

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний університет науки і технологій

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

*Електронний аналог
друкованого видання*

Укладач:
С. О. Плітченко

Експерти:
канд. техн. наук, проф. *Віктор Дьяков*

Рекомендовано МКФ «УЕП» (протокол № 2 від 15.11.2022).
Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 598 від 28 .02..2023)

Електротехнічні матеріали : методичні рекомендації до лабораторних робіт / уклад. С. О. Плітченко ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2022. – 44 с.

Методичні рекомендації призначені для використання студентами денної форми навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (галузь знань 14 «Електрична інженерія») під час виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали».

Методичні рекомендації містять основні теоретичні положення для засвоєння матеріалу, інструкції до виконання лабораторних робіт, вимоги до аналізу результатів та оформлення робіт.

Іл. 11. Табл. 20. Бібліогр.: 8 назв.

ЗМІСТ

Вступ	4
Загальні вимоги правил технічної експлуатації та охорони праці під час виконання робіт в лабораторії електротехнічних матеріалів	5
Загальні вимоги до студентів	6
Лабораторна робота № 1	
Дослідження залежності діелектричної проникності діелектриків від температури. Профілактичні випробування матеріалів на вологість методом вимірювання ємності	7
Лабораторна робота № 2	
Дослідження залежності кута діелектричних втрат та потужності діелектричних втрат від напруги	12
Лабораторна робота № 3	
Пробій повітря. Дослідження залежності електричної міцності повітря від роду електричного поля та відстані між електродами	14
Лабораторна робота № 4	
Дослідження нафтового трансформаторного масла. Пробій рідинних діелектриків. Дослідження залежності питомого опору рідинного діелектрика від температури	16
Лабораторна робота № 5	
Пробій твердих діелектриків. Дослідження впливу полярності та пористості твердого діелектрика на його електричну міцність	21
Лабораторна робота № 6	
Дослідження властивостей напівпровідникових матеріалів	24
Лабораторна робота № 7	
Дослідження властивостей провідникових матеріалів. Дослідження залежності питомого опору від температури (міді та сплавів)	26
Лабораторна робота № 8	
Дослідження магнітних властивостей феромагнетиків у змінному магнітному полі	28
Бібліографічний список	31
Додатки	32

ВСТУП

За останні десятиліття електроенергетична галузь вносить великий вклад в розвиток науково-технічного прогресу. Електротехнічні пристрої стають дедалі ефективнішими і складнішими за своєю будовою, конструкційні елементи яких виготовляють з різноманітних видів електротехнічних матеріалів (ЕТМ).

Від сучасних ЕТМ вимагають підвищених електричних, механічних, фізико-хімічних властивостей, від яких значною мірою залежить надійність роботи обладнання електроенергетичної промисловості. Тому вивченню матеріалів приділяється значна увага. Знання електрофізичних, фізико-технічних і механічних властивостей матеріалів та процесів, що в них відбуваються протягом експлуатації є обов'язковою умовою раціонального їх впровадження та використання. Так само не менш важливими є знання про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів на їх основі, які повинні відповідати вимогам чинних ДСТУ, нормативним і технічним умовам їхнього використання.

В більшості випадків, на надійну роботу електричних мереж і електротехнічних пристроїв можуть впливати зовнішні фактори, такі як сильні електромагнітні поля, високі температури, статичні та динамічні навантаження, атмосферні впливи тощо. Тому врахування впливу наведених факторів забезпечує стабільність властивостей матеріалів і є важливим для забезпечення безперебійного функціонування електрообладнання та всієї електроенергетичної системи в цілому.

Дисципліна «Електротехнічні матеріали» відноситься до обов'язкової компоненти освітніх програм «Електротехнічні системи електроспоживання», «Електричний транспорт» та «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», оскільки в ній передбачається вивчення властивостей, областей застосування, способів одержання електротехнічних матеріалів, які застосовуються в електротехнічних пристроях.

Для закріплення теоретичних знань та набуття необхідних умінь програмою передбачається виконання 8 лабораторних робіт. В наведених роботах студенти отримують практичні навички використання методів випробувань ЕТМ, визначення комплексного впливу на їх властивості реальних умов експлуатації електроенергетичного обладнання.

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт сприяють досягненню студентами наступних очікуваних результатів навчання: вміння обирати ефективні методи контролю властивостей електротехнічних матеріалів; вміння виконувати необхідні заміри і розрахунки для визначення електричних характеристик матеріалів.

Методичні рекомендації містять опис лабораторних робіт, основні теоретичні відомості для підготовки до виконання лабораторних робіт, методику дослідження характеристик електротехнічних матеріалів, методи випробу-

вання та застосування ЕТМ на практиці, обробку результатів експериментів і порівняння їх з теоретичними розрахунками, порядок оформлення звіту та контрольні запитання.

При виконанні лабораторних робіт студент повинен вміти вирішувати практичні інженерні задачі, складати різні схеми для випробування ЕТМ та ізоляційних конструкцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПРАВИЛ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБІТ В ЛАБОРАТОРІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Лабораторія електротехнічних матеріалів є лабораторією підвищеної небезпеки щодо електротравматизму. Тому:

1. На початку семестрових занять студент зобов'язаний пройти загальний інструктаж з ПТЕ і ПТБ при проведенні робіт в електроустановках з напругою до і вище 1000 В. Інструктаж фіксують у спеціальному журналі, де студенти, яких інструктують, та викладач, який інструктує, ставлять свої підписи. Студенти, які не пройшли інструктаж, до лабораторних занять не допускаються.

2. Забороняється працювати з високовольтними установками одній людині.

3. Перед початком виконання практичного завдання студент зобов'язаний засвоїти загальні положення правил технічної експлуатації (ПТЕ) і правил техніки безпеки (ПТБ) під час експлуатації електроустановок, випробувальних станцій та іншого лабораторного устаткування.

4. Виконувати завдання дозволяється тільки після отримання дозволу від викладача або лаборанта та ознайомлення з методами та прийомами правильного його виконання.

5. Працювати з високовольтними установками слід в захисних рукавичках, стоячи на ізоляційному килимку.

6. До ввімкнення високої напруги всі огорожі повинні бути надійно закриті, категорично не допускається робота з несправним або навмисне відключеним (перемкнутим) блокуванням.

7. Категорично забороняється виконувати перемикання в схемі, замінювати чи поправляти електроди після подачі напруги. Для заміни електродів необхідно зняти напругу.

8. Високовольтна установка повинна знаходитися під напругою лише на протязі часу, необхідного для проведення випробувань чи вимірювань.

9. У випадку появи ознак пошкодження обладнання чи устаткування (шум, дим, запах) чи раптового припинення подачі енергії потрібно негайно зупинити експеримент та вимкнути живлення, доповісти керівникові та залишатися біля робочого місця, очікуючи на його подальше розпорядження.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО СТУДЕНТІВ

Кожна лабораторна робота передбачає обов'язкову самостійну підготовку студентів до неї, яка потребує від студента систематичної роботи з різними джерелами інформації: підручниками, конспектами лекцій, методичними вказівками, а в окремих випадках і спеціальною літературою або інтернет-джерелами.

При виконанні кожної лабораторної роботи студенти повинні: самостійно підготуватися до роботи, виконати експериментальне завдання у відповідності з методичними вказівками, обробити результати, сформулювати висновки, оформити звіт та захистити виконану лабораторну роботу.

В процесі підготовки до роботи студенти зобов'язані заздалегідь ознайомитися з даними методичними вказівками, вивчити необхідні теоретичні відомості та виконати завдання на самостійну роботу. В результаті студенти повинні чітко уявляти собі мету роботи, її задачі, знати фізичну суть явищ, що досліджуються, обладнання і засоби вимірювання, методику розрахунків та характер очікуваних результатів. Якість виконання самостійного завдання контролює викладач на початку заняття. Студенти, підготовка яких не відповідає викладеним вимогам, до виконання лабораторної роботи не допускаються.

Звіт з лабораторної роботи оформлюють у спеціальному зошиті «Звіт з лабораторних робіт». Він складається з чотирьох розділів:

I. Тема й мета роботи. Записують тему й стисло формулюють мету роботи.

II. Теоретичні відомості. Стисло розглядають теорію питання, яке вивчають, а саме: наводять формулювання понять, формули для розрахунку, основні криві залежностей електричних характеристик матеріалу від температури, частоти або величини напруженості електричного чи магнітного поля. При цьому вказують причини, що приводять до зміни характеристики, яку досліджують.

III. Завдання. Стисло записують послідовність виконання роботи. У вигляді таблиці наводять дані: вхідні, отримані експериментально й розрахункові. Будують графік залежності характеристики матеріалу, який вивчають.

IV. Висновок. При обробці експериментальних даних та формулюванні висновків слід аналізувати фізичну суть закономірностей, що спостерігаються, та можливість їхнього використання в інженерній роботі по спеціальності. Студенти повинні вміти пояснити одержані результати та обґрунтувати свої висновки при захисті лабораторної роботи.

Звіти з лабораторних робіт представляються викладачу на наступному черговому занятті в лабораторії. Заліки по кожній лабораторній роботі здаються на занятті, у вигляді тестових запитань в СДН «Лідер» на сторінці курсу або в час консультацій викладача згідно з розкладом.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ. ПРОФІЛАКТИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА ВОЛОГІСТЬ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ ЄМНОСТІ.

Мета роботи. 1. Дослідити вплив природи діелектрика та температури на величину його діелектричної проникності. 2. Виконати профілактичне випробування електричної ізоляції на зволоженість методом вимірювання ємності.

Теоретичні відомості

Електрична ємність конденсаторів, кабелів та інших електроізоляційних конструкцій залежить від їх геометричних розмірів, значення діелектричної проникності матеріалу та зовнішніх факторів: температури, частоти, вологості тощо. Для плоского конденсатора в однорідному електричному полі ємність визначається:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{h} \quad (1.1)$$

де ε_0 – електрична стала або діелектрична проникність вакууму, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε – відносна діелектрична проникність матеріалу; S – площа вимірювального електрода, м²; h – товщина діелектрика, м.

Поляризація – стан речовини, який характеризується тим, що електричний момент, пов'язаний з обмеженим зміщенням зв'язаних зарядів або орієнтацією полярних молекул під дією електричного поля, для даного об'єму цієї речовини має значення, відмінне від нуля.

Відносна діелектрична проникність, або просто діелектрична проникність ε є одним з найважливіших макроскопічних електричних параметрів діелектрика і являє собою кількісну міру інтенсивності поляризації матеріалу, її значення визначає величину електричної ємності матеріалу.

Діелектрична проникність ε представляє відношення заряду Q конденсатора з визначеним діелектриком до заряду Q_0 того ж конденсатора, якщо б між електродами був вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (1.2)$$

де Q_d – заряд, обумовлений поляризацією діелектрика.

З рівняння видно, що діелектрична проникність – величина безрозмірна і у будь-якого матеріалу більше 1; $\epsilon = 1$ тільки в випадку вакууму.

Відповідно до рівняння Клаузіуса-Мосотті діелектрична проникність ϵ залежить від числа частинок в одиниці об'єму n і величини поляризованості цих частинок α . В свою чергу n і α залежать від природи діелектрика та його температури, α – ще й від частоти прикладеної напруги.

Неполярні тверді діелектрики молекулярної будови мають в основному тільки електронну поляризацію. Тому вони характеризуються невисокими значеннями діелектричної проникності ($\epsilon = 2,0 \dots 2,5$), що більше, ніж ϵ газів, тому що більша величина n . При нагріванні ϵ монотонно знижується, тому що зменшується концентрація n поляризованих молекул у результаті теплового розширення діелектрика. В області температури плавлення $T_{пл}$ ϵ стрибкоподібно знижується.

Величина, що характеризує відносну зміну ϵ при нагріванні діелектрика на один Кельвін, називається температурним коефіцієнтом діелектричної проникності $TK\epsilon$ (вимірюється в K^{-1}):

$$TK\epsilon = \frac{1}{\epsilon_1} \cdot \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{T_2 - T_1} \quad (1.3)$$

де ϵ_1 – значення діелектричної проникності, виміряне при температурі T_1 , а ϵ_2 – при температурі T_2 .

Полярні тверді діелектрики молекулярної будови поряд з електронною поляризацією мають і дипольно-релаксаційну. Тому в цих діелектриках діелектрична проникність має більш високі значення, ніж у неполярних; ϵ змінюється в межах від 3,0 до 20 і більше.

При нагріванні величина ϵ полярних діелектриків спочатку змінюється незначно, потім різко зростає, проходить через максимум і далі повільно знижується, при цьому при одночасному підвищенні частоти напруги максимум зміщується у бік більш високих температур.

Практична частина 1

Дослідження залежності діелектричної проникності діелектриків від температури

1.1. Експериментальна установка

Для дослідження залежності діелектричної проникності у неполярного й полярного діелектриків від температури використовується лабораторне устаткування, яке підключено за схемою, як наведено на рисунку 1.1.

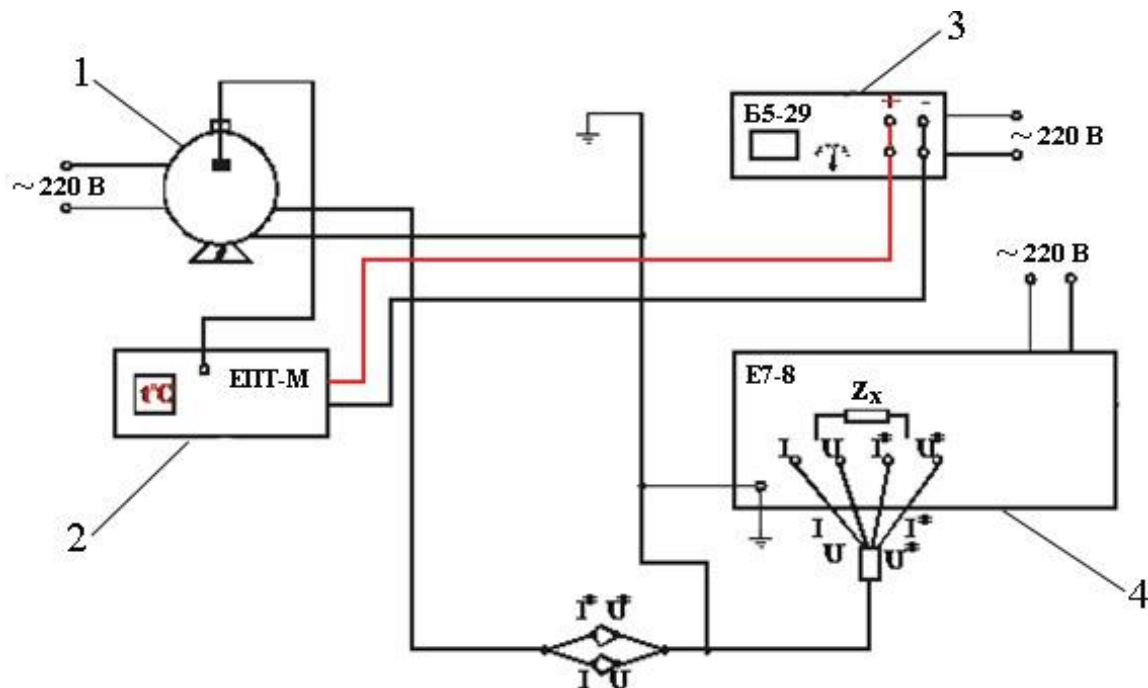


Рис. 1.1. Принципова схема установки для вимірювання діелектричної проникності твердих діелектриків:

1 – термостат з випробовуваним елементом; 2 – електротермометр; 3 – вимірювач R , L , C ; 4 – блок живлення електронного термометра

1.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

1. Дослідити залежність ємності C у неполярного й полярного діелектрика від температури.

Результати вимірювань й обчислень занести до табл. 1.1.

Таблица 1.1

Протокол виконання досліджень

Матеріал або виріб	$T, ^\circ\text{C}$	T, K	$C, \text{нФ}$	ε	$\text{TK}\varepsilon, \text{K}^{-1}$
Конденсаторний папір	25				
	30				
	...	...	...	...	...
	70				
Полістирол	25				
	70				

2. Розрахувати величину ε для кожного значення ємності C за виразом (1.1), при розрахунках приймати наступні параметри досліджуваних зразків: конденсаторний папір площею $S_{\text{кп}} = 12,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, та товщиною $h_{\text{кп}} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; полістирол площею $S_{\text{пс}} = 0,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, та товщиною $h_{\text{пс}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

3. Графічно побудувати залежність діелектричної проникності ϵ від температури T для досліджуваних матеріалів.

4. Визначити середнє значення температурного коефіцієнта діелектричної проникності за виразом (1.3) для досліджуваних матеріалів.

Практична частина 2

Профілактичні випробування матеріалів на вологість методом вимірювання ємності

2.1. Експериментальна установка

В якості експериментальної установки використовується прилад контролю вологості типу ПКВ-7, який може використовуватись для контролю ізоляції силових трансформаторів, високовольтних вводів, вимірювальних трансформаторів, кабелів тощо, та в тих випадках, коли необхідно оцінити зміну стану ізоляції за який-небудь проміжок часу, через порівняння результатів вимірювань в різні моменти часу.

2.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

Здійснити профілактичне випробування ізоляції виробу методом вимірювання ємності C_{50} і $C_2 - C_{50}$.

За допомогою приладу ПКВ-7 виміряти при кімнатній температурі ємності C_{50} і $C_2 - C_{50}$ для зразків діелектрика й кабелю різного ступеня зволоженості $\psi_{\text{пов}}$:

а) результати вимірювань занести до табл. 1.2;

Таблиця 1.2

Протокол виконання досліджень

Матеріал або виріб	$\psi_{\text{пов}}, \%$	$C_{50}, \text{пФ}$	$C_2 - C_{50}, \text{пФ}$	C_2 / C_{50}	Висновок про стан ізоляції
Ацетатцелюлоза	0				
	32				
	81				
	100				
Електрокартон	0				
	32				
	81				
	100				
Електрокабель	0				
	100				

б) розрахувати відношення C_2/C_{50} для кожного зразка за наступною формулою:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad (1.4)$$

де C_2/C_{50} – коефіцієнт ступеня зволоженості зразків;

C_{50} і $C_2 - C_{50}$ – ємності за різних режимів роботи приладу ПКВ-7, пФ.

в) зробити висновок про придатність діелектричного матеріалу до подальшого використання. При цьому необхідно враховувати наступне:

$C_2/C_{50} \rightarrow 1$ – для сухого діелектричного матеріалу;

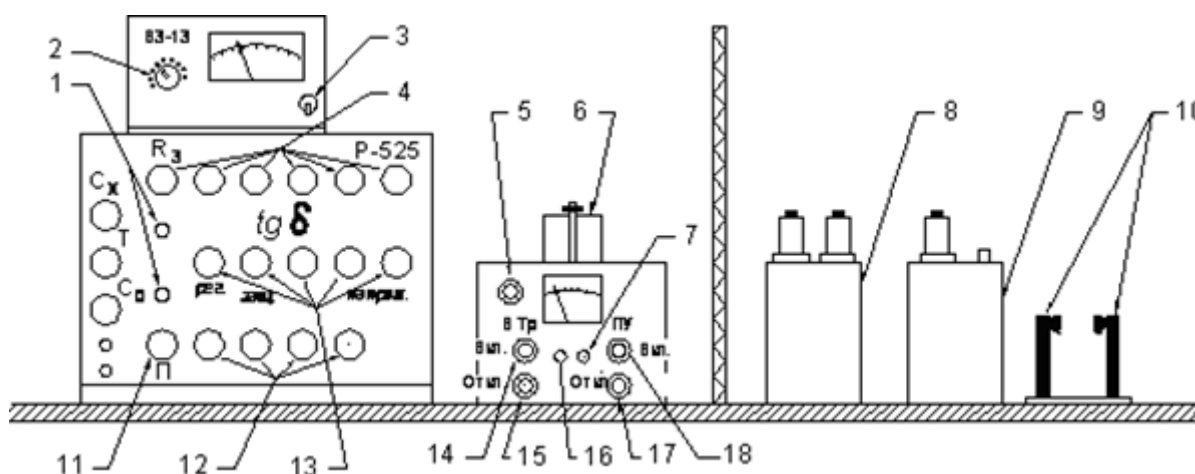
$C_2/C_{50} > 1,2 \dots 1,3$ – діелектричний матеріал зволожений й потребує сушки;

Висновки занести до таблиці 1.2.

Контрольні запитання

1. Пояснити будову діелектриків з молекулярною структурою (неполярних і полярних). Навести приклади.
2. Пояснити природу іонного зв'язку. Що розуміють під діелектриками іонної будови з щільною і нещільною упаковкою ґрат іонами. Навести приклади.
3. Охарактеризувати особливості будови й властивості полімерів.
4. Описати три фізичних стани полімерів. Дати визначення температурам плавлення $T_{пл}$ та склування T_c .
5. Що розуміють під поляризацією та електропровідністю діелектриків?
6. Назвати основні електричні характеристики діелектриків та їх одиниці вимірювання.
7. Пояснити механізм деформаційних видів поляризації. У яких діелектриках вони виявляються?
8. Пояснити механізми видів релаксаційної поляризації. У яких діелектриках вони виявляються?
9. Як природа діелектрика впливає на величину його діелектричної проникності (чому ϵ полярних діелектриків більше, ніж у неполярних, а в рідинних більше, ніж у газ оподібних і твердих)?
10. Що розуміють під температурним коефіцієнтом діелектричної проникності TK_ϵ і як його визначають?
11. Пояснити принцип методу профілактичного випробування ізоляції електротехнічних виробів на зволоженість шляхом вимірювання ємності.

2.1. Експериментальна установка



1 – неонові розрядники; 2 – перемикач меж вимірювання; 3 – тумблер «МЕРЕЖА»; 4 – верхній ряд рукояток моста; 5 – рукоятка регулятора напруги; 6 – рубильник установки; 7 – сигнальна (зелена) лампа; 8 – високовольний трансформатор; 9 – зразковий конденсатор; 10 – затискачі C_x ; 11 – перемикач Π моста; 12 – рукоятки регулювання захисної напруги; 13 – середній ряд рукояток моста; 14 – кнопка «ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ТР. ВМИК.»; 15 – кнопка «ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ТР. ВИМИК.»; 16 – сигнальна (червона) лампа; 17 – кнопка «ПУЛЬТ УПРАВЛІННЯ ВИМИК.»; 18 – кнопка «ПУЛЬТ УПРАВЛІННЯ ВМИК.»

2.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

а) при напрузі від 500 до 3000 В визначити значення $tg\delta$ і P ;
б) результати вимірювань занести до табл. 2.1:

Протокол виконання досліджень

Матеріал або виріб	$U, В$	$tg\delta$	$R_3, Ом$	$C, Ф$	$P, Вт$
Електрокабель	500				
	1000				
	...	...	...		
	3000				

в) розрахувати величину ємності C досліджуваного матеріалу за допомогою наступного виразу:

$$C = \frac{C_0 \cdot R_0}{R_3} \quad (2.1)$$

де C_0 – власна ємність вимірювального моста: $C_0 = 100 \cdot 10^{-12}$ Ф;

R_0 – власний опір вимірювального моста: $R_0 = 3183$ Ом;

R_3 – опір досліджуваного зразка, Ом.

Результати розрахунків занести до табл. 2.1.

г) розрахувати величину потужності діелектричних втрат P досліджуваного матеріалу, що розсіюється, за формулою:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta \quad (2.2)$$

де U – прикладена величина напруги, В;

ω – кутова частота: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, c^{-1} ;

f – циклічна частота, Гц.

д) побудувати на одній координатній площині графіки залежностей: $tg\delta = f(U)$ і $P = f(U)$.

д) проаналізувати побудовану залежність $tg\delta = f(U)$, встановити значення порогу іонізації U_i та максимального значення $tg\delta$ при напрузі U_m . Використовуючи отримані значення визначити номінальну робочу напругу U_n ізоляції високовольтного електрокабеля за формулами:

$$k = \frac{U_m}{U_i} \quad (2.3)$$

$$U_n = \frac{U_i}{k} \quad (2.4)$$

е) за отриманим значенням $tg\delta$ встановити тип діелектричного матеріалу за полярністю.

У **неполярних** полімерів (полістирол, поліпропілен) втрати визначаються, в основному, на домішкову електропровідність, бо процеси поляризації з пружним зміщенням зв'язаних зарядів протікають без втрат енергії зовнішнього поля, тому $\operatorname{tg}\delta$ для них складає $10^{-4} \dots 10^{-5}$.

У **полярних** полімерів (полівінілхлорид, поліамід, поліетилентерефталат) втрати включають в себе втрати на електропровідність та релаксаційні втрати і досягають значень $10^{-2} \dots 10^{-3}$ і більше.

ж) проаналізувати результати розрахунків і зробити висновки стосовно отриманих графічних залежностей та величини U_n .

Контрольні запитання

1. Дати визначення діелектричних втрат, тангенса кута діелектричних втрат та знаходження кута діелектричних втрат на векторній діаграмі.
2. Навести паралельну й послідовну схеми заміщення діелектрика з втратами. Від яких величин залежать $\operatorname{tg}\delta$ і P ?
3. Назвати види діелектричних втрат і причини їх виникнення.
4. Що розуміють під кривою іонізації. Яке її практичне значення?
5. Які види діелектричних втрат наявні в полімерних діелектриках (неполярних і полярних) та яке їх орієнтовне значення $\operatorname{tg}\delta$?
6. Як впливає молекулярна маса, ступінь окиснення й пластифікації полімерних діелектриків на $\operatorname{tg}\delta$?
7. Як (і чому) впливає вологість діелектрика на величину $\operatorname{tg}\delta$?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ПРОБІЙ ПОВІТРЯ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯ ВІД РОДУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ТА ВІДСТАНІ МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ

Мета роботи. Дослідити залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами та їхньої форми.

3.1. Експериментальна установка

Для дослідження пробою повітря необхідне наступне обладнання: висковольтний трансформатор, випрямний пристрій, пульт керування стендом з регулятором напруги та вимірювальними приладами, кронштейни для закріплення в них електродів спеціальної форми та можливістю їх точного осевого переміщення один відносно іншого. Лабораторне устаткування підключають за схемою, яка наведена на рисунку 1.1.

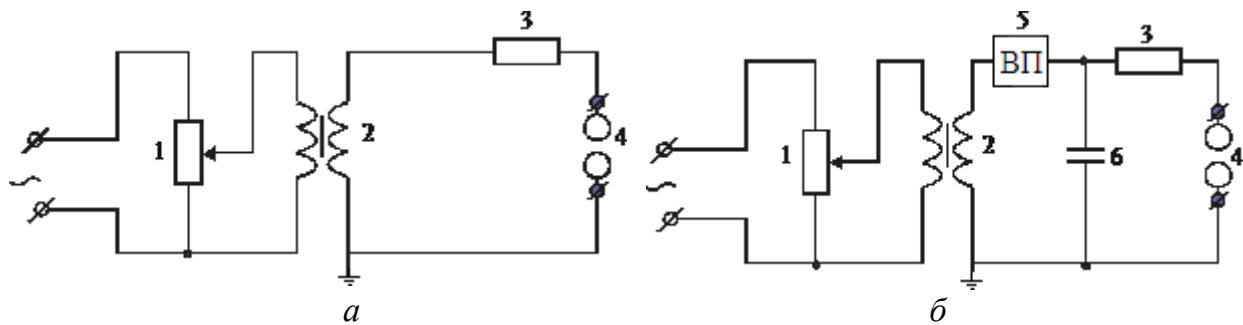


Рис. 3.1. Принципові схеми установки для визначення електричної міцності повітря при змінній (а) і постійній (б) напругах:

1 – регулятор напруги; 2 – високовольтний випробувальний трансформатор; 3 – захисний опір; 4 – об’єкт випробування; 5 – випрямний пристрій; 6 – конденсатор

3.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

1. Дослідити залежність пробивної напруги $U_{пр}$ від відстані h між електродною парою «кулька – кулька». Значення h приймати рівним: 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2 см. Для кожного значення h провести 3 досліди (визначити значення $U_{пр1} \dots U_{пр3}$) та отримані результати занести до таблиці 3.1.

Таблица 3.1

Протокол виконання досліджень

Форма електродів	h , см	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр\text{ ср}}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/см
Куля – куля (однорідне електричне поле)	0,3					
	0,5					
	1					
	1,5					
	2					
Площина – стрижень (різко неоднорідне електричне поле)	0,3					
	0,5					
	1					
	1,5					
	2					

2. Дослідити залежність пробивної напруги $U_{пр}$ від відстані h між електродною парою «площина – стрижень». Значення h приймати рівним: 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2. Для кожного значення h провести 3 досліди (визначити значення $U_{пр1} \dots U_{пр3}$) та отримані результати занести до таблиці 3.1.

3. Використовуючи отримані величини пробивної напруги $U_{пр1} \dots U_{пр3}$ визначити їх середнє значення $U_{пр\text{ ср}}$ та занести його до таблиці 3.1.

4. Використовуючи вираз (3.1) визначити $E_{пр}$ для кожного дослідів:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h} \quad (3.1)$$

Результати розрахунків занести до таблиці 3.1.

5. За даними табл. 3.1 побудувати на одній координатній площині залежність $E_{\text{пр}} = f(h)$ для кожної пари електродів.

6. Проаналізувати результати розрахунків і зробити висновки стосовно отриманих залежностей.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під процесом електричного пробою діелектриків, і які існують форми пробою?
2. Що розуміють під електричною міцністю діелектриків?
3. Дати визначення електричного пробою повітря (газів).
4. Пояснити механізм електричного пробою повітря (газів).
5. Пояснити, як впливають на електричну міцність $E_{\text{пр}}$ повітря (газів): відстань h між електродами; форма електродів.
6. Сформулювати закон Пашена.
7. Пояснити механізм поверхневого пробою, якщо поверхня поділу фаз розташована паралельно до силових ліній поля.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАФТОВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА. ПРОБІЙ РІДИННИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОГО ОПОРУ РІДИННОГО ДІЕЛЕКТРИКА ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Мета роботи. Дослідити властивості та особливості експлуатації нафтових трансформаторних масел, а також освоїти ДСТУ(стандарти) методів випробування масел, тобто визначити діелектричні втрати $tg\delta$, пробивну напругу $U_{\text{пр}}$, густину, в'язкість, вміст води, кислотне число, температуру спалаху тощо. Дослідити механізм електричної й електротеплової форм пробою рідинних діелектриків. Дослідити залежність електричної міцності рідинних діелектриків від вологості повітря.

Встановити вплив іоногенних домішок і дефектів будови на величину питомого опору. Дослідити залежність питомого опору рідинних діелектриків від їх природи (ступеня й полярності), вологості й температури, а також напруженості електричного поля.

4.1. Експериментальна установка I

Апарат АИМ-80 призначений для випробування трансформаторного масла та інших рідких діелектриків на електричну міцність підвищеною напругою змінного струму частотою 50 Гц. Апарат переносного типу з габаритами 345 x 386 x 485 мм та масою 35 кг. Найбільша випробувальна напруга змінного струму – 80 кВ, споживана потужність – 0,5 кВА.

АИМ-80 підключається до мережі однофазного змінного струму номінальної напруги 220 В. Принципова електрична схема апарату наведена на рис. 4.1.

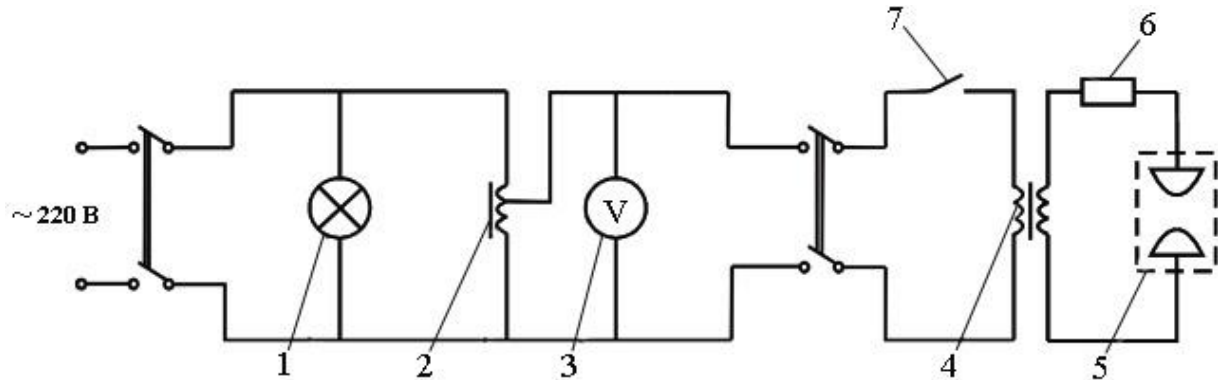


Рис. 4.1. Принципова схема установки для визначення пробивної напруги рідинних діелектриків:

1 – сигнальна лампа; 2 – регулятор напруги; 3 – вольтметр; 4 – високовольтний випробувальний трансформатор; 5 – вимірювальна посудина; 6 – захисний опір; 7 – автоматичний вимикач

Випробування проводять у спеціальній фарфоровій ванні (рис. 4.2), що заповнюється рідким діелектриком, що випробовується.

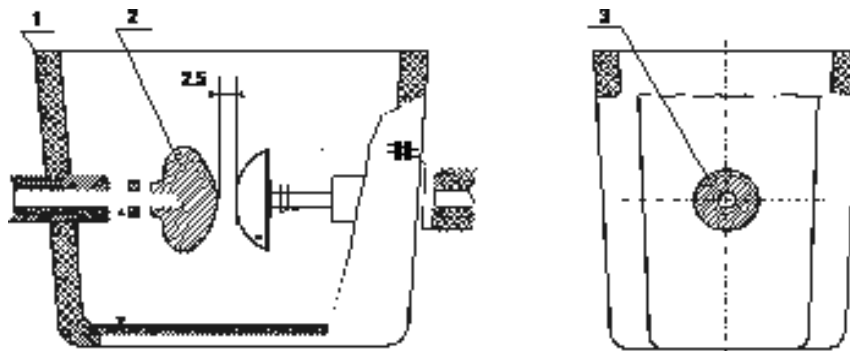


Рис. 4.2. Вимірювальна посудина для визначення пробивної напруги:

1 – посудина для рідини; 2 – електрод; 3 – вводи електродів

У посудину поміщені два латунних електроди 2 діаметром напівсфери 25 мм. Електроди встановлюють на певній відстані (вона має бути 2,5 мм) та перевіряють її щупом для вимірювання зазору. Потемнілі під час роботи електроди перед випробуваннями полірують замшею.

4.2. Експериментальна установка II

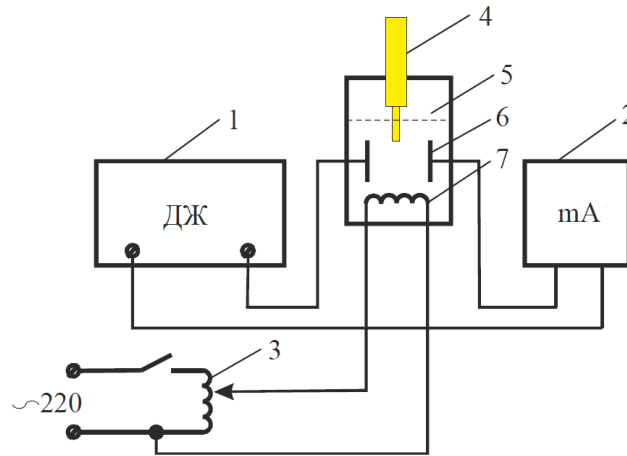


Рис. 4.3. Принципова схема установки для вимірювання питомої електропровідності рідинного діелектрика:

1 – джерело живлення постійного струму ВА-49; 2 – наноамперметр (вольтметр універсальний В7-21А); 3 – латр; 4 – термометр; 5 – посудина з трансформаторним маслом; 6 – електроди; 7 – підігрівач

4.3. Зміст завдання № 1 та порядок його виконання

1. Необхідне обладнання: віскозиметр Енглера; прилад для вимірювання температури спалаху; аналітичні важелі; ареометр; циліндр; колба; прилад для вимірювання пробивної напруги АИМ-80.
2. Виконати скорочений аналіз масла, який передбачає визначення таких показників якості: зовнішній вигляд і колір; наявність механічних домішок і вільної води (візуально); пробивна напруга; кислотне число; температура спалаху.

Як правило, в умовах нормальної експлуатації, коли показники якості експлуатаційного масла не наближаються до гранично допустимих значень і не спостерігається погіршення характеристик твердої ізоляції, скороченого аналізу досить для контролю стану масла й прогнозування терміну його служби.

3. Проаналізувати деякі експлуатаційно-технічні характеристики нафтового трансформаторного масла:
 - а) виконати дослідження на пробій зразків нафтового трансформаторного масла за допомогою апарата АИМ-80 у стандартній вимірювальній посудині відповідно до ДСТУ;
 - б) визначити кислотне число й температуру спалаху;
 - в) результати досліджень занести до табл. 4.1;

Таблиця 4.1

Спостереження	Візуальне спостереження	Густина, г/м ³	В'язкість, м ² /с	$\operatorname{tg} \delta$ (при 90 °С)	$U_{\text{пр}}$, кВ	Темпера-тура спалаху, °С	Кислотне число, $\frac{\text{мг} \cdot \text{КОН}}{1 \text{ г}}$
Значення показників							
Висновок (ДСТУ)							

- г) на підставі отриманих результатів визначити, у яких апаратах і на яку робочу напругу можуть бути використані випробовувані зразки. Зробити висновок стосовно якості та експлуатаційних властивостей трансформаторного масла;
- д) за планом дати характеристику дослідженому матеріалу, користуючись дод. 1–2.

4.4. Зміст завдання № 2 та порядок його виконання

Дослідити залежність електричної міцності $U_{\text{пр}}$ зразків рідинного діелектрика від зміни відносною вологістю $\psi_{\text{пов}}$ (рис. 4.1, 4.2):

- а) здійснити дослідження на електротепловий пробій $U_{\text{пр}}$ технічно чистих зразків рідинного діелектрика на апараті АИМ-80 у стандартній вимірювальній посудині з інтервалом між пробоями в 1 хв;
- б) результати випробувань занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

№ випробування	$\psi_{\text{пов}}$, %	$U_{\text{пр1}}$, кВ	$U_{\text{пр2}}$, кВ	$U_{\text{пр3}}$, кВ	$U_{\text{пр ср}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм

- в) використовуючи отримані величини пробивної напруги $U_{\text{пр1}} \dots U_{\text{пр3}}$ визначити їх середнє значення $U_{\text{пр ср}}$ та занести його до таблиці 4.2;
- г) використовуючи вираз (4.1) визначити $E_{\text{пр}}$ для кожного досліді:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h} \quad (4.1)$$

де h – відстань між електродами, приймати 2,5 мм;
Результати розрахунків занести до таблиці 3.2.

- д) за даними таблиці побудувати на одній координатній площині залежність $E_{\text{пр}} = f(\psi_{\text{пов}})$ і у висновках пояснити причини, які призводять до зміни $E_{\text{пр}}$;
- г) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам, користуючись додатком 1–2.

4.4. Зміст завдання № 3 та порядок його виконання

Дослідити залежність питомого об'ємного опору ρ рідинного діелектрика від температури при напрузі, зазначеній у ДСТУ або ТУ для досліджуваного матеріалу (див. рис. 4.3):

- а) результати вимірювань і обчислень занести до табл. 4.3;

Таблиця 4.3

Матеріал	$T, ^\circ\text{C}$	$I \cdot 10^{-9}, \text{A}$	$\rho \cdot 10^9, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$R \cdot 10^9, \text{Ом}$	$\gamma \cdot 10^{-9}, \text{См/м}$
Трансформаторне масло	25				
	30				
	...				
	70				

Вхідні дані:

- відстань між електродами: $h = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- площа поперечного перерізу: $S = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$;
- напруга на котушках підігрівача $U = 20 \text{ В}$.

Формули для розрахунку:

$$\rho = \frac{U \cdot S}{I \cdot h} \quad (4.2)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (4.4)$$

Результати розрахунків занести до таблиці 4.3.

- б) за отриманими даними побудувати на одній координатній площині графік залежності $\rho = f(T)$ та $\gamma = f(T)$;
- в) проаналізувати результати розрахунків і зробити висновки стосовно зміни графіків залежності $\rho = f(T)$ та $\gamma = f(T)$;

- д) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам, користуючись дод. 1–2.

Контрольні завдання та запитання до лабораторної роботи

1. Пояснити електрофізичні властивості трансформаторного масла.
2. Що називають кислотним числом трансформаторного масла?
3. Охарактеризувати процес старіння нафтового трансформаторного масла й описати його вплив на електричні властивості.
4. Що розуміють під газостійкістю трансформаторного масла?
5. Як впливає на $E_{\text{пр}}$ і $\text{tg}\delta$ природа рідини, а саме: полярність, густина, молекулярна маса, кислотне число, в'язкість?
6. Як впливає на $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла температура й частота електричного поля?
7. Пояснити механізм електричної та електротеплової форми пробою рідинних діелектриків.
8. Як впливає на $E_{\text{пр}}$ рідинних діелектриків ступінь їх чистоти, вологості?
9. Як впливає природа домішок на $E_{\text{пр}}$ рідинного діелектрика?
10. Нарисувати й пояснити залежність $E_{\text{пр}}$ від температури сухого й зволоженого нафтового трансформаторного масла?
11. Як впливає на $E_{\text{пр}}$ рідинних діелектриків: а) частота напруги? б) відстань між електродами? в) форма електродів?
12. Пояснити механізм утворення іонної й електрофоретичної електропровідностей рідинних діелектриків.
13. Від яких чинників залежить ступінь дисоціації іоногенної домішки і, отже, γ рідинних діелектриків?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ПРОБІЙ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛЯРНОСТІ ТА ПОРИСТОСТІ ТВЕРДОГО ДІЕЛЕКТРИКА НА ЙОГО ЕЛЕКТРИЧНУ МІЦНІСТЬ

Мета роботи. Дослідити механізм форми пробою твердих діелектриків та встановити залежність електричної міцності твердих діелектриків від їхньої природи (полярність, пористість тощо), вологості й товщини зразків.

5.1. Експериментальна установка

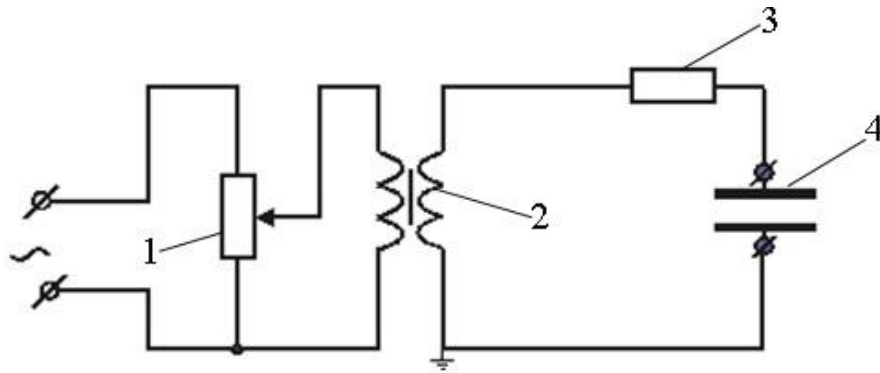


Рис. 5.1. Принципова схема установки для випробування твердого діелектрика на електротепловий пробій при змінній напрузі:

- 1 – регулятор напруги; 2 – високовольтний випробувальний трансформатор;
3 – захисний опір; 4 – об'єкт випробування

5.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

1. Дослідити залежність електричної міцності $E_{\text{пр}}$ полімерних діелектриків від їхньої полярності (значення ε) і пористості:
 - а) виконати електротепловий пробій на частоті 50 Гц плівкових зразків, виданих викладачем (наприклад, паперу, поліетилену, ацетатцелюлози), на високовольтному випробному стенді за допомогою стандартних електродів;
 - б) результати вимірювань і обчислень занести до табл. 5.1;
 - в) значення $E_{\text{пр}}$ визначити за формулою:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр сер}}}{h} \quad (5.1)$$

де $U_{\text{пр сер}}$ – середнє значення пробивної напруги;
 h – товщина зразка;

Таблиця 5.1

Протокол виконання досліджень

Діелектрик	ε , в.о.	Пористість, %	h , мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр\text{сер}}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
Поліетилен								
Ацетатцелюлоза								
Папір								

- г) проаналізувати отримані результати й у висновках дати пояснення щодо зміни $E_{пр}$ залежно від: діелектричної проникності, пористості та товщини зразка;
- д) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам.
2. Дослідити вплив відносної вологості повітря $\psi_{пов}$ на електричну міцність $E_{пр}$ різних діелектриків:
- а) виконати за допомогою електродів Роговського на частоті 50 Гц дослід на визначення розрядної напруги U_r діелектрика при відносній вологості повітря в аудиторії $\psi_{пов}$ та товщині зразка $h = 3$ см ;
- б) значення $E_{пр}$ визначити за формулою (5.1);
- в) результати вимірювань і обчислень занести до табл. 5.2;

Таблиця 5.2

Протокол виконання досліджень

Діелектрик	ε	$U_{р1}$, кВ	$U_{р2}$, кВ	$U_{р3}$, кВ	$U_{р\text{сер}}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм

- г) за отриманими результатами розрахунків побудувати графік залежності $E_{пр} = f(\varepsilon)$;
- д) проаналізувати отримані результати й у висновках дати пояснення щодо впливу діелектричної провідності ε на електричну міцність $E_{пр}$;
- е) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам.

Контрольні запитання

1. Пояснити механізм електричного пробою твердих діелектриків.
2. Пояснити механізм електротеплового пробою твердих діелектриків і графоаналітичний метод розрахунку пробивної напруги.

3. Пояснити механізм електрохімічного пробою твердих діелектриків.
4. Пояснити механізм утворення: електричних дендритів; водяних дендритів; металевих дендритів.
5. Як впливають на електричну міцність твердих діелектриків: їхня полярність і щільність упаковки структурних елементів; вологість і температура; товщина зразків, площі електродів і кількість шарів з тонких плівок; пористість; частота і тривалість прикладення напруги?
6. Як впливають на електричну міцність полімерних діелектриків: кристалічність; розмір надмолекулярних утворень і орієнтація зразків шляхом витяжки; молекулярна маса і пластифікація; введення твердих наповнювачів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи. Дослідити особливості будови та властивості напівпровідникових матеріалів; експериментально встановити залежності електропровідності напівпровідників від їхньої температури та матеріалу (кремній чи германій); визначити тип провідності й ширину забороненої зони.

6.1. Експериментальна установка

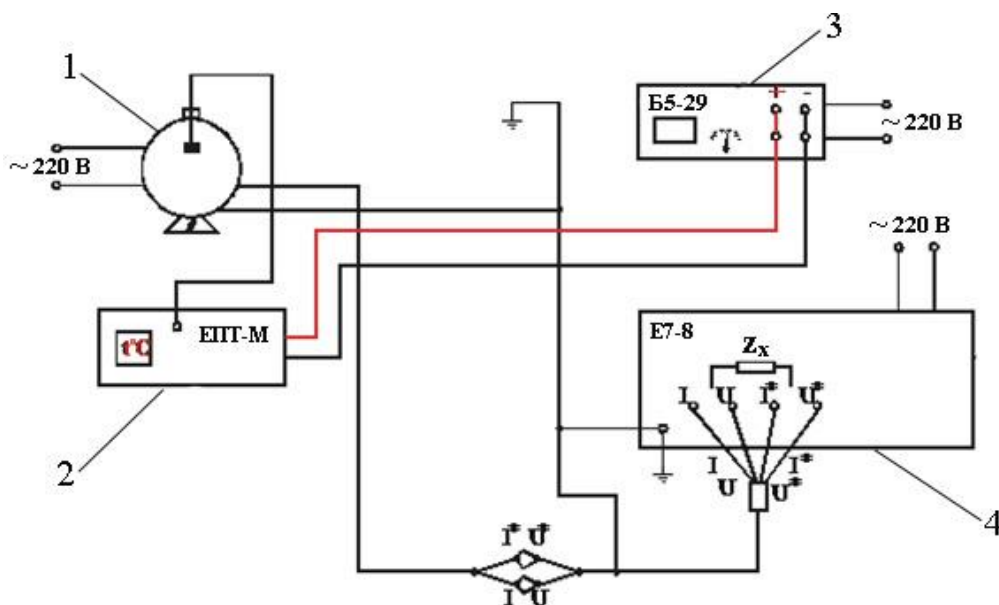


Рис. 6.1. Принципова схема установки для вимірювання питомої електропровідності напівпровідникового матеріалу:

1 – термостат з випробовуваним елементом; 2 – електротермометр; 3 – блок живлення електронного термометра; 4 – вимірювач R , L , C

6.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

Дослідити температурну залежність питомої електропровідності напівпровідникового матеріалу й визначити ширину забороненої зони напівпровідника ΔW або енергію активізації (іонізації) домішки $\Delta W_{\text{пр}}$ (тобто ΔW_a або ΔW_d). За значенням $\Delta W_{\text{пр}}$ встановити природу легувальної домішки (див. дод. 1):

- а) дослідити температурну залежність напівпровідникового матеріалу (терморезисторів) й визначити його температурний коефіцієнт опору TK_p у досліджуваному температурному інтервалі й у заданій точці:

$$\Delta W_{\text{пр}} = 0,3968 \frac{\lg \gamma_2 - \lg \gamma_1}{\frac{1000}{T_2} - \frac{1000}{T_1}} \quad (6.1)$$

де γ_1, γ_2 – попереднє та наступне значення питомої електропровідності;

T_1, T_2 – попереднє та наступне значення відповідної температури;

- в) результати занести до табл. 6.1;

Таблиця 6.1

Матеріал	$T, ^\circ\text{C}$	$1000/T, \text{K}^{-1}$	γ, Cm	$\lg \gamma$	$\Delta W_{\text{пр}}, \text{eV}$
	25				
	30				
	...	...	...	...	...
	70				

- г) побудувати на одній координатній площині графіки залежностей $\lg \gamma = f(1000/T)$;

- д) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам та, користуючись дод. 3, визначити легувальну домішку.

Контрольні запитання

1. Які значення питомого опору й ширини забороненої зони мають діелектрики й провідники? З якою метою використовують напівпровідникові матеріали?
2. Пояснити зонну теорію твердого тіла. Що розуміють під валентною зоною, забороненою зоною, зоною провідності?
3. Охарактеризувати власні й домішкові напівпровідники й пояснити, який у них тип провідності й механізм його утворення.

4. У яких типах напівпровідників електрони й дірки є основними й неосновними носіями заряду й чому?
5. Пояснити механізм електропровідності кристалічного кремнію (Si), легированого бором (B) і миш'яком (As).
6. Як впливає концентрація домішки в сильнолегованих напівпровідниках на ΔW ? Пояснити механізм впливу.
7. Пояснити механізм формування p – n -переходу та його напівпровідникові властивості (основні й неосновні носії заряду, нерухомі об'ємні позитивні та негативні заряди, струми: прямий $I_{пр}$ і зворотний $I_{зв}$).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОГО ОПОРУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ (МІДІ ТА СПЛАВІВ)

Мета роботи. Дослідити температурну залежність питомого опору металів і сплавів провідникових матеріалів.

7.1. Експериментальна установка

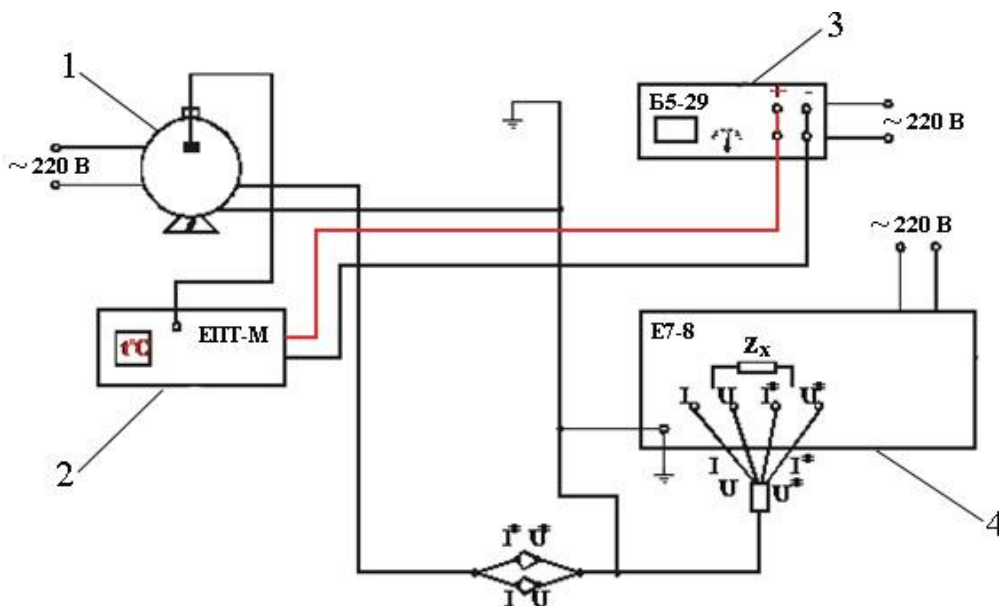


Рис. 7.1. Принципова схема установки для вимірювання питомого опору провідникових матеріалів:

1 – термостат з випробовуваним елементом; 2 – електротермометр; 3 – блок живлення електронного термометра; 4 – вимірювач R, L, C

7.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

Визначити залежність питомого опору ρ провідників від температури. Спіралі з виданими викладачем провідниками відомого поперечного перерізу S і довжини l помістити в термошафу й виміряти їхній опір R через кожні 5 °С при нагріванні до 70 °С:

- а) визначити величину питомого опору при кожному значенні температури за відомою формулою:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (7.1)$$

де S – площа поперечного перерізу зразка: для міді – $7,85 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, ніхром – $7,06 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, константану – $7,06 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$.

l – довжина зразка: для міді – 19 м, ніхром – 1,9 м, константану – 1,7 м;

- б) результати вимірювань і розрахунків занести до табл. 7.1;

Таблиця 7.1

Провідник	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$

- в) визначити температурний коефіцієнт питомого опору $TK\rho$ за формулою (7.2) та зробити висновок щодо стану матеріалу після температури плавлення:

$$TK\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 (T_2 - T_1)} \quad (7.2)$$

де ρ_1, ρ_2 – попереднє та наступне значення питомого опору;

T_1, T_2 – попереднє та наступне значення відповідної температури;

За отриманими в табл. 7.1 розрахунками температурного коефіцієнта питомого опору $TK\rho$ порівняти характер зміни з теоретичною кривою $\rho = f(T)$ і визначити, збільшується чи зменшується питомий опір після температури плавлення;

- г) побудувати графіки залежності $\rho = f(T)$ для двох провідникових матеріалів на одній координатній площині;
д) проаналізувати результати й зробити висновки;
е) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам, користуючись дод. 4–5.

Контрольні запитання

1. Пояснити будову металевих провідників і їх провідність з позицій класичної електронної теорії.
2. Пояснити провідність металевих провідників з позицій зонної теорії.
3. Назвати дві основні групи дефектів кристалічної будови, які впливають на електропровідність провідників.
4. Дати характеристику електропровідності сплавів типу: твердий розчин; механічна суміш; інтерметалева з'єднання.
5. Дати визначення питомого об'ємного опору ρ , питомої електропровідності γ та температурного коефіцієнта питомого опору $TK\rho$?
6. Назвати матеріали високої провідності.
7. Назвати основні властивості надпровідників.
8. Назвати провідникові матеріали високого опору.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНЕТИКІВ У ЗМІННОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Мета роботи. Ознайомитися з феромагнітними матеріалами й експериментально дослідити їх властивості в змінних магнітних полях залежно від частоти й напруженості.

8.1. Експериментальна установка

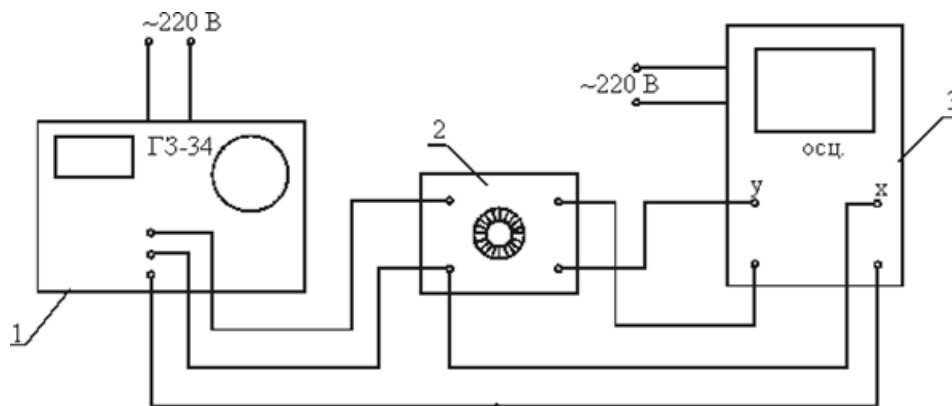


Рис. 8.1. Зовнішній вигляд установки для дослідження феромагнетиків осцилографічним методом:

1 – генератор синусоїдних сигналів; 2 – досліджуваний феромагнетик; 3 – осцилограф

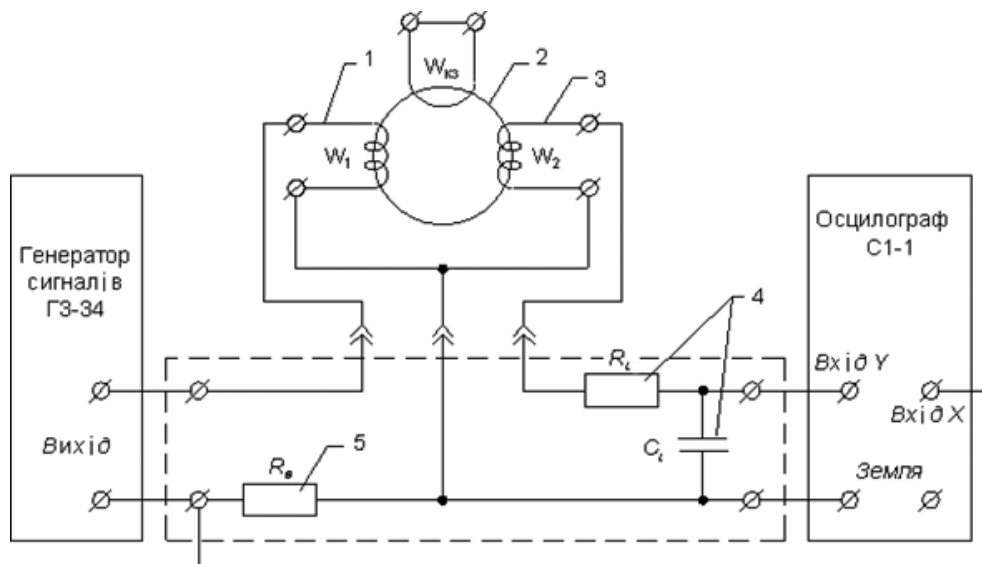


Рис. 8.2. Принципова схема установки для дослідження феромагнетиків осцилографічним методом:

1 – первинна обмотка (W_1) ; 2 – досліджуваний зразок; 3 – вторинна обмотка (W_2); 4 – інтегруюче коло ($R_t = 2 \cdot 10^5$ Ом, $C_t = 1 \cdot 10^6$ Ф); 5 – зразковий опір ($R_0 = 5,1$ Ом)

8.2. Зміст завдання та порядок виконання роботи

Дослідити залежність магнітної індукції та магнітної проникності феромагнетиків від напруженості магнітного поля:

а) розрахувати значення напруженості магнітного поля H та магнітної індукції B , а також магнітну проникність μ за формулами:

$$\left. \begin{aligned} H &= hx; \\ B &= by; \\ \mu &= B/(\mu_0 H), \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

де x та y – координати точки технічного насичення петлі гістерезису;

h та b – масштаби відповідно горизонтальної та вертикальної осей осцилографа:

$$h = 15,45 \frac{\text{А}}{\text{м} \cdot \text{мм}}, \quad b = 4,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Тл}}{\text{мм}};$$

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

б) результати вимірювань і розрахунків занести до таблиці 8.1;

Таблиця 8.1

Матеріал	f , Гц	x , мм	y , мм	H , А/м	B , Тл	μ
Магнітом'який феромагнетик	200					
	300					
	...					
	1 000					

- в) за даними таблиці на одній координатній площині побудувати залежності $B = f(H)$ і $\mu = f(H)$;
 г) проаналізувати отримані результати й зробити висновок стосовно залежності $B = f(H)$ і $\mu = f(H)$;
 д) за планом дати характеристику дослідженим матеріалам, користуючись дод. 6–7.

Контрольні запитання

1. Назвати основні властивості діамагнетиків, парамагнетиків і феромагнетиків.
2. Пояснити будову й властивості феромагнетиків.
3. Пояснити залежність магнітної проникності та індукції феромагнетиків від напруженості магнітного поля.
4. Нарисувати й пояснити граничну петлю магнітного гістерезису.
5. Що розуміють під залишковою індукцією та індукцією насичення?
6. Навести характеристики магнітом'яких і магнітотвердих матеріалів.
7. Пояснити поняття магнітних втрат, їх видів, еквівалентної схеми заміщення й векторної діаграми магнітного матеріалу з втратами.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Основна література:

1. Колесов С. М. Електроматеріалознавство: підручник / С. М. Колесов, І. С. Колесов. – Київ : Дельта, 2008. – 512 с.
2. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посібник / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. – Львів : «Магнолія 2006», 2008. – 242 с.
3. Леонт'єв В. О. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник / В. О. Леонт'єв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 122 с.

Додаткова література:

4. Solymar L. Electrical properties of materials / L. Solymar, D. Walsh, R. R. A. Syms / Ninth edition. – Oxford: University Press, 2014. – 484 с.
5. Правила безпечної експлуатації електроустановок: НПАОП 40.1-1.01-97. – Київ : Індустрія, 2013. – 140 с.
6. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
7. Плітченко С. О. Дистанційний курс «Електротехнічні матеріали». URL: <https://lider.diit.edu.ua/enrol/index.php?id=392>.
8. Науково-технічна бібліотека УДУНТ. URL: <http://library.diit.edu.ua>.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Гранично допустимі значення показників якості трансформаторного масла, підготовленого й залитого в електроустаткування

Показник	Значення показника якості трансформаторного масла до заливання в електроустаткування	Значення показника якості трансформаторного масла після заливання в електроустаткування	Нормативно-технічний документ
1	2	3	4
1. Пробивна напруга, не менше ніж, для трансформаторів, апаратів і вводів напругою:			ДСТУ 6581-75
до 15 кВ	30	25	
від 15 до 35 кВ	35	30	
від 60 до 150 кВ	60	55	
від 220 кВ до 500 кВ	60	55	
750 кВ	70	65	
1 150 кВ	70	70	
2. Масовий вологовміст, % (г-т), не більше ніж, для:			ДСТУ 7822-75
— трансформаторів з плівковим або азотним захистом	0,001(10)	0,001(10)	
— трансформаторів без спеціальних схем захисту	0,0020(20)	0,0025(25)	

1	2	3	4
3. Тангенс кута діелектричних втрат, не більше ніж, при 90 °С, %:			
до 500 кВ вмика.	2,2	2,6	ДСТУ 7822-75
750 кВ	0,5	0,7	
1 150 кВ	0,5	0,5	
4. Кислотне число, не більше ніж, мгКОН/1 г масла:			
до 500 кВ вмика.	0,02	0,02	ДСТУ 5985-79
більше 500 кВ	0,01	0,01	
5. Вміст розчинних кислот і лугів	Відсутність	Відсутність	ДСТУ 6307-75
6. Вміст механічних домішок, маси, не більше ніж, г/т:			
до 750 кВ вмика.	Відсутність	Відсутність	ДСТУ 6370-83
силові трансформатори 1 150 кВ	0,0005(5)	0,0005(5)	
7. Температура спалаху в закритому тиглі, не нижче ніж, °С	135	135	ДСТУ 6356-75
8. Газовміст (для герметичного електро-устаткування), не більше ніж, % об'єму	0,1	0,2	Інструкція заводу-виробника

Примітки: 1. Проба трансформаторного масла для визначення значення $tg\delta$ додатковій обробці не піддається. 2. Перевірку газовмісту маслдопускається виконувати абсорбціометрами, встановленими в установках дегазації або в лабораторії хроматографічним методом.

Вимоги чинних ДСТУ і ТУ до якості вітчизняних трансформаторних масел

Показник	Марка і значення показника якості масла									Нормативно-технічний документ
	ГК ТУ38 101. 1025-85	ГБ ТУ38 401. 657-85	Т-1500 982-80	Т-750 ДСТУ 982-80	ТКП ТУ38101. 890-81	ТАП ТУ38 101. 281-80	ТСП ДСТУ 10121-76	АТК ТУ38401. 608-86	МВ ТУ38 101. 857-80	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
В'язкість кінематична, мм ² /с(сСт)										
при 50 °С, не більше ніж	9	9	8	8	9	9	9	5	2	ДСТУ 33-82
при –30 °С, не більше ніж	1 200	1 500	1 600	1 600	1 500	–	1 300	800 (при 150 °С)	–	
								–40 °С (при –50 °С)		
Кислотне число, не більше ніж, мгКОН/1 г масла	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	ДСТУ 5985-79
Температура спалаху в закритому тиглі, не нижче ніж, °С	135	135	135	135	135	135	150	135	94 (у відкритому тиглі)	ДСТУ 6356-75
Вміст водорозчинних кислот і лугів	–	–	Відсутність	Відсутність	Відсутність	–	Відсутність	–	Відсутність	ДСТУ 6307-75

Продовження дод. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вміст механічних домішок	Відсутність	Відсутність	Відсутність	Відсутність	Відсутність	Відсутність	Відсутність	Відсутність	Відсутність	ДСТУ 6370-75
Температура застигання, не вище ніж, °С	-45	-45	-45	-55	-45	-50	-45	-60	-70	ДСТУ 20287-74
Зольність, не більше ніж, %	—	—	—	—	—	0,005	0,005	—	—	ДСТУ 1461-75
Натрова проба, оптична густина, не більше ніж	—	—	0,4	0,4	0,4	—	0,4	—	—	ДСТУ 19296-73
Прозорість при 5 °С	—	—	Витримує	Витримує	—	—	Прозоро	—	—	ДСТУ 982-80
Випробування корозійної дії на пластинки з міді марки М1 або М2 за ДСТУ 859-78	Витримує	Витримує	—	Витримує	Витримує	—	—	Витримує	Витримує	ДСТУ 2917-76
Тангенс кута діелектричних втрат при 90 °С, не більше ніж, град	0,5	0,5	0,5	0,5	2,2	0,5	1,7	0,5	0,5	ДСТУ 6581-75
Стабільність проти окислення за ДСТУ 981-75:										
маса летючих кислот, не більше ніж, мгКОН/1 г	0,04	0,05	0,05	0,005	0,003	0,008	0,005	0,04	—	ДСТУ 981-75

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
масова частка осаду, не більше ніж, %	0,015	0,010	Відсу- тність	Відсут- ність	0,01	0,008	Відсу- тність	Відсу- тність	Відсу- тність	ДСТУ 981-75
Кислотне число окисне- ного масла, не більше ніж, мгКОН/1 г масла	0,10	0,10	0,2	0,2	0,10	0,05	0,1	0,1	0,1	
Умови процесу оки- снення	155 °С, 14 год, 50 мл/хв, O ₂	150 °С, 16 год, 50 мл/хв, O ₂	130 °С, 30 год, 50 мл/хв, O ₂	130 °С, 30 год, 50 мл/хв, O ₂	120 °С, 14 год, 200 мл/хв, O ₂	120 °С, 14 год, 200 мл/хв, O ₂	120 °С, 14 год, 200 мл/хв, O ₂	155 °С, 14 год, 50 мл/хв, O ₂	130 °С, 30 год, 50 мл/хв, O ₂	
Стабільність проти окиснення, метод МЕК, індукційний період, не більше ніж, год	150	120	—	—	—	—	—	15	—	Публіка- ція МЕК № 4/4
Густина при 20 °С, небі- льше ніж, кг/м ³	895	895	885	895	895	—	—	895	—	ДСТУ 3900-85
Колір на калориметрі ЦНТ, не більше ніж, одиниці ЦНТ	1	1	1,5	1	—	—	1	1	—	ДСТУ 19121-73
Вміст сірки, більше ніж, %	—	—	—	—	—	—	0,6	—	—	
Вміст іонолу, не менше ніж, %	0,25–0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	

Домішкові рівні в германії та кремнії (визначені термічним методом)

Легувальна домішка	Акцептор або донор	Енергія активації дірок (ΔW_a) і електронів (ΔW_d), eV	
		Германій	Кремній
B	A	0,0104	0,045
Al	A	0,0102	0,057
Ga	A	0,0108	0,065
In	A	0,0112	0,160
Tl	A	—	0,025
P	D	0,0120	0,044
As	D	0,0127	0,049
Sb	D	0,0096	0,039
Bi	D	—	0,069
Li	D	0,0093	0,033
Zn	A	0,0300; 0,0900	0,092; 0,300
Cd	A	0,0500; 0,1600	—
Mn	A	0,1600	—
	D або A	0,3700	—
Ni	A	0,2200	—
	D або A	0,3000	—
Co	A	0,2500	—
	D або A	0,3100	—
Fe	D	0,3500	—
	D або A	0,2700	—
Cu	A	0,0400; 0,3300	—
	D або A	0,2600	—
Pt	A	0,0400; 0,2500	—
	D або A	0,2000	—
Au	D	0,0500	—
	A	0,1500; 0,0400	0,390
	D або A	0,2000	0,300

Основні фізичні властивості чистих елементарних металів (при 20 °С)

Метал	Густина d , мг·м ⁻³	Темпера- тура плав- лення, °С	Температурний ко- ефіцієнт лінійного розширення $TKLP \cdot 10^6$, К ⁻¹	Питомий електричний опір ρ , мкОм·м	Температурний коефіцієнт пито- мого опору, $TK\rho \cdot 10^3$, К ⁻¹	Робота виходу електрона A , еВ	Абсол. питома термо-е. р. с., мкВ/К ⁻¹	Температура переходу в надпровід- никовий стан $T_{кр}$, К	Маг- ніт-ні влас- тивості
Алюміній	2,70	660	21,0	0,0265	4,10	4,25	-1,3	1,196	П
Ванадій	6,11	1 900	8,3	0,3480	3,60	4,12	+0,9	5,130	П
Вісмут	9,80	271	13,3	1,1600	4,20	4,12	-75,0	—	Д
Вольфрам	19,30	3 400	4,4	0,0550	5,00	4,12	+2,0	0,010	П
Залізо	7,87	1 540	10,7	0,0970	6,25	4,12	+16,6	—	Ф769
Золото	19,30	1 063	14,0	0,0255	3,95	4,12	+1,5	—	Д
Кадмій	8,65	321	29,0	0,0740	4,20	4,12	+2,1	0,520	Д
Кобальт	8,85	1 500	13,5	0,0640	6,00	4,12	-20,1	—	Ф1120
Мідь	8,92	1 083	16,6	0,0168	4,33	4,12	+1,8	—	Д
Молібден	10,20	2 620	5,3	0,0500	4,33	4,12	+6,3	0,930	П
Натрій	0,97	98	72,0	0,0420	5,50	4,12	-8,7	—	П
Нікель	8,96	1 453	13,2	0,0680	6,70	4,12	-19,3	—	Ф358
Олово	7,29	232	23,0	0,1130	4,50	4,12	-1,1	3,720	П
Паладій	12,02	1 550	9,5	0,1080	3,60	4,12	-10,3	—	П
Платина	21,45	1 770	9,5	0,0981	3,90	4,12	-5,1	—	П

Закінчення дод. 4

Метал	Густина d , мг·м ⁻³	Темпера- тура плав- лення, °С	Температурний ко- ефіцієнт лінійного розширення $TKLP \cdot 10^6$, К ⁻¹	Питомий електричний опір ρ , мкОм·м	Температурний коефіцієнт пито- мого опору, $TK\rho \cdot 10^3$, К ⁻¹	Робота виходу електрона A , еВ	Абсол. питома термо-е. р. с., мкВ/К ⁻¹	Температура переходу в надпровід- никовий стан $T_{кр}$, К	Маг- ніт-ні влас- тивості
Ртуть	13,50	-39	182,0	0,9580	0,90	4,12	+8,1	4,153	Д
Свинець	11,34	327	28,3	0,1900	4,20	4,12	-1,2	7,200	Д
Срібло	10,49	961	18,6	0,0150	4,10	4,12	+1,5	—	Д
Титан	4,52	1 670	8,1	0,4700	5,50	4,12	+4,5	0,390	П
Хром	7,19	1 900	6,2	0,1300	2,40	4,12	+18,0	—	А38
Цинк	7,14	419	30,0	0,0592	4,10	4,12	+1,5	0,880	Д

Примітки: 1. Щоб отримати величину питомої термо-е. р. с. щодо міді, потрібно від значення абсолютної питомої термо-е. р. с. металу, що наводиться в таблиці, алгебраїчно (з урахуванням знака) відняти величину +1,8 мкВ·К⁻¹. 2. **П** – парамагнітний, **Д** – діамагнітний, **Ф** – феромагнітний, **А** – антиферомагнітний. Числа після літер «А» і «Ф» позначають температуру (°С) магнітного розупорядкування.

Основні експлуатаційно-технічні характеристики сплавів високого опору

Сплав		Склад сплаву	Густина d , мг·м ⁻³	Питомий опір ρ , мкОм·м	Температурний коефіцієнт пи- томого опору, $TK\rho \cdot 10^3$, К ⁻¹	Термо-е. р. с. щодо міді, мкВ/К ⁻¹	Гранично допус- тима робоча тем- пература, °С
Манганін		Cu-86; Mn-12; Ni-2	8,4	0,42–0,48	5–30	1–2	100–200
Константан		Cu-60; Ni-40	8,9	0,48–0,52	–(5–20)	40–50	450–500
Хромо- нікелеві сплави (ніхроми)	X15Н60	Mn-1,5; Ni-58; Cr-16*	8,2–8,3	1,0–1,2	100–200	–	1 000
	X20Н80	Mn-1,5; Ni-76; Cr-21	7,1–7,5	1,0–1,1	100–200	–	1 100
Залізох- ромові сплави (фехраль і хромаль)	X13Ю34	Mn-0,7; Ni-0,6; Cr-13;	7,1–7,5	1,20–1,35	100–200	–	900
		Al-4,58*					
	X23Ю4	Mn-0,7; Ni-0,6; Cr-23;	6,69–7,30	1,3–1,5	65	–	1 200
		Al-5*					

Примітка. * Решта – залізо Fe

Властивості деяких магнітом'яких матеріалів

Матеріал	Хімічний склад матеріалу (у вагових відсотках)	Початкова проникність μ_n	Максимальна проникність μ_m	Коерцитивна сила H_c , А·м	Магнітне насичення $B_{\max}$, Тл	Питомий опір ρ , мкОм·м
Карбонільне залізо	99,99Fe	3 300	21 000	6,4	—	—
Технічно чисте залізо	99,99Fe	250	7 000	64	2,15	0,10
Листова електротехнічна сталь	96Fe; 45Ni	450	8 000	50	1,70	0,60
Пермалой 45	54Fe; 45Ni	2 500	25 000	30	1,00	0,50
Пермалой 78	21Fe; 78Ni	18 000	200 000	5	0,65	0,56
Суперпермалой	15Fe; 5Mo; 79Ni	100 000	900 000	0,3	0,80	0,60
Пермедюр	49Fe; 2V; 49Co	800	4500	2,0	2,45	0,26
Альсифер	85Fe; 5Al; 9Si	35 000	120 000	1,8	1,00	0,80
Ферити	—	10–6 000	40–1 000	12–3 600	—	0,1–10 ⁷
Пермалосвий магнітодіелектрик	—	125	130	—	—	10 ⁶

Властивості деяких магнітотвердих матеріалів

Матеріал	Хімічний склад матеріалу (у вагових відсотках)	Коерцитивна сила H_c , А·м	Залишкова ін- дукція B_c , Тл	Максимальна питома магнітна енергія $W_{\max}$, кДж/м ³
Вуглецева сталь	1С; 0,5Мп; решта Fe	5,1	0,9	0,8
Вольфрамова сталь	6W; 0,7С; 0,3Мп; решта Fe	6,5	1,0	1,2
Хромова сталь	6,0Cr; 1,1С; 0,4Мп; решта Fe	7,4	0,95	1,2
Кобальтова сталь	15Co; 5–9 Cr; 1W; 1С; 0–1,5Мп; решта Fe	18	0,82	2,5
Альні	25Ni; 12Al; решта Fe	40	0,50	3,6
Альнісі	34Ni; 14Al; 10Si; решта Fe	80	0,42	4
Альніко	12Al; 28Ni; 5Co; решта Fe	65,5	0,57	6–14
Магніко	13,5Ni; 8Al; 24Co; 3С; решта Fe	58	1,33	16–26
Вікалой	52Co; 13V; 35Fe; решта Fe	45	1,0	12
Платинові сплави	77,8Pt; 22,2Fe; 76,7Pt	157	0,6	12
	23,3Co	270	0,5	15

Вибір кількості ізоляторів уздовж гірлянди

Тип ізолятора	Основні розміри ізолятора, мм		Кількість ізоляторів при номінальній напрузі (за відсутності підвищених забруднень), кВ							
	<i>Д</i>	<i>Н</i>	10	20	35	110	150	220	330	500
ПФ-70-В (ПФ-6-В)	270	125	1	3	3	7	9–10	13–14	18–20	–
ПС-70-А (ПС-6-А)	225	130	1	3	3	8	10	14	21	29
ПСГ-70-А (ПСГ-6-А)	270	130	1	3	3	8	10	14	21	29
ПС-120-А (ПС-12-А)	260	138	–	–	3	7	9	13	19	26
ПСГ-120-А (ПСГ-12-А)	300	137	–	–	3	7	9	13	19	26

Навчально-методичне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

Редактор А. В. Безверхня
Комп'ютерна верстка В. В. Бердо

Формат 60х84 ¹/₁₆. Ум. друк. арк. 2,50. Обл.-вид. арк. 2,52.
Зам. № 152

Український державний університет науки і технологій
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010