m Вб/м^2	H_m Е	H_m А/м

Матеріали:

$W_1 =$

$W_2 =$

$l =$ м^2

$S =$ м^2

Для переводу значень H_m і B_m з однієї системи одиниць в іншу користуються співвідношеннями:

$1 \text{ А/м} = 4 \pi \text{ Э.}$

$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2 = 10^4 \text{ Гс.}$

За даними табл. 7.1 побудувати основну криву намагнічування.

Одночасно для всіх точок I_1 зняти на кальку з екрана осцилографа сімейство петель гістерезиса в загальній системі координат. Попередньо на кальці відзначити початок координат і координатні осі. На отриманому

сімействі нанести основну криву намагнічування і порівняти її з кривою, побудованою за даними табл. 7.1.

3. Визначити питомі втрати Руд і коерцитивну силу зразка Н_с. Значення В_м, при якому визначається Руд і Н_с, задається керівником.

Після встановлення потрібного значення індукції за показниками вольтметра V2 і розрахунку по рівнянням (7.2) регуляторами посилення осцилографа домагаються досить великого зображення петлі і замальовують її на кальку. Перед замальовкою потрібна на кальці відзначити початок координат і координатні осі. Початок координат визначається світлою точкою на екрані осцилографа при відключеному живленні схеми зразка.

По крайніх точкам петлі визначають масштаби зображення:

$$m_x = \frac{H_m}{x} \frac{A / \text{м}}{\text{м}} ;$$
$$m_y = \frac{B_m}{y} \frac{B \delta / \text{м}^2}{\text{м}}$$

Для збільшення точності розрахунку можна брати подвійне відхилення проміння по обидві сторони від початку координат і відповідно подвійне значення індукції і напруженості поля.

Після визначення Н_с знаходять значення коерцитивної сили при заданій індукції. Питомі втрати обчислюються по формулі

$$P_{yo} = \frac{S_n m_x m_y f \cdot 10^{-4}}{4\pi\gamma} ,$$

де S_n - площа петлі гістерезиса, мм²; f - частота, Гц; γ - щільність матеріалу, г/см³.

7.4. Зміст звіту

Звіт повинний містити:

- 1) схему дослідження;
- 2) табл. 7.1, основну криву намагнічування, побудовану за даними таблиці;
- 3) сімейство петель гістерезиса на кальці з нанесеної на ній основної кривої намагнічування;
- 4) розрахунок масштабів, коерцитивної сили і питомих утрат;
- 5) висновки про магнітні властивості випробуваного зразка .

Контрольні питання

1. Пояснити схему дослідження (рис. 7.3).
2. Чому на екрані осцилографа (схема рис. 7.3) можна спостерігати графіка функції B=f(H)?
3. Чому для іспитів беруть зразок у формі тора?
4. Що таке початкова крива намагнічування, основна крива намагнічування і петля гістерезиса?

5. Назвіть основні параметри феромагнітних матеріалів. Як можна визначити основні параметри графічно за допомогою основної кривої намагнічування і граничної петлі гістерезиса?

6. На які групи (по магнітних властивостях) підрозділяються феромагнітні матеріали? Що є критеріями розподілу?

7. Що таке технічно чисте, карбонільне, електролітичне залізо? Де застосовуються і якими особливостями володіють ці матеріали?

8. Що таке листовая електротехнічна сталь, де вона застосовується?

9. Що таке пермалой, альсифер, де вони застосовуються?

10. Що таке магнітодіелектрики, ферити, де вони застосовуються?

11. Якими властивостями повинні володіти матеріали, використовувані для виготовлення постійних магнітів? Назвіть найважливіші сплави, застосовувані для цієї мети.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богородицкий Н.П. и др. Электротехнические материалы. - Л.: Энергия, 1977.

2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. - М.: Высш. шк., 1980.

3. Березин В.Б. и др. Электротехнические материалы. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

4. Тареев Б.М. и др. Электрорадиоматериалы. – М.: Высш. шк., 1978.

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1. Визначення питомого опору твердих діелектриків.....	3
Лабораторна робота № 2. Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат та діелектричної проникності твердих діелектриків.....	9
Лабораторна робота № 3. Електрична міцність твердих діелектриків.....	13
Лабораторні роботи № 4, 5. Фізичні властивості трансформаторного масла.....	21
Лабораторна робота № 6. Дослідження сегнетоелектриків	26
Лабораторна робота № 7. Визначення характеристик магнітних матеріалів.....	32
Література.....	37