

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ: ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Електротехнічні матеріали: Лабораторний практикум. [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; уклад.: В.М. Кириленко, К.В. Кириленко, М.О. Будько. – Електронні текстові дані (1 файл 9,727 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 74 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 9 від 17.05.2022 р.)*

Електронне мережеве навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ: ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Кириленко Катерина Всеволодівна, канд. техн. наук., доц.
Кириленко Всеволод Михайлович, канд. техн. наук, доц.
Будько Марина Олександрівна, канд. техн. наук, доц.*

Відповідальний редактор *Будько В.І., докт. техн. наук., доц.*

Рецензент *Пушкар М.В., канд. техн. наук, доц.*

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

Вступ	5
Загальні методичні вказівки з виконання лабораторних робіт	7
Інструкція з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт з дисципліни "Електротехнічні матеріали"	10
Лабораторна робота №1. Дослідження електропровідності твердих дієлектриків	11
Лабораторна робота №2. Дослідження поляризації твердих дієлектриків	16
Лабораторна робота №3. Дослідження дієлектричних втрат в твердих дієлектриках	21
Лабораторна робота №4. Визначення електричної міцності дієлектриків	25
Лабораторна робота №5. Дослідження електропровідності напівпровідників	30
Лабораторна робота №6. Дослідження властивостей провідникових матеріалів	34
Лабораторна робота №7. Дослідження властивостей феромагнітних матеріалів	38
Додаток 1. Основні теоретичні відомості	43
Основні властивості дієлектричних матеріалів	43
Напівпровідникові матеріали	56
Електропровідність провідникових матеріалів	59
Властивості магнетиків	62
Додаток 2. Варіанти виконання лабораторних робіт	66
Додаток 3. Довідкові дані	73
Література	74

ВСТУП

Вивчення дисципліни "Електротехнічні матеріали" сприяє розумінню процесів, що відбуваються в електротехнічних матеріалах і визначають можливості використання матеріалів в електротехніці і електроенергетиці та ефективність функціонування і експлуатаційну надійність електрообладнання, засвоєнню критеріїв вибору електротехнічних матеріалів в залежності від принципу роботи, конструкції і умов використання обладнання і, відповідно, формуванню спеціаліста, здатного виконувати роботу дослідника, конструктора, технолога та експлуатаційника електротехнічного, електромеханічного, електроенергетичного, електрофізичного та випробувального обладнання для виробництва, перетворення, транспортування, розподілу та використання електричної енергії, забезпечуючи в процесі проектування і виробництва високу якість цього обладнання, ефективне використання, кваліфіковане технічне обслуговування та надійність в експлуатації.

Дисципліна "Електротехнічні матеріали" відноситься до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки, обов'язкових для бакалавратів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Вона забезпечує сприйняття таких подальших дисциплін, як "Техніка високих напруг", "Електричні машини", "Електрична частина станцій та підстанцій", "Електричні мережі та системи", "Релейний захист і автоматизація енергосистем", "Промислова електроніка" та інших, перелік яких залежить від спеціальності й особливостей навчальних планів.

Згідно до робочої навчальної програми при вивченні дисципліни "Електротехнічні матеріали" студенти мають виконати цикл лабораторних робіт загальним обсягом 18 годин.

Метою циклу лабораторних робіт є забезпечення виконання в майбутньому випускниками таких **типових задач діяльності**:

- участь у розробці технічного завдання, проектної, конструкторської та робочої документації на нові електротехнічні вироби, електротехнічне, електроенергетичне, електромеханічне, електротехнологічне, електрофізичне та випробувальне устаткування;
- технічне обслуговування електротехнічного, електромеханічного, електроенергетичного, електротехнологічного, електрофізичного та випробувального обладнання: контроль технічного стану, випробування, організація і проведення ремонтних робіт.

При виконанні лабораторних робіт з дисципліни "Електротехнічні матеріали" студент повинен **закріпити знання**:

- класифікації електротехнічних матеріалів за призначенням, складом, властивостями і особливостями використання;
- основних відомостей про зв'язок між хімічним складом, структурою й будовою електротехнічних матеріалів з їхніми властивостями;
- визначень основних властивостей, параметрів та характеристик електротехнічних матеріалів;
- дії експлуатаційних факторів на властивості, параметри та характеристики електротехнічних матеріалів;
- залежностей властивостей, параметрів та характеристик електротехнічних матеріалів від температури, вологості та інших зовнішніх факторів;
- властивостей та областей використання основних діелектричних, провідникових, напівпровідникових та магнітних матеріалів;

– критеріїв раціонального техніко-економічного вибору електротехнічних матеріалів при конструюванні і вибору ефективних режимів експлуатації електротехнічного, електромеханічного, електроенергетичного, електротехнологічного, електрофізичного та випробувального устаткування;

– методів та критеріїв оцінювання за електрофізичними, фізико-механічними, теплофізичними та фізико-хімічними характеристиками придатності та взаємозамінності електротехнічних матеріалів для використання в електротехніці, електроенергетиці та електротехнологіях;

– основних методів випробувань електротехнічних матеріалів та вимірювань їх основних електричних і магнітних характеристик;

та здобути вміння:

– вибрати оптимальні методи, необхідні прилади та обладнання для експериментального визначення електрофізичних параметрів та характеристик електротехнічних матеріалів;

– експериментально визначати електрофізичні параметри та характеристики електротехнічних матеріалів і розраховувати значення параметрів при непрямих методах визначення;

– контролювати відповідність електрофізичних параметрів електротехнічних матеріалів нормованим значенням;

– визначати придатність електротехнічних матеріалів для практичних використання за результатами вимірювань їхніх параметрів та характеристик;

– знаходити ймовірну причину відхилень параметрів та характеристик електротехнічних матеріалів від нормованих значень і визначати можливість їх відновлення до нормованих значень;

– виконувати статистичну обробку й аналіз експериментальних результатів;

– формулювати висновки з отриманих результатів досліджень;

– визначати можливості використання досліджених матеріалів і отриманих в процесі виконання роботи результатів.

При формулюванні вимог до лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали» укладачі враховували необхідність забезпечити в подальшому, при вивченні професійних дисциплін, здатність студентів виконувати такі дії:

– використовуючи набуті знання, матеріальні носії інформації тощо скласти структурну схему будови електротехнічного виробу, визначити основні матеріали та комплектуючі, необхідні для його створення;

– вибрати діелектричні, провідникові, напівпровідникові і магнітні матеріали з врахуванням технічних характеристик, вимог і умов експлуатації при конструюванні, монтажі, експлуатації і ремонті електротехнічного та електроенергетичного устаткування;

– обґрунтовувати вибір електротехнічних матеріалів за критеріями витрат матеріалів та енергоресурсів при конструюванні, монтажі, експлуатації і ремонті електротехнічного та електроенергетичного устаткування;

– використовуючи типові методики, розраховувати електрофізичні, теплофізичні, механічні та надійнісні характеристики простих електротехнічних виробів.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Мета виконання даного циклу лабораторних робіт – закріплення теоретичних знань з електротехнічного матеріалознавства; формування вміння та навичок організації і проведення вимірювань параметрів і характеристик та випробувань електротехнічних матеріалів, реєстрації, оцінки і аналізу одержаних результатів.

Задачі циклу: практичне ознайомлення з методами визначення параметрів і характеристик, основними властивостями і можливостями застосування електротехнічних матеріалів.

Процес виконання лабораторної роботи включає самостійну підготовку до роботи, проведення експериментальних досліджень у відповідності з методичними вказівками, обробку результатів, формулювання висновків, оформлення звіту та захист виконаної лабораторної роботи.

При підготовці до роботи студенти зобов'язані заздалегідь ознайомитися з даними методичними вказівками, вивчити необхідні теоретичні відомості, наведені в додатках, виконати в письмовому вигляді завдання на самостійну роботу та підготувати відповіді на контрольні запитання. В результаті підготовки студенти повинні зрозуміти мету роботи, її задачі, усвідомити фізичну суть явищ, що досліджуються, ознайомитися з методиками роботи з лабораторним обладнанням і засобами вимірювання, освоїти методи розрахунків параметрів електротехнічних матеріалів при непрямих вимірюваннях та отримати уявлення про характер очікуваних результатів. Особливу увагу слід звернути на знання термінології, без якого неможливе чітке засвоєння навчального матеріалу. Якість теоретичної підготовки та виконання самостійного завдання контролює викладач на початку заняття усно або з використанням комп'ютерних тестів.

Студенти, підготовка яких не відповідає викладеним вимогам, до виконання лабораторної роботи не допускаються і у відповідності з рейтинговою системою оцінювання їм нараховуються штрафні бали.

Такий підхід диктується тією обставиною, що лабораторні роботи виконуються до викладання відповідного матеріалу на лекціях.

Під час лабораторної роботи студенти, при необхідності, повинні підготувати устаткування до роботи при відключеному живленні. Після перевірки рівня підготовки студентів, готовності устаткування і правильності з'єднань викладач дає дозвіл на вмикання устаткування і виконання роботи. В залежності від спеціальності, згідно з відповідною робочою навчальною програмою, завдання з лабораторних досліджень, що містяться в основній частині методичних вказівок, за вибором викладача можуть бути замінені на інші, наведені у додатку 2. Викладач постійно контролює хід роботи і правильність отриманих результатів.

Рукописний звіт про роботу повинен містити назву роботи, мету досліджень, завдання, короткі теоретичні відомості, основні визначення, принципову чи структурну схему установки вимірювання; алгоритм та формули для чисельних розрахунків; перелік досліджень з вказівкою необхідних відомостей про матеріали, що досліджуються, умови досліджень, використане обладнання та прилади, конфігурацію електродів, параметри схеми і т.п.; результати досліджень у вигляді таблиць та гра-

фіків; аналіз результатів; загальні висновки по роботі з аналізом і поясненнями отриманих результатів, а також рекомендаціями відносно практичного використання досліджених матеріалів і отриманих результатів, короткий конспект з питань, які входять до завдання на самостійну підготовку.

Текст звіту слід оформляти у вигляді рукописної роботи, написаної власноручно, на листах формату А4, дотримуючись вимог до оформлення звіту з науково-дослідної роботи та користуючись рекомендаціями викладача.

Рисунки, таблиці, графіки, схеми слід виконувати у відповідності з вимогами до оформлення звітів з науково-дослідних робіт і ЄСКД, а умовні позначення вибирати у відповідності з державними стандартами та нормативною документацією. Графіки краще викреслювати на міліметровці, звертаючи увагу на раціональний вибір масштабу з метою максимального використання поля графіка, точність і чіткість нанесення експериментальних точок та правильність апроксимації експериментальних даних плавною кривою найнижчого порядку, домагаючись рівномірного відхилення експериментальних точок від апроксимуючої кривої на всьому її протязі.

При обробці експериментальних даних потрібно використовувати міжнародну систему одиниць і контролювати правильність результатів за порядком величин. Студенти повинні вміти пояснити порядок розрахунків та обґрунтувати правильність результатів при захисті лабораторної роботи.

Використання обчислювальної техніки при оформленні звіту допускається тільки за узгодженням з викладачем.

Зміст висновків повинен бути узгоджений з метою роботи і завданнями на проведення окремих досліджень. У висновках необхідно описати об'єкт, методи, устаткування та прилади, які були використані в роботі, отримані результати, охарактеризувати можливі похибки експериментальних даних, сформулювати фізичну суть закономірностей, що спостерігаються, описати й пояснити на основі теоретичних відомостей основні закономірності, виявлені при проведенні досліджень електротехнічних матеріалів, дати рекомендації з практичного використання досліджених матеріалів і отриманих результатів в інженерній роботі по спеціальності.

Результати виконання завдань на самостійну роботу наводяться у вигляді коротких реферативних матеріалів, оформлених у відповідності до вимог з оформлення тексту звіту з лабораторної роботи.

Відповіді на контрольні питання, поставлені у методичних вказівках до кожної лабораторної роботи, бажано приводити також у письмовому вигляді. Це полегшить і захист студентом лабораторної роботи.

При захисті лабораторної роботи студенти повинні знати визначення основних понять, явищ, фізичних величин та технічних параметрів матеріалів, які досліджувалися у даній роботі; фізичні основи відповідних явищ та закономірності впливу зовнішніх факторів на перебіг цих явищ; перелік найважливіших технічних параметрів, характеристик даного класу матеріалів та порядок величин значень параметрів; основні фактори, які впливають на характеристики матеріалів, а також закономірності цих впливів; можливості практичного використання досліджених матеріалів та ефектів.

При бальному оцінюванні роботи студента з виконання лабораторних робіт відповідно до вимог системи рейтингового оцінювання враховуються своєчасність

виконання, оформлення і захисту лабораторної роботи, ступінь підготовки до її виконання, робота студента в процесі виконання лабораторної роботи, повнота і якість оформлення звіту з лабораторної роботи, правильність і обґрунтованість висновків, виконання завдань на самостійну роботу, підготовка відповідей на контрольні питання. Якщо на момент чергової атестації студент не відпрацював дві і більше лабораторних робіт, він не атестується з дисципліни, тобто в атестаційній відомості йому проставляється відмітка «не атестований». При наявності двох і більше не захищених лабораторних робіт, за виключенням роботи, термін захисту якої ще не збіг, студенту в атестаційній відомості проставляється відмітка «не зараховано».

Відпрацьовування лабораторних робіт, пропущених студентами з будь-якої причини, проводиться в лабораторії електротехнічних матеріалів кафедри відновлюваних джерел енергії з дозволу викладача в години, що відведені за розкладом на виконання лабораторних робіт будь-якою іншою групою. Відпрацьовування лабораторних робіт в години, відведені для виконання лабораторних робіт занять в групі, в якій навчається студент, не допускається.

ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. **Загальний інструктаж з техніки безпеки** студенти повинні пройти на першому занятті з реєстрацією у контрольному журналі чи листі проведення інструктажу з техніки безпеки. Інструктаж проводить викладач.
2. **Виконання лабораторних досліджень, особливо при високій напрузі**, вимагає постійної уваги і суворого виконання таких вимог з техніки безпеки:
3. **Категорично забороняється** виконувати не забезпечені апаратурно перемикавання в схемі, замінювати зразки чи поправляти електроди після подачі напруги. Для заміни зразків матеріалів чи електродів необхідно зняти напругу.
4. Лабораторна установка повинна знаходитися **під напругою лише протягом часу, необхідного для проведення випробувань чи вимірювань**.
5. **Напруга повинна бути негайно знята у випадку виникнення сумніву в правильності проведення досліджу.**
6. **У випадку появи ознак пошкодження** обладнання (розряди, дим, запах і т.п.) чи припинення подачі електроенергії потрібно **негайно вимкнути устаткування, рубильник** на місцевому розподільному щиті, доповісти викладачу та залишатися на робочому місці, очікуючи на його розпорядження
7. **Перед допуском** до високовольтної лабораторної роботи викладачем проводиться короткий **бригадний інструктаж з техніки безпеки** і перевіряється готовність студентів бригади до виконання роботи.
8. **Забороняється працювати з високою напругою одному студентові.**
9. При обслуговуванні високовольтного електроустаткування **повинен бути виключений дотик до струмопровідних частин**, які знаходяться під напругою.
10. До ввімкнення високої напруги **всі огорожі повинні бути надійно закриті**, категорично **не допускається робота з несправним або навмисне відключеним (перемкнутим) блокуванням**.
11. **Працювати на високовольтному устаткуванні слід в захисних рукавичках, стоячи на ізоляційному килимку або одягши діелектричні боти.**

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи – дослідити вплив складу і структури матеріалу та факторів навколишнього середовища на значення питомих об'ємного – ρ_v та поверхневого – ρ_s опорів твердих діелектриків.

Завдання на роботу

1. Визначити ρ_v і ρ_s сухих твердих діелектриків при кімнатній температурі (об'єкти досліджень визначає викладач) і оцінити вплив складу і макроструктури на електропровідність полярних і неполярних однорідних, волокнистих та композиційних діелектриків.
2. Визначити ρ_v і ρ_s зволжених твердих діелектриків при кімнатній температурі і оцінити вплив вологи на електропровідність полярних і неполярних однорідних, волокнистих та композиційних діелектриків, порівнявши отримані результати з результатами п. 1.
3. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань, наведених у методичних вказівках з конкретних розділів роботи.

Теоретичні відомості

Для ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Властивості діелектричних матеріалів, Електропровідність діелектриків»

Методичні вказівки

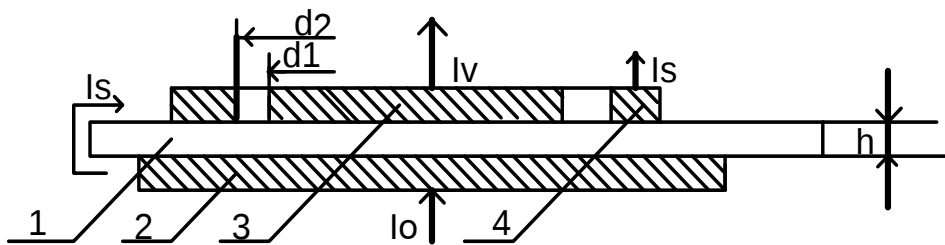
Характерною особливістю електропровідності діелектриків є суттєва відмінність впливу зовнішніх факторів, в першу чергу забруднення і зволоження діелектрика на об'ємний і поверхневий струми, особливо для водонепроникних діелектриків, в яких об'ємний струм залишається практично незмінним, а поверхневий струм може змінюватися на кілька порядків величини. Ця особливість викликала необхідність введення для характеристики здатності діелектрика проводити електричний струм двох окремих параметрів: об'ємного та поверхневого питомих опорів.

Як впливає з визначень питомих опорів, наведених у додатку 1, їх можна розрахувати, якщо відомі значення об'ємного та поверхневого наскрізних струмів. Разом з тим, при вимірюваннях необхідно звернути увагу на те, що у діелектриках окрім наскрізного струму вільних носіїв заряду, який не змінюється в часі, можуть протікати згасаючі з часом струми зміщення, зумовлені рухом зв'язаних зарядів, та абсорбційні струми, пов'язані з накопиченням вільних носіїв заряду на неоднорідностях діелектрика. Тому на практиці, якщо у технічних умовах на матеріал немає вказівок про час витримки зразка матеріалу під напругою при вимірюванні опору, то відлік значення струму слід робити на 60-й секунді після прикладення напруги.

Опис експериментальної установки

Для відокремлення в наскрізному струмі, що протікає через діелектрик, об'ємної та поверхневої складових при визначенні питомих опорів використовують трьохелект-

родний вимірювальний пристрій. Він дозволяє на одному і тому ж зразку окремо виміряти об'ємний і поверхневий струми, як схематично показано для плоского зразка на рис.1.1, а потім розрахувати питомий об'ємний та питомий поверхневий опори.



1 – діелектрик, 2, 3, 4 – заземлюючий, вимірювальний та охоронний електрода

Рис. 1.1. Трьохелектродний пристрій для вимірювання об'ємного та поверхневого опорів діелектрика.

Циліндричний вимірювальний електрод 3 пристрою має зовнішній діаметр d_1 , що дорівнює 100 мм, внутрішній діаметр кільцевого охоронного електрода 4 $d_2 = 105$ мм.

Якщо не використовувати охоронний електрод 4, то через заземлений електрод 2 при прикладенні напруги до вимірювального електрода 3 буде протікати загальний струм I_0 , який дорівнює сумі об'ємного і поверхневого струмів. В цьому випадку можна визначити тільки усереднене, ефективне значення питомого опору діелектрика ρ , використовуючи формулу для питомого об'ємного опору.

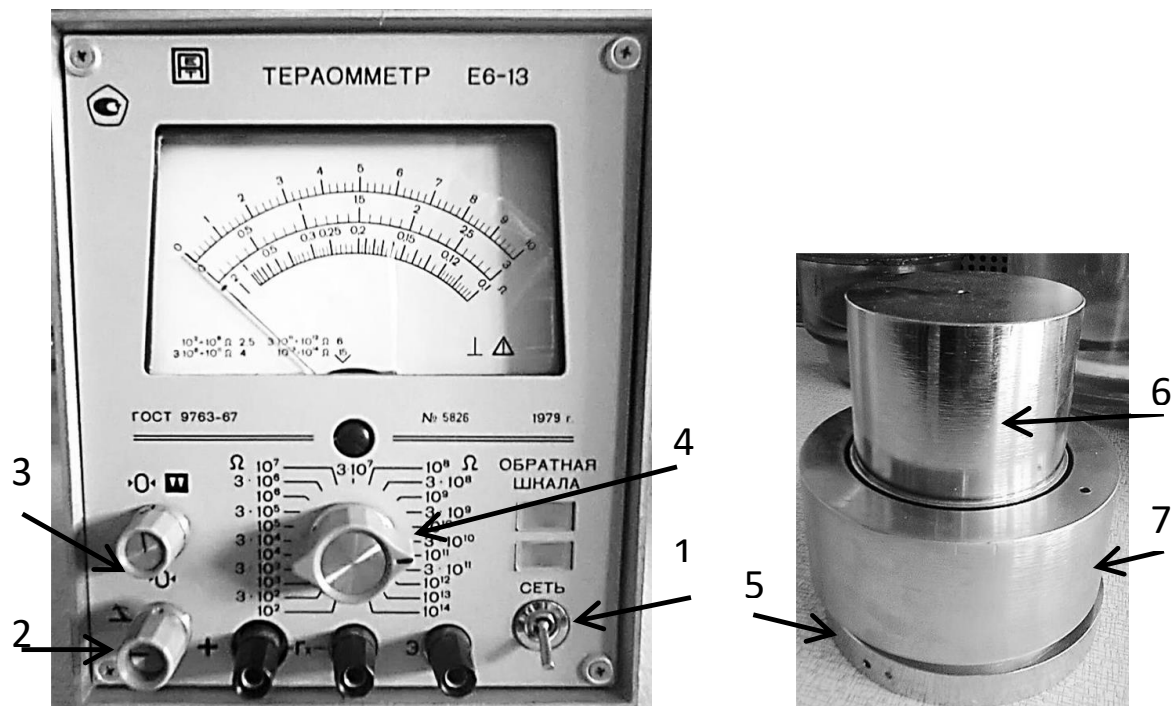
$$\rho = \frac{U}{I_0} \frac{\pi d_1^2}{4h} = R \frac{\pi d_1^2}{4h}$$

При використанні охоронного електрода 4 подача електричної вимірювальної напруги U на зразок діелектрика 1 за допомогою вимірювального електрода 3, приєднання входу вимірювального приладу до заземлюючого електрода 2 і глухе (накоротко, повз вимірювальний прилад) заземлення охоронного електрода 4 дозволяють легко виділити і виміряти струм I_V , що протікає по об'єму діелектрика. Аналогічно струм I_S по поверхні діелектрика можна виміряти, якщо підключити вимірювальний прилад до охоронного електрода 4 при глухому заземленні електрода 2.

Вимірювання опору діелектриків до 10^{12} Ом звичайно проводять тераомметром (рис. 1.2) або гальванометром з універсальним шунтом для розширення меж вимірювання струму методом безпосереднього відхилення.

Перед вимірюванням тераомметр включають тумблером 1 – «мережа», прогрівають 5 – 10 хвилин, виставляють стрілку на нуль, натиснувши кнопку 2 зліва внизу і обертаючи потенціометр 3 над нею.

При вимірюванні тераомметром заземлений електрод приєднують до правої вхідної клеми r_x приладу. Для вимірювання об'ємного опору R_V до другої вхідної клеми, позначеної «+», приєднують вимірювальний електрод, а при вимірюванні R_S – охоронний. Відповідно вільний електрод (охоронний чи вимірювальний) приєднують до екранної клеми «Е», при цьому екранний вивід і корпус приладу заземляють. Клема заземлення розташована на задній панелі приладу.



1 – тумблер для вмикаання приладу; 2 – вмикач напруги для корекції нуля; 3 – потенціометр напруги корекції нуля; 4 – перемикач меж вимірювання; 5 – заземлюючий електрод; 6 – вимірювальний електрод; 7 – охоронний електрод (5,6,7 відповідає 2,3,4 на рис. 1.1)

Рис. 1.2. Тераомметр Е6-13 та трьохелектродний пристрій для вимірювання об'ємного та поверхневого опору.

Для відліку значення опору підбирають шкалу, повертаючи перемикач 4 меж вимірювання в той бік, в якому знаходиться стрілка, до тих пір, поки стрілка не займе положення поблизу середини шкали. Якщо межа вимірювання дорівнює 10^n , то відлік значення опору проводять по верхній шкалі (кінцеве значення 10), але порядок значення опору беруть рівним $n-1$, при межі вимірювання $3 \cdot 10^n$ – відлік проводять по другій зверху шкалі (кінцеве значення 3) зі збереженням порядку.

Порядок виконання вимірювань струмів через діелектрик з допомогою гальванометра наведено в додатку 1.

Порядок виконання роботи

Вивчення впливу вологи на значення питомих опорів діелектрика.

1. За вказівкою викладача відібрати кондиціоновані при малій вологості в ексикаторі з CaCl_2 зразки діелектричних матеріалів (картон, гетинакс, гума, полівінілхлорид тощо) з різними складом і структурою.
2. При вимірюванні поверхневого та об'ємного опорів тераомметром слід включити прилад, дати йому прогрітись, перевірити наявність нуля і перейти до вимірювання, враховуючи, що прилад вимірює значення об'ємного $R_v = U/I_v$ та поверхневого опорів $R_s = U/I_s$. Результати вимірювань та розрахунків занести у таблиці за формою табл. 1.1. Таблиця повинна бути розрахована не менш, ніж на 4 матеріали.
3. Відібрати кондиціоновані при насиченій вологості зразки тих діелектричних матеріалів, які досліджувалися в сухому стані, провести вимірювання поверхневих та об'ємних опорів.

Таблиця 1.1.

Матеріал	Стан діелектрика	h, м	R _v , Ом	R _s , Ом	ρ _v , Ом•м	ρ _s , Ом
	сухий					
	зволожений					

Методики вивчення кінетики зміни опору діелектриків при зволоженні та дослідження впливу температури на значення питомих опорів діелектрика наведені у додатку 2.

Обробка результатів експерименту

1. Розрахувати значення ρ_v і ρ_s.

Питомий об'ємний опір зразка діелектрика товщиною h з об'ємним опором R_v розраховується за формулою $\rho_v = R_v \frac{\pi d_1^2}{4h}$, а питомий поверхневий опір

$\rho_s = R_s \frac{\pi(d_2 + d_1)}{2(d_2 - d_1)}$, де R_s – поверхневий опір, d₁ – діаметр вимірювального електрода, d₂ – діаметр охоронного електрода трьохелектродного пристрою. Результати розрахунків занести у відповідні колонки табл. 1.2.

2. Проаналізувати вплив на значення питомих поверхневого та об'ємного опорів структури і складу діелектрика (пористий, неоднорідний чи однорідний, полярний, неполярний чи композиційний), а також вологі з врахуванням будови діелектрика і його складу (з відкритою чи закритою пористістю, однорідний чи неоднорідний, полярний чи неполярний тощо).

Завдання для самостійної підготовки

1. Відмінності між електропровідністю та поляризацією, між струмом витоку і наскрізним струмом діелектрика.

2. Зв'язок між структурою діелектрика, типом та концентрацією вільних носіїв заряду в ньому.

3. Фізична суть впливу зовнішніх чинників на електропровідність діелектрика.

4. Підібрати з врахуванням спеціальності приклади електротехнічних виробів, коли електропровідність є визначальною при виборі матеріалу.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення основних фізичних величин та технічних параметрів електропровідності діелектриків.

2. Чим зумовлена і який механізм має електропровідність твердих діелектриків в залежності від їх структури і складу?

3. Яку роль відіграють носії заряду різного типу в електропровідності органічних і неорганічних діелектриків з різним типом хімічного зв'язку в залежності від зовнішніх факторів.

4. Чим викликана відмінність поверхневої електропровідності від об'ємної у випадку твердих електроізоляційних матеріалів?

5. Які фактори впливають на об'ємну і поверхневу електропровідність твердих діелектриків?
6. Як змінюється електропровідність діелектрика при переході з аморфного (склоподібного) стану в кристалічний?
7. Чому питома провідність полярних електроізоляційних матеріалів при рівних умовах більша, ніж у неполярних?
8. Пояснити, чому адсорбція і абсорбція нейтральних молекул води впливає на електропровідність діелектриків.
9. Пояснити принцип розділення об'ємних і поверхневих струмів у діелектриках і особливості увімкнення зразка діелектрика при вимірюванні ρ_v і ρ_s .
10. Як змінюється електропровідність газоподібних діелектриків в залежності від напруги і який механізм цих змін?
11. Які особливості електропровідності рідинних діелектриків?
12. Що таке моліонна провідність, в яких діелектриках і при яких умовах вона має місце?
13. Які вимоги ставляться до електроізоляційних матеріалів, що використовуються в електричних мережах? Назвіть і охарактеризуйте найпоширеніші з них.
14. Які електроізоляційні матеріали використовуються в електричних машинах і які вони мають характеристики?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи – дослідити вплив складу й структури матеріалу та зовнішніх умов на поляризацію твердих діелектриків.

Завдання на роботу

1. Визначити геометричні параметри зразків діелектричних матеріалів різного складу та структури, які підлягають дослідженню.
2. З допомогою мостових чи резонансних приладів виміряти їхні ємності.
3. Розрахувати відносну діелектричну проникність досліджених діелектриків та класифікувати їх за механізмами поляризації з врахуванням складу і структури.
4. Експериментально дослідити вплив температури на ємність конденсаторів з різними діелектричними матеріалами.
5. Зобразити графічно температурні залежності ємності, розрахувати температурні коефіцієнти ємності графічним методом і пояснити температурну залежність ємності конденсаторів.
6. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань, наведених у методичних вказівках з конкретних розділів роботи.

Теоретичні відомості

Для ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Властивості діелектричних матеріалів. Поляризація діелектриків»

Методичні вказівки

Здатність діелектрика до поляризації визначається відносною діелектричною проникністю. Відносна діелектрична проникність ϵ_r може бути розрахована як відношення ємності C_X конденсатора, в якому простір між електродами повністю заповнений діелектричним матеріалом, що випробовується, до ємності такого ж вакуумного конденсатора:

$$\epsilon_r = C_X / C_0$$

При визначенні ϵ_r за формулою (2.1) можна замінити міжелектродну ємність в вакуумі C_0 на міжелектродну ємність у повітрі C_n з врахуванням, що $\epsilon_{\text{tp}} = 1.00053$, і похибка, зумовлена такою заміною, значно менша похибок вимірювання. Значення ϵ_r визначають на зразках матеріалів у вигляді пластин або трубок з застосуванням двох- чи трьохелектродних вимірювальних систем в залежності від наявних засобів вимірювання. Двохелектродну систему рекомендується використовувати, якщо вимірювальний прилад не дозволяє підключати охоронний електрод. При вимірюванні ємності зразка допускається застосовувати як нанесені, так і накладені на поверхню зразка електроди. На частотах до 1 МГц рекомендується застосовувати електродні системи, виконані у вигляді важільних, гвинтових та пружинних пристроїв, що забезпечують тиск близько 1000 кН/м². При ємнісних вимірах необхідно враховувати, що паразитні ємності електродної системи можуть дати суттєвий вклад у вимірювану величину, що призведе до значної систематичної похибки. Для її усунення розрахунковим шляхом використовують подвійне вимірювання, як описано нижче.

Опис експериментальної установки

Блок-схема експериментальної установки показана на рис. 2.1.

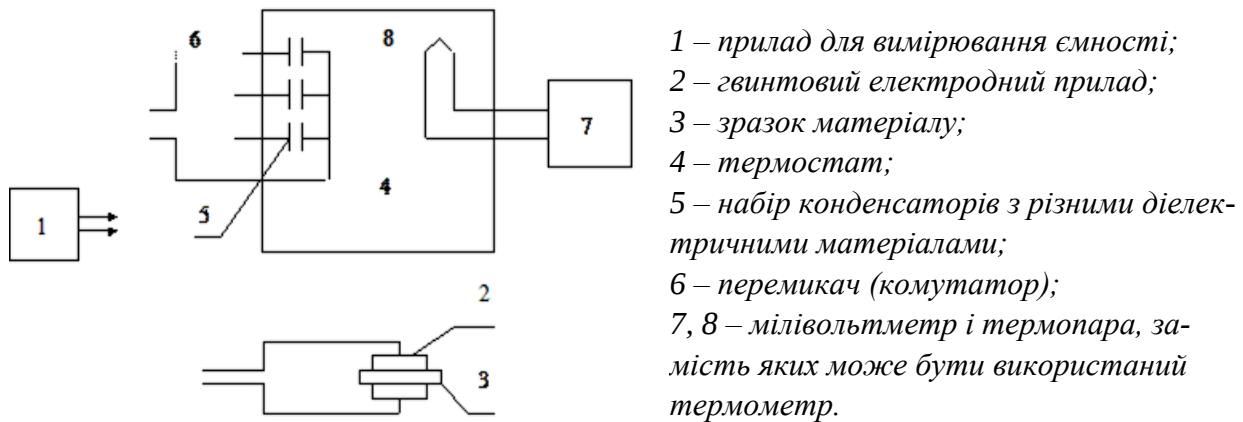


Рис. 2.1. Блок-схема експериментальної установки.

Порядок виконання роботи

Визначення відносної діелектричної проникності матеріалу

1. Ввімкнути міст ємностей Е8–2 (рис. 2.2), підібрати яскравість і сфокусувати промінь, виставити початкові положення органів управління: потенціометри відліку ємності і ефективної провідності в нульові положення, перемикач спареного множника К1 і К3 в положення 3, перемикачі множників К2 і К4 в положення 1, підібрати підсилення по У так, щоб промінь по горизонталі уміщувався на екрані, поступово підвищуючи підсилення по Х з допомогою потенціометрів С і G добиватися сплюснення еліпса на екрані в пряму (потенціометр С), орієнтовану по горизонтальній осі (потенціометр G).

2. Виміряти товщину зразка матеріалу з допомогою мікрометра і вставити його в електродну систему (рис. 2.3). Повністю опустивши верхній електрод з допомогою гвинта 1, забезпечити необхідний тиск на зразок.

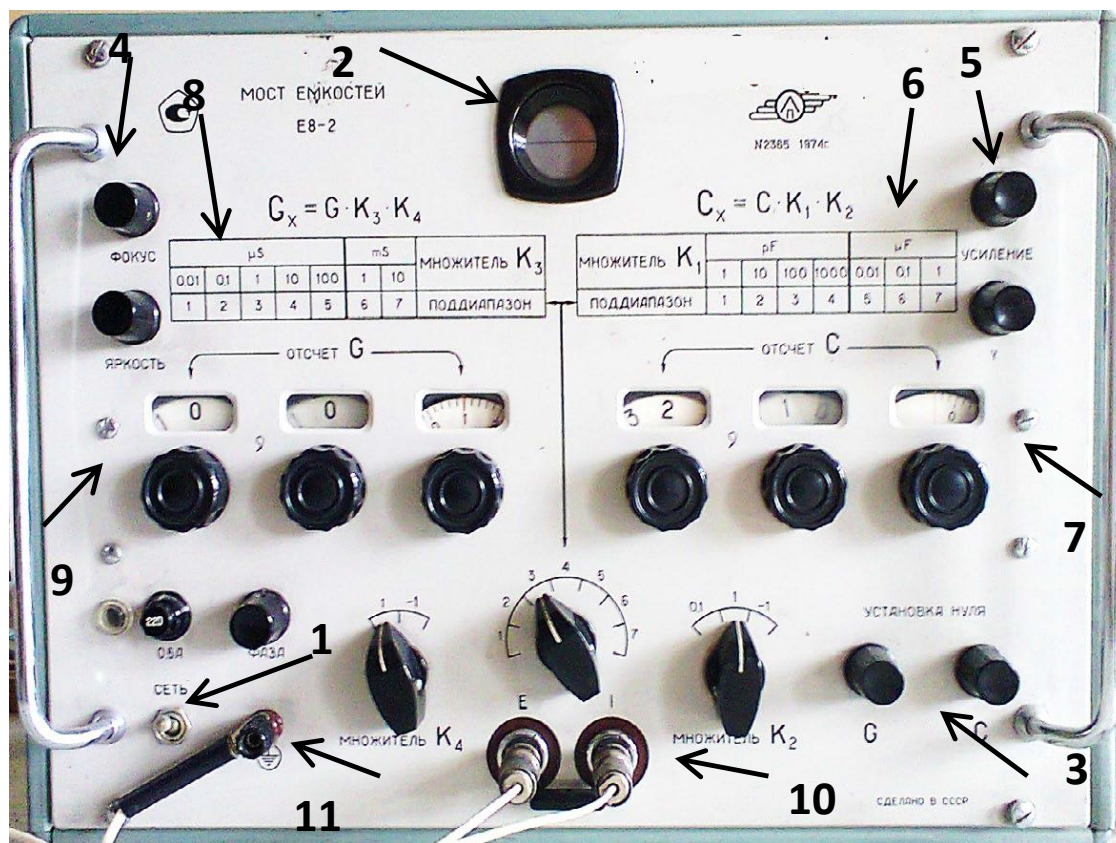
3. Підключити до електродної системи вимірювач ємності Е8–2 та виміряти C_1 – сумарну ємність зразка та електродної системи. Для цього поступово вводячи ручками 7 значення ємності, починаючи з молодших розрядів, добиватися перетворення еліпса на екрані в пряму. Періодично, при необхідності приводити еліпс (пряму) в горизонтальне положення ручками 9.

4. Вийняти з електродної системи зразок матеріалу, залишивши між електродами проміжок, розмір якого дорівнює товщині діелектрика.

5. Виміряти C_2 – сумарну ємність повітряного проміжку та електродної системи. Результати вимірювань для всіх наданих викладачем матеріалів занести в таблицю за формою табл. 2.1.

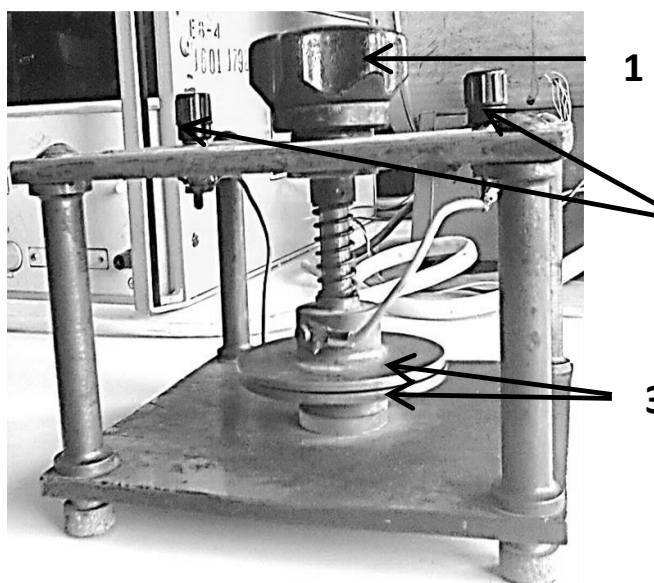
Таблиця 2.1

Матеріал	h, м	C_1 , пФ	C_2 , пФ	ΔC , пФ	C_{Σ} , пФ	ϵ_r
...	...	...	...	...	...	...



1 – тумблер ввімкнення; 2 – електроннопроменевий показчик рівноваги; 3 – потенціометри установки нуля по амплітуді (ємності) і куту нахилу (ефективній провідності); 4 – органи управління променем; 5 – потенціометри підсилення по X (зверху) і по Y; 6 – діапазони ємності; 7 – установка і відлік значень ємності; 8 – діапазони ефективної провідності; 9 – установка і відлік ефективної провідності; 10 – вхід; 11 – клемма заземлення.

Рис. 2.2. Міст ємностей E8–2.



1 – гвинт для встановлення проміжку між електродами;
2 – клемми для під'єднання виводів вимірювального приладу;
3 – електроди.

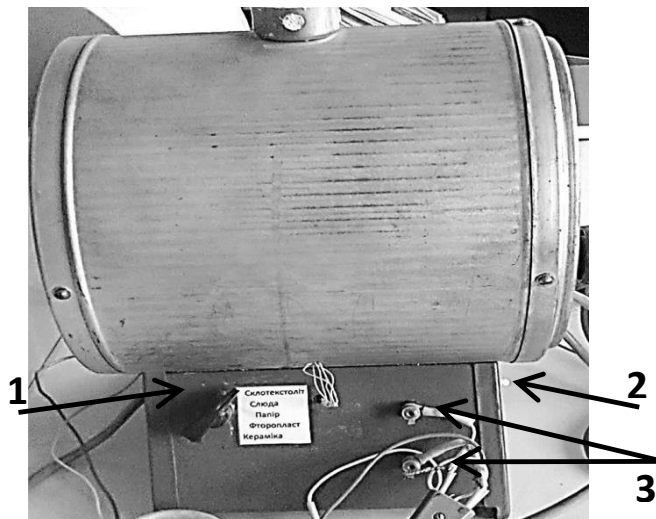
Рис. 2.3. Електродна система для вимірювання ємності.

Визначення температурної залежності ємності

1. Підключіть міст ємності Е8–2 до виводу зразків 1 на термостаті (рис. 2.4). Виставте перемикач зразків термостата в крайню праву позицію.
2. Виміряйте і запишіть значення ємності відповідного матеріалу у табл. 2.2. Послідовно визначте і зареєструйте при кімнатній температурі ємність зразків чи конденсаторів з інших матеріалів, що є у термостаті.
3. Ввімкніть термостат. З підвищенням температури проводьте періодичне вимірювання і занесення ємності матеріалів у табл. 2.2. через кожні 5...10 °С, контролюючи температуру з допомогою ртутного термометра.

Таблиця 2.2

Температура, °С	С ₁ , пФ	ТКС ₁ , 1/К	С ₂ , пФ	ТКС ₂ , 1/К	С ₃ , пФ	ТКС ₃ , 1/К	С ₄ , пФ	ТКС ₄ , 1/К
...	...	...	...	...	...	...	...	...



- 1 – перемикач для вибору матеріалів;
2 – тумблер для вмикання термостату;
3 – клеми для під'єднання виводів вимірювального приладу

Рис. 2.4. Термостат для вимірювання температурних залежностей ємності.

Обробка результатів експерименту

1. Розрахувати значення ϵ_r за даними табл. 2.1, враховуючи, що результати вимірювання фактично дають $C_1 = C_x + C_{пр}$ та $C_2 = C_{п} + C_{пр}$, де C_x – ємність діелектрика, $C_{п}$ – повітряного проміжку, $C_{пр}$ – паразитна ємність електродів. Ємність повітряного проміжку обчислюється теоретично за формулою $C_{п} = \epsilon_{гв} \epsilon_0 S / h$, де $\epsilon_{гв} \approx 1$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $S = \pi d^2 / 4$ – площа вимірювального електрода, d – діаметр електрода; h – товщина зразка матеріалу. Паразитну ємність можна виключити, розрахувавши $\Delta C = C_1 - C_2 = C_x - C_{п}$. Тоді $\epsilon_r = C_x / C_{п} = 1 + \Delta C / C_{п}$.
2. Побудувати температурні залежності виміряних значень ємностей та виконати допоміжні побудови, необхідні для розрахунків температурних коефіцієнтів ємностей при температурі 60 °С графічним методом
3. Розрахувати температурний коефіцієнт ємності, використовуючи побудову і формулу, що показані на рис. 2.5 і занести в табл. 2.2.

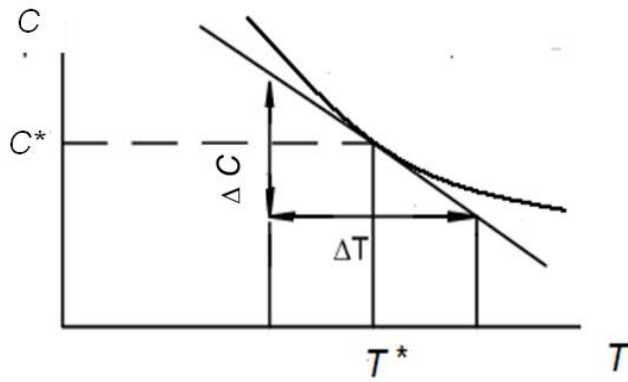


Рис. 2.5. Пояснення методики розрахунку

$$TKC = (1/C^*)(\Delta C / \Delta T)$$

Завдання для самостійної підготовки

1. Класифікаційні ознаки і класифікація механізмів поляризації.
2. Відмінності між пружними та релаксаційними видами поляризації і найпростіші моделі цих видів поляризації
3. Взаємозв'язок між будовою діелектрика та механізмами його поляризації.
4. Фізична суть впливу зовнішніх факторів на поляризацію діелектриків.
5. Спосіб отримання діелектричного матеріалу (конструкції) з нульовим температурним коефіцієнтом діелектричної проникності (ємності)?
6. Приклади використання поляризаційних явищ в інженерній практиці.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення основних фізичних величин, що характеризують поляризацію діелектриків, та технічних параметрів поляризації.
2. Чим визначається і що характеризує відносна діелектрична проникність?
3. За якими ознаками класифікують поляризацію? Охарактеризуйте механізми і наведіть основні види поляризації діелектриків.
4. Наведіть типові значення відносної діелектричної проникності для діелектриків з різними видами поляризації.
5. Які фактори впливають на значення відносної діелектричної проникності?
6. Які вимоги висуваються до відносної діелектричної проникності матеріалів, що використовуються у високочастотній техніці? Наведіть приклади високочастотних діелектриків.
7. Які вимоги висуваються до відносної діелектричної проникності матеріалів, що використовуються у низькочастотній техніці? Наведіть приклади низькочастотних діелектриків.
8. Які вимоги висуваються до відносної діелектричної проникності матеріалів, що використовуються в конденсаторній техніці? Наведіть приклади конденсаторних діелектриків.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

Мета роботи – вивчення механізмів діелектричних втрат та закономірностей впливу зовнішніх факторів на діелектричні втрати твердих діелектриків.

Завдання на роботу

1. Виміряти мостовим методом залежність ємності та $\operatorname{tg}\delta$ від температури для ряду конденсаторів і зразків діелектричних матеріалів за вказівкою викладача.
2. Побудувати температурні залежності ємності, $\operatorname{tg}\delta$ та фактору втрат (добутку ємності і $\operatorname{tg}\delta$).
3. Визначити механізми діелектричних втрат в досліджених матеріалах шляхом порівняння отриманих температурних залежностей $\operatorname{tg}\delta$ з теоретичними.
4. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань.

Теоретичні відомості

Для більш повного ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Властивості діелектричних матеріалів. Діелектричні втрати».

Методичні вказівки

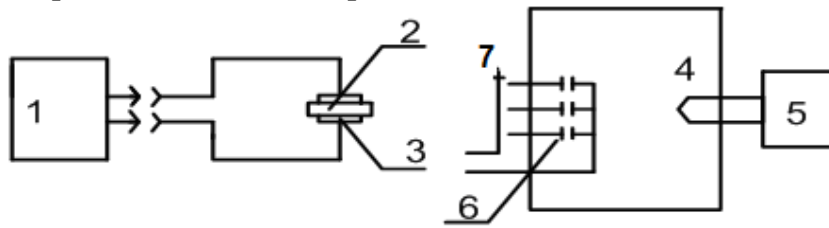
Повна потужність діелектричних втрат в електроізоляційній конструкції залежить від частоти, напруги, матеріалу ізоляції і її конструктивних особливостей і дорівнює $P = \omega U^2 C \operatorname{tg}\delta$, де δ – кут діелектричних втрат, що доповнює до 90° кут зсуву фаз φ між повним струмом та напругою в ємнісному ланцюзі. У випадку ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджає вектор напруги на кут, що дорівнює 90° ; при цьому діелектричні втрати будуть відсутні. Чим більші активні втрати – потужність, що переходить в теплоту у діелектрику, тим менший кут φ та більші кут діелектричних втрат δ та $\operatorname{tg}\delta$.

Точною характеристикою міри діелектричних втрат у матеріалі є питомі діелектричні втрати $P_n = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg}\delta$, де E – напруженість електричного поля в діелектрику. Але на практиці діелектричні втрати в електричній ізоляції характеризують саме тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ завдяки незалежності цього параметра від геометрії діелектричної конструкції, простоті його вимірювання та враховуючи, що через відносну стабільність ємності $\operatorname{tg}\delta$ визначає характер залежностей діелектричних втрат від зовнішніх факторів, крім частоти, що явно входить в формулу для діелектричних втрат

Для низькочастотних (до декількох кілогерц) низьковольтних вимірювань ємності і $\operatorname{tg}\delta$ для розрахунку діелектричних втрат звичайно використовують мостові аналогові та цифрові прилади, що найчастіше працюють на частоті 1000 Гц, для високочастотних – куметри або хвилеводні методи. Як правило, при мостових методах вимірювання для заміщення діелектрика з втратами на низьких частотах використовують паралельну, а на високих – послідовну схеми заміщення. Високовольтні вимірювання на частоті 50 Гц найчастіше виконують на мостах типу Шерінга.

Опис експериментальної установки

Блок-схема установки для низьковольтного вимірювання $\text{tg}\delta$, що використовується в даній роботі, наведена на рис. 3.1.



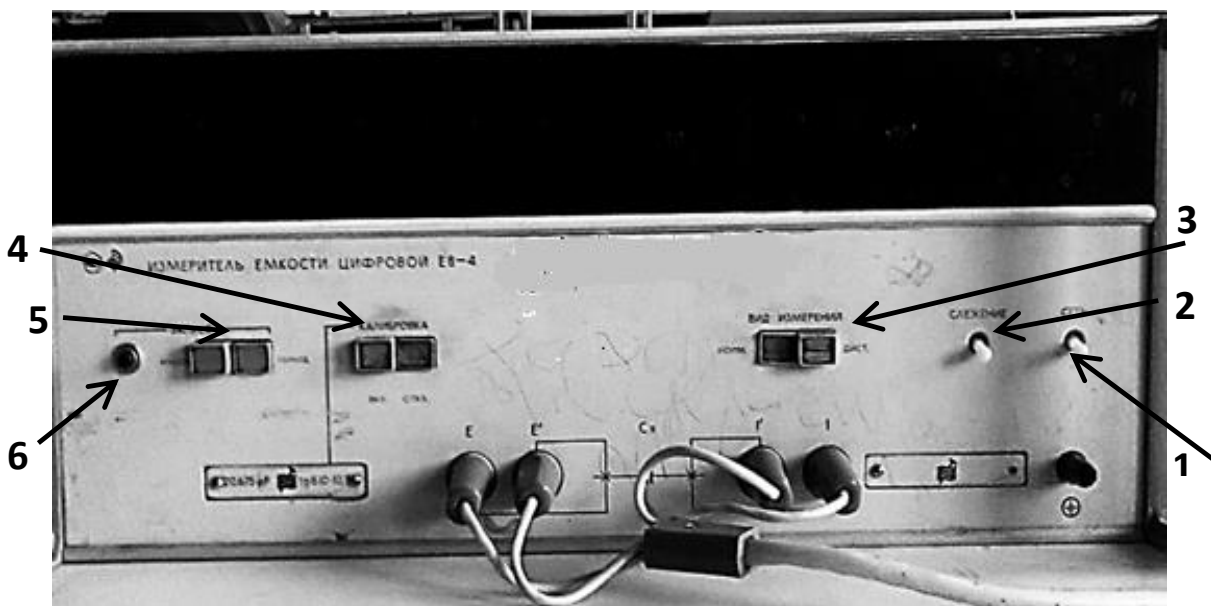
1 – міст змінного струму; 2 – зразок матеріалу, що досліджується; 3 – електродний пристрій; 4 – термостат; 5 – термометр чи термопара; 6 – конденсатори з різними діелектричними матеріалами та фольговані діелектрики; 7 – перемикач.

Рис 3.1. Блок-схема експериментальної установки.

Порядок виконання роботи

Вивчення температурних залежностей діелектричних втрат

1. Підключіть вимірювач ємності цифровий Е8–4 до виводу зразків 1 на термостаті (рис. 3.2). Виставте перемикач зразків термостата в крайню праву позицію.
2. Перевірте вихідні установки органів керування Е8–4: тумблери 1 і 2 – вимкнено, 3 – нормальний, 4 – ввімкнено, 5 – періодичний.
3. Ввімкніть прилад тумблером 1, натисніть кнопку 6 «запуск», впевніться у відповідності відліків на табло нормованим ($C=20,675$ пФ, $\text{tg}\delta = 10 \cdot 10^{-4}$), вимкніть режим калібрування і перейдіть в режим вимірювання.



1 – вмикач приладу «мережа», 2 – перемикач режиму роботи «слідкування» (реєструється тільки зміна значення ємності), 3 – перемикач «вид вимірювання» дистанційний або нормальний, 4 – вмикач режиму калібрування, 5 – перемикач режимів запуску: одиничні відліки або періодичні, 6 – кнопка одиничного запуску.

Рис. 3.2. Вимірювач ємності цифровий Е8–4.

4. Підключіть вхідні кабелі мосту до комутатора виводів зразків матеріалів та конденсаторів з термостату, і виміряйте значення ємності та $\text{tg}\delta$ при кімнатній температурі, а потім ввімкніть термостат і по мірі його нагрівання періодично через 10°C до $80 - 100^\circ\text{C}$ вимірюйте $\text{tg}\delta$ та ємність кожного зразка та конденсатора, виготовленого з відомого діелектрика. Дані вимірювань ємності C і тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ занесіть у таблицю за формою табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Т, °C	Назва матеріалу			Назва матеріалу			Назва матеріалу			Назва матеріалу			Назва матеріалу		
	C	$\text{tg}\delta$	$C \cdot \text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	$C \cdot \text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	$C \cdot \text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	$C \cdot \text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	$C \cdot \text{tg}\delta$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Обробка результатів

1. Розрахувати фактор втрат $C \cdot \text{tg}\delta$ і занести результати розрахунків в таблиці 3.1.
2. Побудувати і проаналізувати температурні залежності ємності C , тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ і фактора діелектричних втрат $C \cdot \text{tg}\delta$.
3. Визначити механізми діелектричних втрат для зразків діелектричних матеріалів та матеріалів конденсаторів.

Завдання для самостійної підготовки

1. Фізична суть діелектричних втрат та їхнє практичне значення.
2. Характер залежностей $\text{tg}\delta$ від напруженості електричного поля і його частоти для діелектричних втрат на електропровідність, релаксаційну поляризацію та часткові розряди.
3. Закономірності і механізми впливу зовнішніх факторів (частота, напруженість поля, температура, вологість) на діелектричні втрати у діелектриках.
4. Взаємозв'язок між будовою речовини та видами діелектричних втрат.
5. Приклади застосування діелектриків з врахуванням спеціальності для випадків, коли діелектричні втрати – основний критерій придатності матеріалу.

Контрольні запитання

1. Чим зумовлені втрати електричної енергії в діелектричних матеріалах?
2. Наведіть визначення основних фізичних величин та технічних параметрів діелектриків, що характеризують діелектричні втрати.
3. Які явища в діелектриках супроводжуються діелектричними втратами? Чи існують діелектрики без втрат?
4. Який параметр використовується для практичної оцінки діелектричних втрат при виборі діелектричних матеріалів?
5. Чи є значення $\text{tg}\delta$ постійним для даного діелектричного матеріалу? Від яких факторів залежить $\text{tg}\delta$?
6. Як впливає зволоження діелектрика на його діелектричні втрати?

7. Як впливає температура на діелектричні втрати в іонних, полярних і неполярних діелектриках?
8. Чому $\operatorname{tg}\delta$ не можна використовувати для порівняння діелектричних втрат при напругах різної частоти без врахування їх механізму?
9. Як за діелектричними втратами визначити тип діелектрика? Чи можна зробити це однозначно?
10. Як використовуючи діелектричні втрати визначити наявність у матеріалі газових порожнин?
11. Які електрофізичні та діелектричні параметри визначають сферу застосування діелектричного матеріалу?
12. В яких випадках діелектричні втрати можуть бути корисними? Наведіть приклади їх використання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Мета роботи – дослідити загальні закономірності пробою газоподібних, рідких та твердих (за вказівкою викладача) діелектриків.

Завдання на роботу

1. Ознайомитися з інструкцією з техніки безпеки при високовольтних випробуваннях і отримати допуск до виконання роботи.
2. Дослідити залежність пробивної напруги повітря від тиску в однорідному електричному полі.
3. Побудувати графіки залежності пробивної напруги та електричної міцності повітря від тиску та пояснити їх.
4. Визначити у неоднорідному електричному полі значення пробивної напруги повітряного проміжку при різних відстанях між електродами.
5. Побудувати та пояснити залежність пробивної напруги та електричної міцності від відстані між електродами.
6. Визначити електричну міцність трансформаторного масла. Оцінити вплив домішок та зволоження на електричну міцність масла.
7. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань, наведених у методичних вказівках з конкретних розділів роботи.

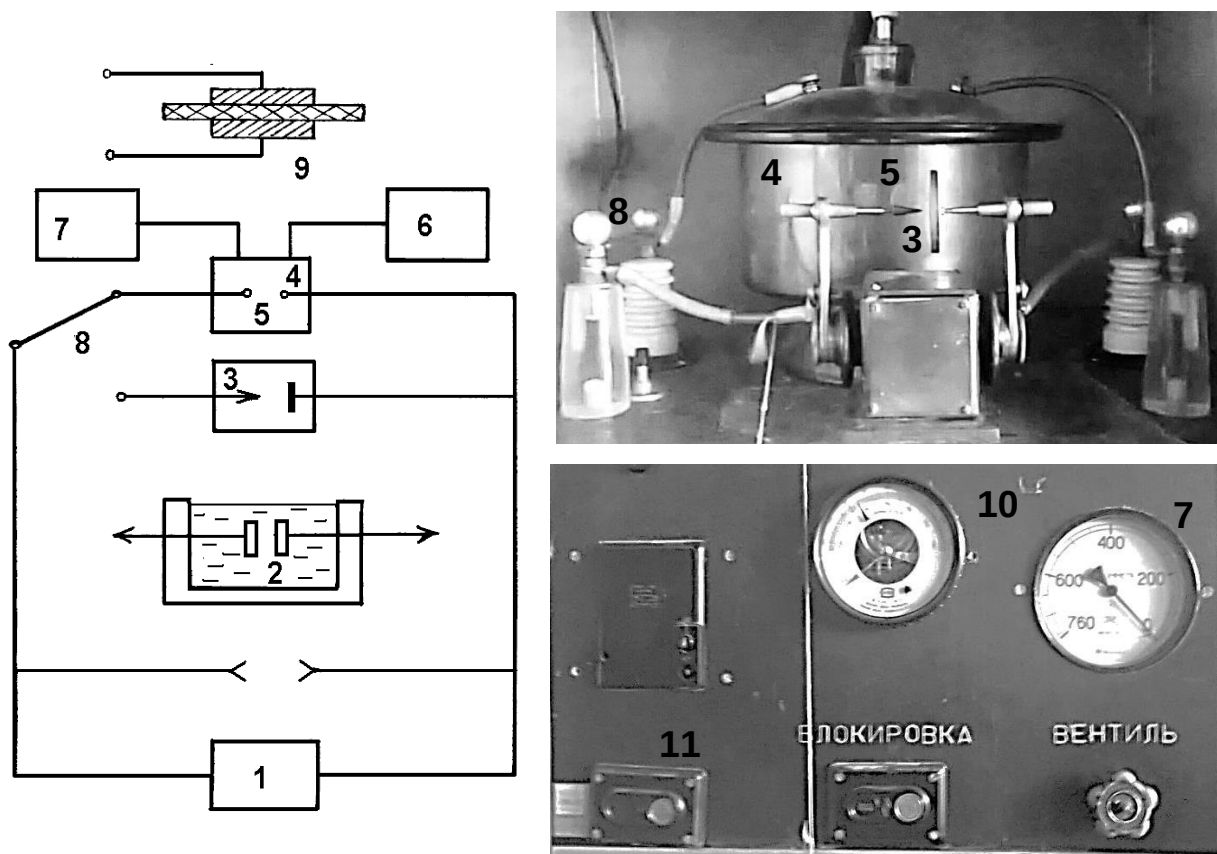
Теоретичні відомості

Для ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Властивості діелектричних матеріалів. Пробій діелектриків».

Опис експериментальної установки

Досліди по визначенню електричної міцності повітря та трансформаторного масла проводяться на комбінованій установці на змінному струмі промислової частоти за допомогою апаратів типу АВМТІ–60, АІ–70 чи їм подібних. Для пробою твердих плівкових матеріалів використовуються пробійні установки загального вжитку типу УПУ– 1М або спеціалізовані.

Узагальнена блок-схема та зовнішній вигляд устаткування для виконання досліджень показана на рис. 4.1. До його складу входять джерело високої напруги, випробувальна камера з пристроями блокування, вакуумна камера, форвакуумний насос та вакуумметр, барометр, електродні пристрої з однорідним полем для дослідження залежності пробивної напруги повітря від тиску і з неоднорідним полем для дослідження залежності пробивної напруги повітря від відстані між електродами при атмосферному тиску, стандартний масляний розрядник, набір електродів різного розміру для пробою твердих діелектриків



1 – апарат АВМТІ-60; 2 – стандартний розрядник для вимірювання пробивної напруги рідких діелектриків; 3 – розрядник типу площина – конус із регульованим розрядним проміжком; 4 – вакуумна камера; 5 – сферичні електроди; 6 – форвакуумний насос; 7 – вакуумметр; 8 – перемикач роду робіт (перемичка); 9 – електроди для визначення електричної міцності твердих плівкових діелектриків; 10 – барометр; 11 – кнопки керування форвакуумним насосом

Рис.4.1. Блок-схема та зовнішній вигляд установки для дослідження пробою діелектриків.

Порядок виконання роботи

Дослідження впливу тиску на електричну міцність повітря в однорідному електричному полі

1. Під'єднати у випробувальній камері за допомогою перемички сферичні електроди вакуумної камери до прохідних ізоляторів, що виводять високу напругу від трансформатора випробувального апарату.

2. Закрити дверцята випробувальної камери.

3. Відкрити люк високовольтного апарату і вийняти стандартний масляний розрядник, якщо він встановлений на високовольтних виводах трансформатора. Закрити люк.

4. Ввімкнути форвакуумний насос та знизити тиск у вакуумній камері на 700 мм рт. ст. за манометричним вакуумметром. Визначити тиск у вакуумній камері як різницю між показаннями барометра, що вимірює атмосферний тиск, та манометричного вакуумметра. Подати живлення в первинне коло високовольтного трансформатора і, впевнившись у тому, що регулятор напруги (реостат) виведено, ввімкнути автомат апарату для подачі високої напруги на розрядний проміжок.

5. Плавню обертаючи ручку регулятора напруги, підвищувати випробувальну напругу (зі швидкістю 1 кВ/с) до пробою. Записати значення пробивної напруги у табл. 4.1. Кількість вимірювань пробивної напруги для кожного значення тиску повітря для статистичної обробки результатів задається викладачем.

Таблиця 4.1

Параметри	Тиск повітря у вакуумній камері повітря, мм рт.ст.							
U _{пр} , кВ								
E _{пр} , кВ/м								

6. Повернути регулятор напруги у вихідний стан.
7. Відкрити вентиль і підвищити тиск в вакуумній камері на 100 мм рт. ст.
8. Виміряти пробивну напругу при новому значенні тиску повітря в камері по пп. 5, 6 і записати його в таблицю.
9. Повторювати пп. 7, 8 до досягнення у вакуумній камері атмосферного тиску.

Дослідження впливу відстані між електродами на пробій повітря у неоднорідному електричному полі

1. Під'єднати за допомогою перемички розрядний проміжок площина – конус до виводів високовольтного трансформатора.
2. Встановити за допомогою шаблону відстань між електродами 3,5 см.
3. Визначити пробивну напругу проміжку згідно пп. 5–7 попереднього підрозділу. Результат вимірювання занести у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Параметри	Відстань між електродами, см						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
U _{пр} , кВ							
E _{пр} , кВ/м							

4. Повторити п. 3 для інших зазначених в табл. 4.2 відстаней. Результати вимірювань занести у табл. 4.2.

Визначення електричної міцності трансформаторного масла

1. Зняти перемичку з прохідних ізоляторів випробувальної камери.
2. Під'єднати стандартний масляний розрядник, наповнений трансформаторним маслом, до високовольтних виводів трансформатора високовольтного апарату.
3. Визначити пробивну напругу трансформаторного масла двічі з інтервалом між випробуваннями 5 хв. у відповідності з режимом стандартних випробувань, але без перемішування, і записати результат у табл. 4.3

Таблиця 4.3

U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U _{ср}	E

4. Для оцінки впливу газових бульбашок на електричну міцність масла третій пробій виконати безпосередньо після другого.

5. Для спостереження відновлення електричних властивостей трансформаторного масла четверте випробування провести через 5 хв.

6. Для оцінки впливу вологи та твердих домішок на електричну міцність масла необхідно перед п'ятим випробуванням ретельно перемішати трансформаторне масло, щоб підняти з дна наявні там забруднення. Для спостереження відновлення електричних властивостей трансформаторного масла шосте випробування провести через 5 хв. Результати випробувань трансформаторного масла занести в табл. 4.3.

Обробка результатів

1. Розрахувати електричну міцність повітря при різних тисках, враховуючи, що відстань між електродами у вакуумній камері складає 10 мм, і занести результати в табл. 4.1.

2. Побудувати графіки залежності пробивної напруги та електричної міцності повітря від тиску у вакуумній камері.

3. Розрахувати пробивну напруженість електричного поля при різних відстанях між електродами і занести результати в табл. 4.2.

4. Побудувати графіки залежності пробивної напруги та пробивної напруженості електричного поля від відстані між електродами.

5. Розрахувати середнє значення пробивної напруги та електричної міцності масла, враховуючи, що у розряднику відстань між електродами дорівнює 2,5 мм.

6. Проаналізувати вплив досліджених факторів на пробій діелектриків, що знаходяться у різних агрегатних станах та пояснити отримані результати. Оцінити якість трансформаторного масла, пояснити коливання пробивної напруги трансформаторного масла між третім, четвертим, п'ятим і шостим випробуваннями. Сформулювати рекомендації по практичному використанню одержаних результатів.

Завдання для самостійної роботи

1. Загальні закономірності пробою діелектриків.

2. Умови, при яких можуть спостерігатися електричний, тепловий, а також іонізаційний та електрохімічний види пробоїв діелектриків.

3. Особливості розвитку лавинного та стримерного пробоїв газів.

4. Вплив прилипання електронів на електричну міцність газів.

5. Відмінності в механізмах пробою чистих та технічних рідких діелектриків.

6. Механізми впливу різних зовнішніх факторів (частоти та напруженості електричного поля, його конфігурації (однорідності), температури, вологості і т. п.) на електричну міцність діелектриків у різному агрегатному стані.

7. Можливості суміщення функцій (електрична ізоляція, тепловідвід, сприйняття механічних навантажень та ін.), що існують для електроізоляційних матеріалів у різному агрегатному стані.

8. Вплив макроскопічних дефектів на електричну міцність кабельного паперу і причини її екстремального перебігу у залежності від кількості шарів.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення основних фізичних величин та технічних параметрів, що характеризують стійкість діелектриків до дії високої напруги при різних механізмах пробою.
2. Які елементарні процеси можуть бути причиною пробою діелектриків?
3. Охарактеризуйте механізми різних видів пробою газоподібних діелектриків.
4. Назвіть фактори, що впливають на електричну міцність газів.
5. Як можна підвищити робочу напругу газових ізоляційних конструкцій?
6. Назвіть особливості пробою газоподібних діелектриків у неоднорідному електричному полі та їх вплив на пробивну напругу різної полярності.
7. Як впливає відстань між електродами розрядного проміжку на електричну міцність рідких та газоподібних діелектриків?
8. Охарактеризуйте основні механізми пробою рідких діелектриків.
9. Як впливають на електричну міцність рідких діелектриків домішки?
10. Які є шляхи збільшення електричної міцності трансформаторного масла?
11. Чому пробивна напруга при тепловому пробої не є однозначною характеристикою стійкості діелектриків і електроізоляційних конструкцій до дії високої напруги?
12. Чи існують можливості підвищення пробивної напруги готових електроізоляційних конструкцій?
13. Чому дорівнює пробивна напруга діелектрика при іонізаційній формі пробою і що ж є характеристикою стійкості діелектриків і електроізоляційних конструкцій до іонізаційного пробою?
14. Як та чому геометричні фактори впливають на пробивну напругу електроізоляційних конструкцій?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи – дослідити вплив температури на електропровідність напівпровідників.

Завдання на роботу

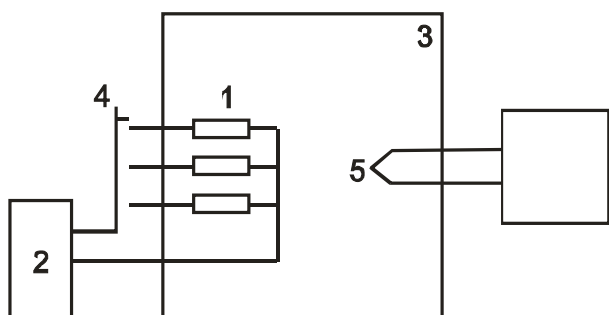
1. Виміряти температурну залежність опору напівпровідникових елементів електронної техніки (або за вказівкою викладача питомого опору напівпровідникових матеріалів, методика визначення якого наведена у додатку) в діапазоні температур від кімнатної до 100 °С.
2. Побудувати температурну залежність опору напівпровідникових елементів (питомого опору напівпровідників) у лінійному масштабі.
3. Визначити значення TKR (TKp) напівпровідникових матеріалів (елементів) при температурі 60 °С графічним методом.
4. Побудувати температурну залежність опору напівпровідникових елементів (або питомого опору напівпровідникових матеріалів) у напівлога-трифічному масштабі $\lg R = f(1/T)$
5. Визначити значення ширини забороненої зони напівпровідників.
6. Обчислити теоретичні значення TKR (TKp) напівпровідників (елементів) при температурі 60 °С.
7. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань, наведених у методичних вказівках з конкретних розділів роботи.

Теоретичні відомості

Для ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Напівпровідникові матеріали».

Опис експериментальної установки

Дослідження температурної залежності опорів напівпровідникових виробів, серед яких є резистори з напівпровідниковим резистивним шаром, термістори і позистори, проводиться в діапазоні температур від кімнатної до 90 – 100 °С на установці, блок-схема якої показана на рис. 5.1.



- 1 – зразок напівпровідникового виробу;
2 – омметр або універсальний вольтметр;
3 – термостат;
4 – комутатор;
5 – термopара або термометр.

Рис. 5.1. Блок-схема пристрою для вимірювання $R(T)$



1 – тумблер для вмикаання приладу; 2– перемикач роду роботи (вимірювання напруги або опору); 3 – перемикач межі вимірювання

Рис. 5.2. Вольтметр універсальний В7–16А.

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути вимірювальний прилад (рис. 5.2.). Переконайтесь, що перемикач роду роботи встановлений на вимірювання опору. Почергово виміряти опори напівпровідникових виробів при кімнатній температурі, при цьому при вимірюванні опору до 10 кОм перемикач меж вимірювання встановлювати на значення «10», від 10 до 60 кОм – на значення «100», більше 60 кОм – на значення «1000». Результати занести в таблицю за формою табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Температура, °C	Опір зразків, кОм					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
...	...	...	...	...	...	...

2. Включити термостат. По мірі нагрівання зразка через кожні 10 °C проводити вимірювання опорів напівпровідникових виробів, заносючи результати вимірювань в табл. 5.1.

За вказівкою викладача напівпровідникові елементи електронної техніки можуть бути замінені на зразки напівпровідникових матеріалів. В цьому випадку вимірюють температурну залежність питомих опорів напівпровідникових матеріалів за методикою, описаною у додатку.

Обробка результатів експерименту

Визначення ширини забороненої зони і теоретичного значення TKR напівпровідників

Ширина забороненої зони визначається на ділянці власної електропровідності напівпровідникового матеріалу (виробу) по температурній залежності його опору (питомого опору) (рис. 5.3). Для цього необхідно:

1. Побудувати графіки залежності $R(T)$ у напівлогарифмічному масштабі від зворотної абсолютної (в градусах Кельвіна) температури $\lg R=f(1/T)$.

2. В області високих температур на графіку виділити ділянку власної електропровідності, що характеризується прямою лінією з найбільшим нахилом.

3. Визначити ширину забороненої зони напівпровідника для зразків напівпровідників за формулою

$$E_d = [4,6k \lg(R_1 / R_2)] / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

де $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ еВ/К – стала Больцмана; $\lg(R_1/R_2) = \lg R_1 - \lg R_2$ – приріст логарифму опору елемента при зміні температури від T_1 до T_2 . Для напівпровідникових матеріалів використовується та ж формула з заміною R на ρ .

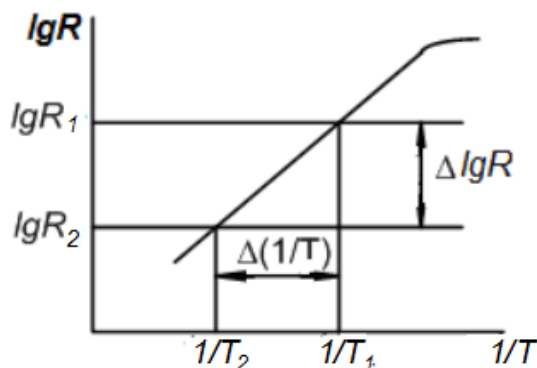


Рис. 5.3. Зразок температурної залежності опору напівпровідникового виробу в напівлогарифмічному масштабі і визначення величин, необхідних для розрахунків ширини забороненої зони.

4. Розрахувати теоретичне значення ТКР за формулою $\text{TKR} = E_d / 2kT^2$, справедливою у випадку експоненціальної залежності опору від температури (Значення температури для розрахунку підставляти в Кельвінах)

Визначення ТКР напівпровідникових елементів графічним методом

1. Побудувати графіки залежності $R(T)$ у лінійному масштабі.
2. Визначити емпіричні значення температурних коефіцієнтів опору напівпровідникових елементів за формулою $\text{TKR} = (1/R^*)(dR/dT)$. Рекомендується застосовувати графічний метод (рис. 5.4). Для цього при заданій температурі T^* визначити значення R^* , оцінити похідну залежності $R(T)$ при температурі T^* по нахилу дотичної, проведеної до функції $R(T)$ при температурі T^* , як $\Delta R / \Delta T$ розрахувати ТКР.

3. Занести результати в табл. 5.2. та порівняти отримані значення ТКР з теоретичними.

4. Проаналізувати температурні залежності опору і визначити, до якого класу напівпровідникових виробів відносяться досліджені в ході лабораторної роботи.

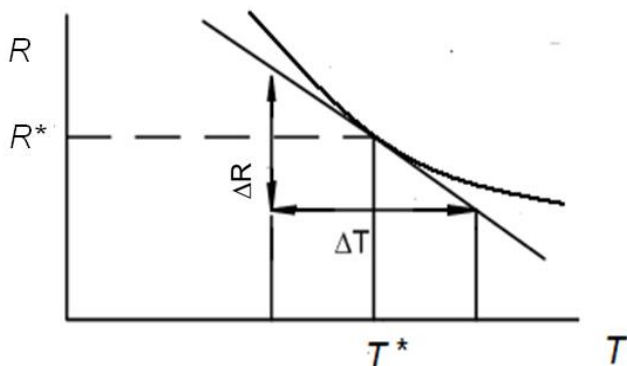


Рис. 5.4. Зразок температурної залежності опору напівпровідникового виробу і визначення величин, необхідних для графічного визначення $\text{TKR} = (1/R^*)(\Delta R / \Delta T)$.

Таблиця 5.2

Параметри	Номер досліджуваного зразка					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
E_d, eV						
$\text{TKR}_{\text{теор}}$						
$\text{TKR}_{\text{граф}}$						

Завдання для самостійної підготовки

1. Енергетичні зони у напівпровідниках.
2. Механізм електропровідності власних і домішкових напівпровідників.
3. Роль основних та неосновних носіїв заряду в електрофізичних явищах в домішкових напівпровідниках.
4. Природа фоторезистивного ефекту у напівпровідниках і вплив домішок на спектральну характеристику напівпровідникових фоторезисторів.
5. Природа та область застосування тензорезистивного ефекту у напівпровідникових матеріалах.
6. Природа та область застосування магніторезистивного ефекту у напівпровідниках.
7. Механізм ефекту Холла та області його технічного застосування.
8. Приклади використання напівпровідникових матеріалів з врахуванням спеціальності.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення основних фізичних величин та технічних параметрів, які характеризують електропровідність напівпровідників..
2. Назвіть критерії відмінності напівпровідників від провідників та діелектриків.
3. За якими ознаками проводиться класифікація напівпровідникових матеріалів?
4. Охарактеризуйте природу і механізм електропровідності напівпровідників.
5. Які внутрішні і зовнішні фактори визначають електропровідність напівпровідника?
6. Коли електропровідність напівпровідника є власною? Коли домішковою?
7. Які фізичні явища у напівпровідниках є найбільш важливими для технічного застосування?
8. Який вигляд має вольт-амперна характеристика напівпровідника? У яких випадках вона не симетрична?
9. Назвіть області застосування напівпровідників в електронній техніці, в приладобудування, в електротехніці.
10. Яке використання знайшли напівпровідникові матеріали в обчислювальній техніці?
11. Які напівпровідникові матеріали і для чого використовуються в електронній техніці?
12. Які напівпровідникові матеріали і для чого використовуються в електроенергетиці, у відновлюваній енергетиці?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи – дослідити вплив температури на електропровідність провідникових матеріалів з високою питомою провідністю та високим питомим опором; визначити питому термоЕРС провідникових термопар.

Завдання на роботу

1. Виміряти залежності опору провідникових матеріалів від температури і побудувати графіки цих залежностей. Розрахувати температурний коефіцієнт опору ТКР для матеріалів, що досліджувалися.
2. Паралельно з п.1 зняти залежності термоЕРС термопар від температури і побудувати відповідні графіки. Визначити питому термоЕРС для досліджених термопар.
3. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань, наведених у методичних вказівках з конкретних розділів роботи.

Теоретичні відомості

Для ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Електропровідність провідникових матеріалів».

Опис експериментальної установки

Лабораторна робота проводиться на установці, блок-схема якої показана на рис.6.1.

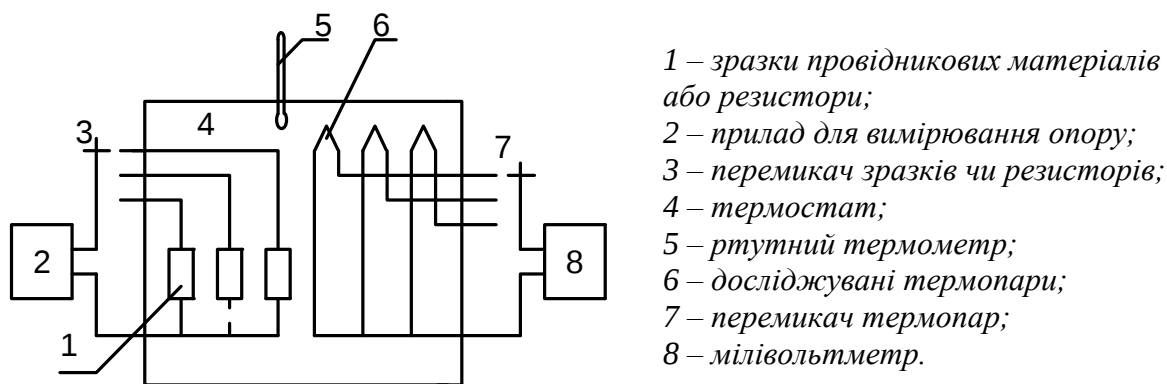


Рис. 6.1. Блок-схема установки для дослідження $R(T)$ та термоЕРС.

При виборі значення опорів зразків провідникових матеріалів близько 100 Ом враховано, що температурний коефіцієнт питомого опору досліджуваних матеріалів може бути у діапазоні від 10^{-6} – 10^{-3} K^{-1} , а тому прилад повинен реєструвати зміну опору матеріалів в третьому – четвертому знакові. Для вимірювання опорів зразків в роботі використовується універсальний міст Р–577 (рис. 6.2).



1 – показчик рівноваги мосту, 2 – лімби ступінчастого і плавного регулювання опорів пліч моста при його врівноваженні, 3 – вхідні клєми, 4 – потенціометр для регулювання чутливості.

Рис. 6.2. Міст постійного і змінного струму Р-577.

Методичні вказівки

При дослідженні температурної залежності опорів провідникових матеріалів температура повинна вимірюватися в безпосередній близькості від зразків, а швидкість підйому температури становити не більше $2^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$, щоб зменшити вплив неоднорідності теплового поля у термостаті на результати. Для досягнення максимально можливої точності вимірювання потрібно добиватися врівноваження моста при максимальній його чутливості або, при можливості користуватися методом «вилки», знаходячи значення вимірюваного опору як середнє арифметичне значень, що відповідають однаковому за абсолютною величиною відхиленню показчика рівноваги від нульового положення.

Початкова установка параметрів моста зафіксована і відповідає вимірюванню активних опорів зі значеннями, близькими до 100 Ом. При вимірюванні спочатку потрібно перевірити можливість врівноваження моста з використанням плавного регулювання, зафіксувавши зовнішній лімб, кожна поділка якого відповідає сотням Ом, на нульовій поділці, і повертаючи внутрішній лімб, що дозволяє вимірювати опори від 0 до 105 Ом, в ту сторону, в яку відхилилася стрілка показчика рівноваги.

Якщо опір виявиться більшим 105 Ом, то зовнішній лімб переводиться в положення 1, що відповідає 100 Ом, а внутрішній – в область малих значень опорів, що додаються потім при досягненні рівноваги до 100 Ом, зафіксованих зовнішнім лімбом.

Температурний коефіцієнт опору рекомендується визначати графічно. Для провідникових матеріалів має місце лінійна залежність опору від температури $R=R_0[1+\alpha_R(T-T_0)]$, де R_0 , R – опори матеріалу при температурах відповідно T_0 та T ; α_R – температурний коефіцієнт опору TKR ; $\alpha_R = (1/R)(dR/dT)$; між TKR та TKp існує зв'язок $\text{TKR} = \text{TKp} - \text{TKl}$; TKl – температурний коефіцієнт лінійного розширення. Для провідникових матеріалів $\text{TKl} \ll \text{TKR}$ і приблизно можна вважати, що $\text{TKR} = \text{TKp}$.

При виборі приладу для вимірювання термоЕРС необхідно врахувати, що питома термоЕРС більшості провідникових термопар, що використовуються у техніці знаходиться у діапазоні від 8 до 80 мкВ/К, а тому межі вимірювання вольтметра повинні знаходитися на рівні 1 – 10 мВ.

Питому термоЕРС α термопар рекомендується визначати графічним методом. Оскільки термоЕРС термопар залежить від температури за лінійним законом, то $\alpha = \Delta U / \Delta T$, де U – приріст термоЕРС термопар при зміні температури гарячого контакту на величину T .

Порядок виконання роботи

1. Виміряти при кімнатній температурі значення опору зразків провідникових матеріалів, що знаходяться в термостаті, почергово підключаючи їх до моста за допомогою перемикачів, та впевнитися, що значення термоЕРС термопар при кімнатній температурі дорівнює нулю. При необхідності встановити показник напруги мілівольтметра (стрілка, «зайчик») на нуль. Результати вимірювань занести у табл. 6.1 та 6.2.

2. Включити термостат. По мірі нагрівання зразків проводити вимірювання значень опору та термоЕРС через кожні 5 – 10 °С. Результати вимірювань заносити у табл. 6.1 та 6.2

Таблиця 6.1

Температура, °С	Опір зразка, Ом			
	Мідь	Манганін	Ніхром	Константан
...	...	...	...	...

Таблиця 6.2

Температура, °С	ТермоЕРС, мВ	
	Медь - константан	Хромель - алюмель
...	...	...

Обробка результатів експерименту

1. Побудувати графіки залежності опору зразків провідникових матеріалів від температури. Визначити ТКР зразків. Пояснити температурні залежності опору досліджених матеріалів.

2. Побудувати графік залежності термоЕРС досліджених термопар від температури. Визначити їх питому термоЕРС.

Завдання для самостійної підготовки

- Відмінності між електропровідністю сплавів – механічних сумішей та сплавів – розчинів.
- Надпровідність та кріорезистивний ефект у металевих провідниках.
- Механізм та область застосування тензорезистивного ефекту у провідниках.
- Області застосування провідників 2 роду.

5. Використання провідникових матеріалів в електротехнічному обладнанні з врахуванням спеціальності.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення основних фізичних величин та технічних параметрів, які характеризують електропровідність провідників.
2. Назвіть основні принципи класифікації провідникових матеріалів.
3. Які зовнішні фактори і як впливають на електропровідність провідників?
4. Як пов'язана електропровідність металів з їхньою структурою?
5. Чи завжди сплави мають малий температурний коефіцієнт питомого опору?
6. Яким чином механічні напруження та деформації впливають на електропровідність металевих провідників?
7. Охарактеризуйте перспективи застосування надпровідників та кріопровідників.
8. Внаслідок чого утворюється різниця потенціалів на контакті двох провідників?
9. Який зв'язок існує між контактною різницею потенціалів і термоЕРС?
10. Як з допомогою термопари виміряти температуру?
11. Які матеріали використовуються в термометрах опору і в яких діапазонах температури такі термометри працюють?
12. Які матеріали використовують для виготовлення жил проводів і кабелів, обмоток електричних машин і апаратів, дротів повітряних ліній електропередач?
13. Які розрізняють види контактів, які матеріали використовують для них?
14. Які основні області використання сплавів? Назвіть основні з тих, що використовуються в електротехніці?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи – навчитися визначати основні характеристики феромагнітних матеріалів.

Завдання на роботу

1. Розмагнітити зразок матеріалу, що досліджується, з допомогою котушки з низькочастотним неоднорідним магнітним полем.
2. Зняти основну криву намагнічування феромагнетика (за вибором викладача) з допомогою пермеаметра Кепселя.
3. Побудувати основну криву намагнічування. Визначити початкову μ_p та максимальну $\mu_{\max}$ відносні магнітні проникності. Розрахувати та побудувати залежність відносної магнітної проникності μ від напруженості магнітного поля H .
4. Виміряти статичну залежність магнітної індукції B від напруженості магнітного поля H для побудови граничної петлі гістерезису. Побудувати граничну петлю гістерезису та визначити індукцію насичення B_s , залишкову індукцію B_r і коерцитивну силу H_c . Визначити, до якого типу відноситься феромагнетик.
5. Підготувати звіт з роботи з врахуванням мети роботи, основних і додаткових завдань, наведених у методичних вказівках з конкретних розділів роботи.

Теоретичні відомості

Для ознайомлення з матеріалом необхідно прочитати Додаток 1 «Основні теоретичні відомості. Властивості магнетиків».

Опис експериментальної установки

При статичних випробуваннях феромагнітних зразків з низькою відносною магнітною проникністю широко розповсюдженим є електродинамічний метод вимірювання параметрів феромагнітних матеріалів. Він дозволяє швидко та без попередніх розрахунків приблизно визначити необхідні характеристики. Найбільш простим приладом електродинамічного типу є пермеаметр Кепселя, що працює за принципом інверсного магнітоелектричного приладу, в якому постійний магніт замінений намагнічувальною обмоткою з регульованим постійним струмом, в якій розміщують досліджуваний зразок феромагнітного матеріалу у формі прутка з площею поперечного перерізу S (рис. 7.1).

Пермеаметр складається з масивного ярма, виконаного з магнітом'якого заліза. У ярмі є циліндрична виточка з нерухомим сталевим циліндром. В повітряному проміжку, утвореному ярмом та циліндром, розміщена рухома обертова рамка з котушкою ω_r , що укріплена на одній осі з вказівною стрілкою вимірника індукції. Між вільними кінцями ярма розміщена нерухома намагнічувальна котушка ω_n , всередину якої закладається і притискається до ярма гвинтами досліджуваний зразок. Струм в цій котушці і напруженість магнітного поля у вимірювальному проміжку регулюються реостатами $R1$ і $R3$. На ярмі поміщені послідовно з основною дві додаткові котушки ω_n' , що утворюють магнітний потік зворотного напрямку для компенсації підмагнічування ярма основною намагнічувальною котушкою та досягнення пропорційності між індукцією у зразку та у повітряних зазорах показчика індукції.

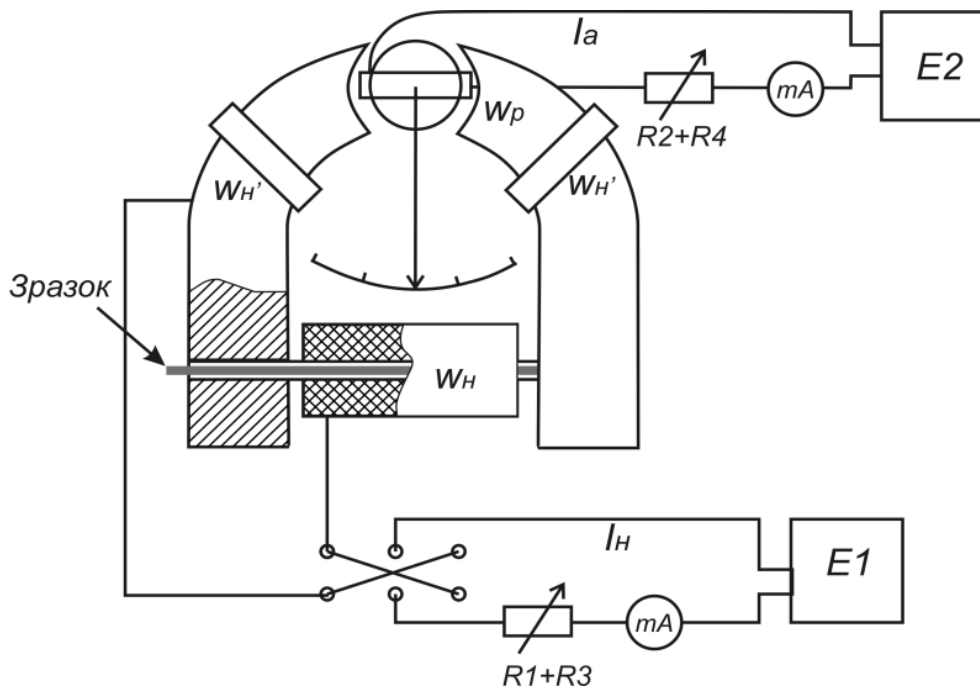


Рис. 7.1. Схематичне зображення пермеаметра Кепселя

Обертовий момент вимірника індукції пермеаметра прямо пропорційний добутку струму у рамці, що регулюється реостатами R2 і R4, площі рамки, числу витків котушки та індукції у повітряних проміжках пермеаметру, в яких розміщена рамка. Враховуючи, що індукція в повітряних проміжках практично пропорційна індукції у зразку, обертовий момент при постійному струмі також пропорційний індукції у зразку. Протидіючий момент, що утворюється у покажчикові індукції спіральними пружинами, пропорційний куту повороту рамки приладу. Таким чином, індукція у зразку може бути визначена безпосередньо по рівномірній шкалі вмонтованого в пермеаметр вимірника індукції зі шкалою до $2 \cdot 10^4$ Гс.

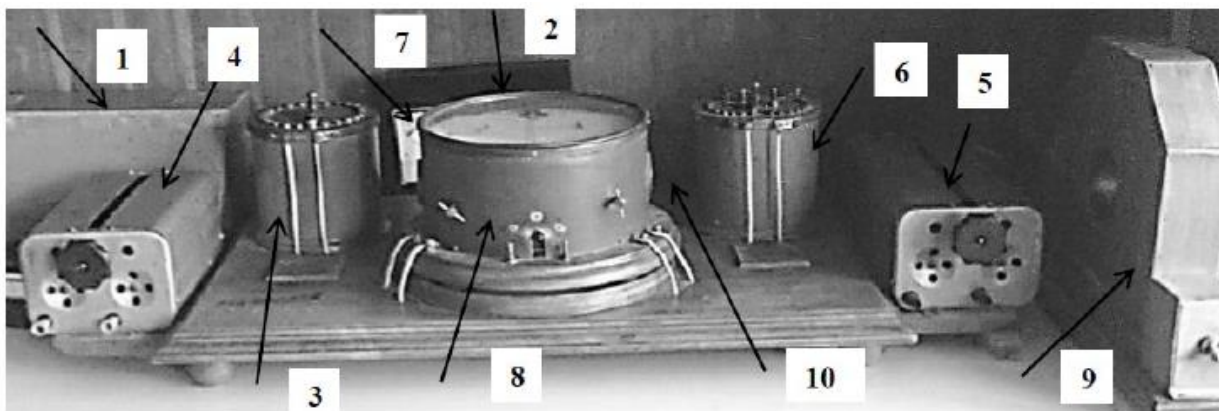
Пермеаметр розрахований на застосування системи CGSM: магнітна індукція вимірюється в Гаусах (Гс), напруженість магнітного поля в Ерстедах (Е). Максимальне значення напруженості магнітного поля у приладі складає 200 Е. Для переведення результатів вимірювання в одиниці СІ слід використовувати співвідношення – $1 \text{ Е} = 80 \text{ А/м}$; $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$.

Порядок виконання роботи

Підготовка вимірювальної схеми та зразків до роботи

1. В схему пермеаметра включають джерела живлення E1 та E2.
2. За показанням правого міліамперметра реостатами R2 та R4 встановлюють незмінний на протязі роботи струм у рамці вимірника індукції: $I_p = 0,0626/S \text{ А}$ ($0,0626$ – постійна даного пермеаметра; S – площа перетину зразка, см^2). Записати площу перетину зразка, см^2 та струм рамки, А.
3. При повністю виведеному опорі ступінчастого реостата R1 встановлюють опір реостата R3, що відповідає номінальному струму (2 А) в намагнічувальній котушці.

Цьому значенню струму відповідає відхилення стрілки вимірника індукції (лівого мікроампер метра) на всю шкалу (100 поділок, 200 Е). Встановлений опір реостата повинен залишатися незмінним до завершення експериментальної частини роботи.



1 – джерела живлення; 2 – ключі для вмикання живлення; реостати: 3 – R1, 4 – R3, 5 – R2, 6 – R4; 7 – міліамперметри; 8 – пермеаметр; 9 – котушка для розмагнічування зразка; 10 – зразок.

Рис. 7.2. Установка для дослідження характеристик феромагнітних матеріалів.

4. Повністю вводиться ступінчастий реостат R1 по годинниковій стрілці. В цьому випадку у намагнічувальному ланцюзі буде протікати мінімальний намагнічувальний струм I_H , що є вихідним при знятті основної кривої намагнічування.

5. Зразок, що досліджується, повністю розмагнітити за допомогою соленоїда, що вмикається в мережу змінного струму.

Зняття основної кривої намагнічування

При вимірюванні основної кривої намагнічування струм в у намагнічувальній котушці пермеаметру за допомогою ступінчастого реостата R1 (починаючи з 24-го його ступеня) поступово доводиться до 2 А. Кожне наступне зниження опору реостата R1 супроводжується багатократною зміною полярності намагнічувального струму з метою формування гістерезисної петлі. Зазвичай, для цього достатньо зробити 10–15 повних циклів переключення полярності струму. По закінченню кожної операції, пов'язаної з формуванням петлі, слід записати в табл. 7.1 показання вимірника індукції пермеаметра у Гаусах та лівого мікроамперметра, що використовується як вимірник напруженості поля у зразку. Одна поділка шкали мікроамперметра відповідає напруженості магнітного поля 2 Е.

При відліку показань приладів ручка перемикача полярності П повинна знаходитися у лівому положенні (+). Дані вимірювань занести до табл. 7.1.

Таблиця 7.1.

Н		В		μ
Е	А/м	Гс	Тл	
...	...	...	...	...

Отримання даних для побудови гістерезисної петлі

Після зняття основної кривої намагнічування струм у намагнічувальній котушці пермеаметру за допомогою ступінчастого реостата R1 (розпочинаючи з 1-го його ступеня) поступово знижують до мінімального значення. Ручка перемикача П при цьому нерухома і знаходиться у лівому положенні (+). Кожне наступне підвищення опору реостата R1 і відповідне зниження намагнічувального струму супроводжується відліком показань приладів: вимірника напруженості магнітного поля (мікроамперметр) та вимірника індукції (пермеаметр). При максимальному опорі реостата R1 ручка перемикача П встановлюється у середнє положення («0»), при якому ланцюг намагнічувальної котушки розмикається. У цьому положенні перемикача П відраховується залишкова індукція B_r у зразку. Після перестановки ручки перемикача П в праве положення (–), що приводить до зміни напрямку магнітного поля на протилежний, визначаються значення напруженості магнітного поля (зі знаком мінус) та індукції після кожного наступного зниження опору реостата R1. Робота триває до зняття лівої частини повної гістерезисної петлі. Дані вимірювань слід заносити до табл. 7.2.

Таблиця 7.2.

Н		В	
Е	А/м	Гс	Тл
...	...	...	...

Обробка результатів експерименту

1. Перевести виміряні значення магнітної індукції та напруженості магнітного поля в одиниці СІ.

2. Побудувати основну криву намагнічування. За графіком визначити значення початкової і максимальної відносної магнітної проникності. Початкова відносна магнітна проникність визначається за нахилом дотичної в точці, яка відповідає початку основної кривої намагнічування (рис. 7.3), а максимальна відносна магнітна проникність – за максимальним нахилом дотичної, проведеної з початку координат до основної кривої намагнічування, за формулою $\mu = \Delta B / (\mu_0 \Delta H)$, де μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Значення В і Н можна брати з будь-яких, побудованих на відповідних дотичних, трикутників (не забувайте про масштабний фактор!).

3. Розрахувати та побудувати залежність відносної магнітної проникності від напруженості магнітного поля. Для побудови цієї залежності вихідною є основна крива намагнічування В(Н). Значення відносної магнітної проникності розраховують в залежності від використаних одиниць вимірювання по одній з формул:

$$\mu = B[\text{Тл}] / (4\pi 10^{-7} [\text{Гн/м}] \cdot H[\text{А/м}]); \mu = B[\text{Гс}] / H[\text{Е}].$$

Результати розрахунків занести в табл. 7.1.

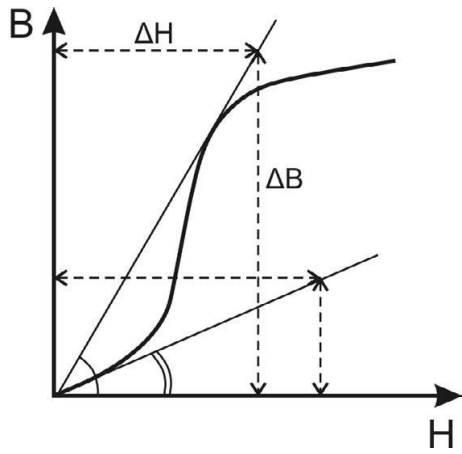


Рис. 7.3. Пояснення до визначення значень початкової та максимальної магнітних проникностей.

4. Побудувати граничну петлю гістерезису (права сторона петлі гістерезису будується симетричною побудованій за експериментальними даними лівій стороні) та визначити індукцію насичення B_s , залишкову індукцію B_r і коерцитивну силу H_c .

Завдання для самостійної підготовки

1. Природа взаємодії речовини з магнітним полем.
2. Фізична суть процесу намагнічування феромагнетиків і утворення доменної структури.
3. Природа впливу зовнішніх факторів на магнітні властивості феромагнетиків.
4. Механізм та області застосування магнітострикції.
5. Шляхи поліпшення частотних характеристик магнітних матеріалів.
6. Вплив відпалювання та загартовування на магнітні властивості металевих феромагнетиків?
7. Области застосування магнітних матеріалів з врахуванням вашої спеціальності

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення основних фізичних величин та технічних параметрів, які характеризують магнітні властивості.
2. Чим зумовлені магнітні властивості різних матеріалів?
3. Як класифікуються матеріали у відповідності з їхніми магнітними властивостями?
4. Які показники властивостей магнітних матеріалів є основними?
5. Опишіть природу феромагнетизму і принципи класифікації феромагнітних матеріалів?
6. Як магнітні властивості матеріалів пов'язані з їхньою структурою?
7. Як визначають основні показники властивостей феромагнітних матеріалів?
8. Які зовнішні фактори впливають на магнітні властивості феромагнетика?
9. Чим зумовлені магнітні втрати у магнітних матеріалах і як можна їх зменшити?
10. Які області використання мають магнітом'які і магнітотверді феромагнетики?

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Властивості діелектричних матеріалів

Електропровідність діелектрика – властивість проводити під дією незмінного в часі електричного поля незмінний в часі електричний струм, зумовлений наскрізним спрямованим рухом вільних носіїв заряду в матеріалі під дією електричного поля. В чистому вигляді електропровідність діелектрика проявляється після закінчення експоненційно спадаючих з часом поляризаційних струмів, викликаних обмеженим зміщенням зв'язаних зарядів в діелектрику (поляризацією).

Електропровідність діелектриків дуже мала, але має місце завжди, бо при будь-яких температурах та напруженостях електричного поля в діелектриках завжди існує певна кількість вільних носіїв заряду. Природа вільних носіїв заряду в діелектрикові визначається його агрегатним станом, складом та будовою речовини.

Так, електропровідність газоподібних діелектриків зумовлюється в основному процесами іонізації газу під дією зовнішніх іонізуючих факторів (рентгенівські, ультрафіолетові та космічні промені, радіоактивне випромінювання природного чи штучного походження), теплової дії (температури вище 4000...6000 K) чи дії електричного поля (область сильних полів з напруженістю поля 1 Мв/м і більше).

В рідких діелектриках, крім іонізації причиною появи вільних носіїв заряду є процеси термічної та електролітичної дисоціації. Ступінь дисоціації і, отже, електропровідність діелектрика визначаються природою його молекул. В неполярних діелектриках дисоціюють лише домішкові молекули. Тому рафіновані (старанно очищені від домішок) неполярні рідини мають низьку електричну провідність. У полярних рідинах окрім домішкових молекул дисоціюють власні молекули, причому ступінь дисоціації зростає зі збільшенням електричного моменту молекул рідини. Саме тому концентрація вільних іонів в полярних рідинах більша, ніж в неполярних, і полярні рідкі діелектрики використовують в електроізоляційній техніці тільки як конденсаторні матеріали, коли необхідна електрична ізоляція з підвищеною діелектричною проникністю (силові та імпульсні конденсатори).

В твердих діелектриках ширина забороненої зони більша 3 еВ, тому збудження валентних електронів і перехід їх в зону провідності мало ймовірні і електропровідність носить здебільшого іонний характер, причому походження вільних носіїв визначається типом хімічного зв'язку і будовою речовини. Так, електропровідність неполярних та іонних діелектриків з щільною упаковкою при помірних температурах зумовлюється, в основному, домішковими іонами, електропровідність полярних і іонних діелектриків з нещільною упаковкою (сюди слід віднести і аморфні іонні діелектрики) – домішковими та власними іонами.

Причиною появи власних вільних носіїв заряду в твердих діелектриках є такі процеси, як іонізація внаслідок дії частинок високої енергії, наприклад радіаційного фону Землі, що зумовлює незначну електронну провідність, дисоціація (процес розпаду молекул на іони при теплових зіткненнях, фізичній чи хімічній взаємодії) та термогенерація (утворення слабо зв'язаних іонів внаслідок переходу їх в міжвузловини, значно рідше вільних електронів внаслідок переходу валентних електронів в зону провідності за рахунок флуктуацій теплової енергії, особливо при наявності домішкових енергетичних рівнів в забороненій зоні діелектрика).

При високих температурах і в сильних полях електропровідність твердих діелектриків може носити електронний (дірковий) характер. При звичайних умовах електронна (діркова) електропровідність характерна тільки для сегнетоелектричних матеріалів на основі титанату барію та деяких карбідів і нітридів, наприклад нітриду кремнію.

Електропровідність діелектриків характеризується такими фізичними характеристиками, як питома провідність γ , що дорівнює відношенню густини наскрізного струму до напруженості електричного поля, чи оберненою їй величиною – питомим опором ρ , що є основним технічним параметром діелектричних матеріалів.

За нормальних умов питомий опір діелектрика має значення понад 10^8 Ом•м.

Найбільш значимими фактори зовнішнього середовища, які впливають на питому провідність твердих діелектриків є температура T та вологість H . Вони змінюють як концентрацію вільних носіїв заряду в діелектрикові n , так і їхню рухливість u , внаслідок чого

$$\gamma = en(T,H)u(T,H) = \gamma(T,H)$$

Збільшення температури приводить до експоненціального збільшення концентрації вільних носіїв заряду внаслідок зростання ступеня дисоціації молекул діелектрика або інтенсивності термогенерації вільних носіїв заряду

$$n(T) \sim \exp(-W_g/kT)$$

де W_g – енергія активації процесу утворення вільного носія заряду, і до такого ж зростання їх рухливості

$$u(T) \sim \exp(-W_n/kT)$$

де W_n – енергія активації процесу переносу носіїв заряду між рівноважними положеннями.

За наявності носіїв одного типу можна записати

$$\gamma = A \exp(-W/kT),$$

а для температурної залежності електричної провідності твердого діелектрика, що містить n типів носіїв

$$\gamma(T) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-W_i / kT)$$

де W_i – енергія активації електропровідності $W_i = W_{gi} + W_{ni}$.

Реакція діелектрика на зволоження визначається характером взаємодії матеріалу з полярними молекулами води. Вплив вологи на електропровідність діелектрика зумовлюється сорбцією (поглинанням) вологи поверхнею та об'ємом твердого тіла. Поверхнева сорбція води (адсорбція), яка значно інтенсивніша, особливо у випадку полярних діелектриків, приводить до зміни поверхневого опору R_s матеріалу; при об'ємній сорбції (абсорбції) змінюється і об'ємний опір R_v . Зростання провідності при зволоженні відбувається внаслідок як дисоціації адсорбованих чи абсорбованих молекул надзвичайно полярної речовини води, так і в результаті розчинення домішок та самого діелектрика при сильному зволоженні.

Неполярні діелектрики не змочуються водою і не поглинають її, тому підвищення вологості навколишнього середовища слабо впливає на їхню поверхневу та об'ємну провідності.

Полярні діелектрики змочуються водою, їхня поверхнева провідність в значній мірі залежить від вологості навколишнього середовища та від поверхневих забруднень. Вплив вологи на об'ємну провідність залежить при цьому від щільності матеріалу. Найбільш чутливі до вологи пористі діелектрики, які не тільки звожуються поверхнево, а й поглинають велику кількість води завдяки капілярному ефекту.

Іонні діелектрики змочуються водою та можуть частково розчинятися в ній, тому їх поверхнева електропровідність також досить чутлива до вологості навколишнього середовища. Саме волога є основною причиною неможливості використання водорозчинних діелектриків в електроустаткуванні.

При використанні чутливих до зволоження, особливо пористих, а також рідких електротехнічних матеріалів необхідно забезпечити їх захист від зволоження шляхом, наприклад, герметизації або використання вологонепроникного і вологостійкого покриття.

Суттєва різниця вкладу R_s і R_v в загальний опір діелектричної конструкції привела до необхідності їх виокремлення і введення крім такої загальної характеристики, як питомий опір ρ , окремих характеристик для поверхневої електропровідності діелектриків – питомий поверхневий опір ρ_s та об'ємної електропровідності – питомий об'ємний опір ρ_v .

Питомий поверхневий опір ρ_s діелектричного матеріалу за значенням дорівнює поверхневому опору плоскої ділянки поверхні твердого діелектрика в формі квадрата довільного розміру при протіканні наскрізного струму між двома протилежними сторонами цього квадрата.

Питомий об'ємний опір ρ_v матеріалу за значенням дорівнює об'ємному опору куба з твердого діелектрика з ребром 1 м при протіканні наскрізного струму (постійна складова) між двома протилежними гранями цього куба.

Поляризація діелектриків

Поляризація – стан речовини, який характеризується тим, що сумарний електричний момент M (для одиничного диполя електричний момент дорівнює добутку заряду на плече), для даного об'єму цієї речовини має значення, відмінне від нуля.

Електричний момент одиниці об'єму речовини

$$P=M/V,$$

де $\vec{M} = \sum_{n,m} (\alpha + \mu^2 / 3kT) \vec{E}$ – наведений електричний момент, V – об'єм речовини,

n – загальне число іонів, атомів чи молекул в даному об'ємі речовини, m – загальне число полярних молекул, α – поляризованість частинок, μ – електричний момент полярних молекул), визначає значення відносної діелектричної проникності $\epsilon_r = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} = 1 + \chi_r$, де χ_r – діелектрична сприйнятливість. Відносна діелектрична проникність ϵ_r дорівнює відношенню абсолютної діелектричної проникності діелектрика до електричної сталої (абсолютної діелектричної проникності вакууму) $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м і є основною характеристикою здатності діелектрика поляризуватися в зовнішньому електричному полі.

Процес поляризації пов'язаний з обмеженим зміщенням зв'язаних зарядів або орієнтацією полярних молекул під дією електричного поля. В результаті збільшення поверхневої густини вільних зарядів на електродах і потенціальних елементах при

сталій напрузі джерела живлення при поляризації відбувається зростання ємності конденсаторів та ізоляції діелектричних конструкцій.

В залежності від типу зв'язаних зарядів у речовині, яка поляризується, розрізняють такі види поляризації: електронна, іонна та дипольна, а в залежності від характеру руху – пружна та релаксаційна. Вказівку на пружний характер зазвичай опускають, а тому терміни електронна та іонна відносяться до пружної поляризації. До непружної поляризації належать дипольно-релаксаційна, іонно-релаксаційна, електронно-релаксаційна та такі специфічні види поляризації як міграційна, а також спонтанна і електретна (заморожена), які характерні для неоднорідних та активних діелектриків відповідно. Слід зауважити, що внаслідок нелінійної залежності енергії взаємодії дипольних молекул з електричним полем, у загальному випадку пружна дипольна поляризація не має місця.

Механізми поляризації покладені в основу класифікації лінійних однорідних діелектриків, відносна діелектрична проникність яких не залежить від поля. В залежності від переважаючих механізмів поляризації розрізняють наступні групи діелектриків.

1. Неполарні, для яких характерна електронна поляризація (наприклад, поліетилен, фторопласт–4, полістирол, парафін, сірка та ін.) з типовими значеннями $\epsilon_r = 1,9 \dots 2,7$ при нормальних умовах;

2. Полярні, для яких характерні електронна та дипольно-релаксаційна поляризації (наприклад, целюлоза, полівінілхлорид, поліаміди, поліефіри, фенолформальдегідні смоли, епоксидні смоли та ін.) з типовими значеннями $\epsilon_r = 3 \dots 7$;

3. Іонні діелектрики з щільною упаковкою іонів, для яких характерні механізми електронної та іонної поляризації (наприклад, кварц, корунд, слюда, оксиди алюмінію, магнію та ін.) з типовими значеннями $\epsilon_r = 4 \dots 30$, а для кристалів, що містять іони титану, ϵ_r навіть більше 100;

4. Іонні діелектрики з нещільною упаковкою іонів та аморфні діелектрики, для яких характерні механізми електронної, іонної, іонно-релаксаційної та зрідка електронно-релаксаційної поляризації (наприклад, ситали, скло та деякі види кераміки) з типовими значеннями ϵ_r від 5... 15 до 30... 40.

Із нелінійних діелектриків слід відзначити сегнетоелектрики – діелектрики із спонтанною поляризацією, діелектрична проникність яких може досягати значень $10^2 \dots 10^3$, а в температурних максимумах навіть до 10^4 .

Відносна діелектрична проникність композиційних діелектриків має значення, що лежить між ϵ_r компонентів.

Значення діелектричної проникності діелектриків визначається щільністю зв'язаних зарядів, які приймають участь у процесі поляризації, та залежить від частоти електричного поля і температури. Необхідно запам'ятати, що вклад кожного механізму в процес поляризації можливий лише до певних частот, при яких зв'язаний заряд встигає стежити за змінами зовнішнього електричного поля. В залежності від інерційності процеси поляризації поділяється на швидкі (електронна та іонна) та повільні (релаксаційна та міграційна) види.

Електронна поляризація характерна для будь-якого діелектрика. Вона пов'язана з пружним зміщенням та деформацією електронних оболонок атомів та іонів. Відносна діелектрична проникність ϵ_r при електронній поляризації зв'язана з показ-

ником заломлення v співвідношенням $\epsilon_r = v^2$. При вищих частотах $\epsilon_r = 1$, як і у вакуумі. Час встановлення електронної поляризації дуже малий – близько 10^{-15} с. Тому вона проявляється на всіх частотах, аж до $10^{14} \dots 10^{16}$ Гц.

Іонна поляризація зумовлена пружним зміщенням різнойменно заряджених іонів відносно стану рівноваги у вузлах кристалічної ґратки. Цей механізм поляризації характерний для діелектриків з іонною будовою. Час встановлення іонної поляризації – порядку 10^{-13} с.

У випадку пружної поляризації з наближенням до резонансної частоти діелектрична проникність дещо зростає, потім різко знижується і знов зростає до чергового стабільного рівня (аномальна дисперсія діелектричної проникності, що для електронної поляризації аналогічна аномальній дисперсії показника заломлення).

При релаксаційній поляризації діелектрична проникність плавно зменшується до стабільного рівня (нормальна дисперсія діелектричної проникності). Області нормальної дисперсії відповідають частоти електромагнітних коливань з півперіодом порядку постійної часу релаксаційної поляризації. Область дисперсії зміщується в область вищих частот при підвищенні температури.

Електронно-релаксаційна поляризація пов'язана з непружним зміщенням слабо зв'язаних електронів або дірок, а в деяких іонних діелектриках крім того – певного виду структурних дефектів, так званих центрів. Час встановлення цієї поляризації $10^{-2} \dots 10^{-7}$ с.

Іонно-релаксаційна поляризація зумовлена непружним зміщенням слабо зв'язаних іонів в іонних діелектриках з нещільною кристалічною ґраткою та в аморфних іонних діелектриках. Час встановлення цього механізму поляризації залежить від температури та особливостей структури діелектрика та складає при кімнатних температурах $10^{-4} \dots 10^{-10}$ с.

Дипольно-релаксаційна поляризація характерна для газоподібних та молекулярних діелектриків з іонно-ковалентним зв'язком, що мають молекули з електричним моментом, відмінним від нуля, та зв'язана з непружною орієнтацією цих молекул. Час встановлення дипольно-релаксаційної поляризації для різних діелектриків знаходиться у межах $10^{-4} \dots 10^{-8}$ с.

Міграційна поляризація зумовлюється перерозподілом вільних зарядів в об'ємі неоднорідного діелектрика та їхнім накопиченням на границях областей з різними електрофізичними властивостями.

Цей механізм поляризації – найповільніший. Час його становлення для різних діелектриків знаходиться у діапазоні $10^2 \dots 10^4$ с. Спад діелектричної проникності для міграційної поляризації спостерігається у відповідній низькочастотній області ($10^{-2} \dots 10^5$ Гц).

В нелінійних діелектриках (сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, піроелектрики) до певної температури крім наведених видів поляризації спостерігається спонтанна (самодовільна) поляризація, яка виникає внаслідок міжчасткової (міжіонна, міждипольна) взаємодії при відсутності електричного поля. Частотний діапазон проявлення спонтанної поляризації приблизно відповідає частотному діапазону іонно- чи дипольно-релаксаційної поляризації.

Температура навколишнього середовища також сильно впливає на процес поляризації в діелектриках. Характер залежності діелектричної проникності від температури визначається природою матеріалу та частотою електричного поля. Реакцію діелектрика на зміну температури прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом діелектричної проникності $TK\epsilon = (1/\epsilon)(d\epsilon/dT)$.

У випадку електронної поляризації наведений електричний момент не залежить від температури. Разом з тим, внаслідок зменшення кількості частинок, що поляризуються, в одиниці об'єму речовини, відносна діелектрична проникність діелектрика при електронній поляризації з ростом температури буде дещо зменшуватися (рис. Д1.1, крива 1).

У випадку іонної поляризації поляризованість іонних молекул або пружно зв'язаних іонів в кристалічній ґратці і відносна діелектрична проникність з ростом температури збільшуються, бо в результаті розширення нагрітого тіла іони можуть зміщуватися на більші відстані. Температурний коефіцієнт відносної діелектричної проникності при цьому позитивний та постійний у широкому діапазоні температур (рис. Д1.1, крива 2).

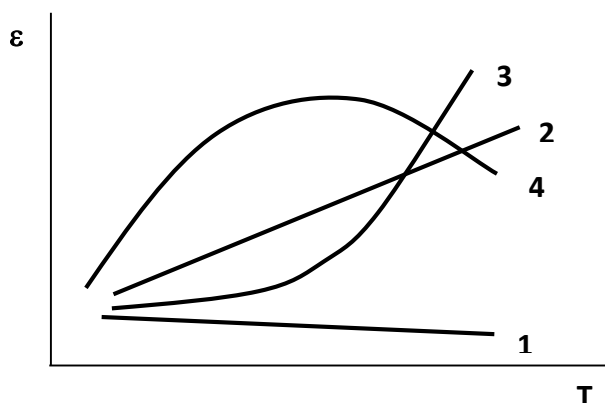


Рис. Д1.1. Схематична температурна залежність відносної діелектричної проникності для діелектриків з різними видами поляризації.

Збільшення температури матеріалу з домінуючим іонно-релаксаційним механізмом поляризації експоненціально збільшує концентрацію часток, які приймають участь в процесі поляризації. Тому температурна залежність діелектричної проникності матеріалу з іонно-релаксаційною поляризацією характеризується позитивним $TK\epsilon$, який збільшується з ростом температури (рис. Д1.1, крива 3).

Максимум діелектричної проникності у ряді випадків не спостерігається через неперервне зростання концентрації слабо зв'язаних іонів, які приймають участь в поляризації.

Електричний момент конденсованої речовини з полярними молекулами визначається ступенем орієнтації цих молекул по напрямку зовнішнього поля. При низьких температурах енергія полярних молекул недостатня для подолання потенціальних бар'єрів. Із зростанням температури сили зв'язку молекул послабляються, що сприяє поляризації речовини, і відносна діелектрична проникність речовини збільшується. Однак при підвищених температурах енергія теплового (хаотичного) руху молекул послаблює орієнтуючу дію електричного поля, в результаті чого відносна діелектрична проникність, що визначається ступенем орієнтації полярних молекул в речовині, зменшується, і в цілому відносна діелектрична проникність проходить через максимум (рис. Д1.1, крива 4).

Діелектричні втрати

Діелектричними втратами називають активну електричну потужність, що виділяється у вигляді тепла в діелектрикові при дії на нього електричного поля. Діелектричні втрати в матеріалі зумовлюються процесами, що протікають за рахунок енергії зовнішнього електричного поля: направленим переносом вільних носіїв заряду (діелектричні втрати на електропровідність), непружним зміщенням зв'язаних зарядів або орієнтацією полярних молекул (релаксаційні втрати), іонізацією газу (іонізаційні втрати), перерозподілом вільних носіїв заряду в неоднорідному діелектрикові (втрати внаслідок абсорбційних процесів), орієнтацією доменів у сегнетоелектриках (втрати на переполяризацію), пружну електронну чи іонну поляризацію в області аномальної дисперсії діелектричної проникності (резонансні втрати).

Діелектричні втрати викликають підвищення температури діелектрика, що може призвести до прискореного старіння або до теплового пробою, особливо якщо діелектричні втрати пов'язані з електропровідністю.

Для оцінки діелектричних втрат в ізоляції електротехнічних виробів використовують такі характеристики: повну потужність діелектричних втрат, що характеризують діелектричну конструкцію в загальному, та характерні для кожного діелектрика, питому потужність діелектричних втрат, тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$, коефіцієнт діелектричних втрат $\epsilon_r \operatorname{tg}\delta$.

Значення $\operatorname{tg}\delta$ у залежності від природи матеріалу знаходиться у діапазоні від 10^{-5} до 10^{-1} . Про умови можливої експлуатації діелектрика судять також за значенням коефіцієнта діелектричних втрат $\epsilon_r \operatorname{tg}\delta$. Так, матеріали з малим значенням $\epsilon_r \operatorname{tg}\delta$ перспективні для високовольтної та високочастотної ізоляції, з більшим значенням – можуть використовуватися в низьковольтних та низькочастотних конструкціях.

Як значення параметрів, що характеризують діелектричні втрати, так і їх поведінка при дії зовнішніх факторів визначаються будовою речовини.

У випадку однорідних неполярних та іонних діелектриків з щільною упаковкою $\operatorname{tg}\delta$ складає $10^{-5} \dots 10^{-4}$, діелектричні втрати визначаються, в основному, втратами на домішкову електропровідність, бо процеси поляризації з пружним зміщенням зв'язаних зарядів протікають без втрат енергії в області низьких частот зовнішнього поля.

Для аналізу діелектричних втрат на електропровідність за допомогою кута діелектричних втрат часто використовується паралельна еквівалентна схема діелектрика з втратами, векторна діаграма якої показана на рис. Д1.2.

У однорідних полярних, а також іонних діелектриках з нещільною упаковкою діелектричні втрати включають в себе втрати на електропровідність та релаксаційні втрати, і $\operatorname{tg}\delta$ досягає значень $10^{-3} \dots 10^{-2}$.

Для газоподібних діелектриків в різко неоднорідному електричному полі, а також у твердих або рідких діелектриках, що містять газові порожнини, при високих напругах, крім вказаних втрат, виникають іонізаційні втрати, пов'язані з частковими розрядами в газових порожнинах твердих та рідких діелектриків

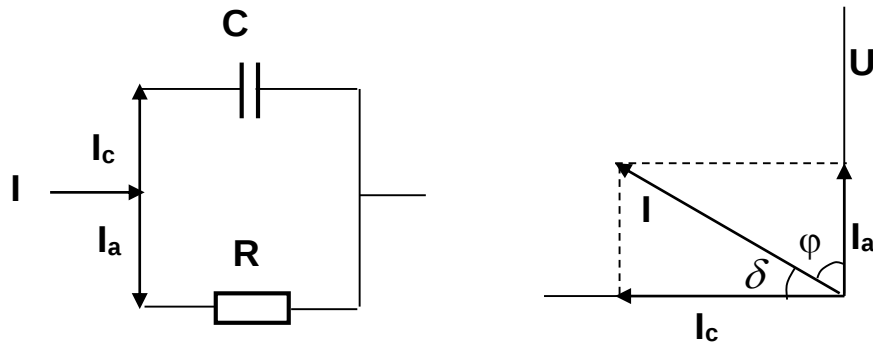
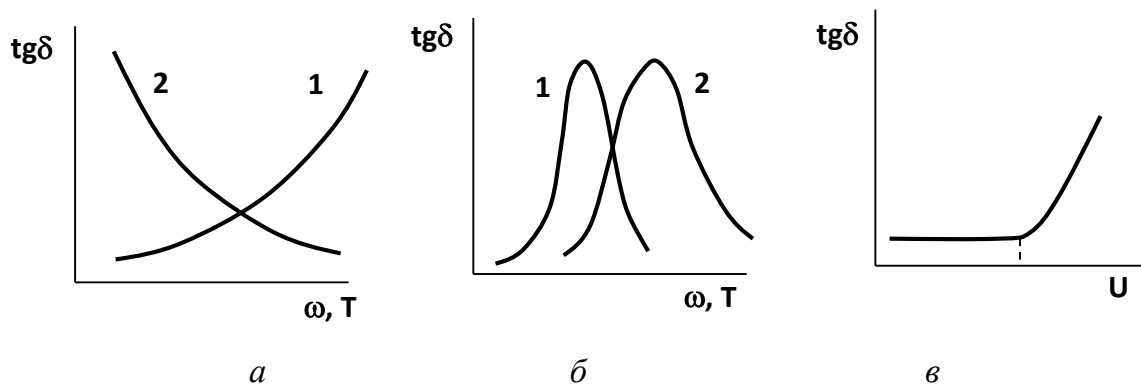


Рис. Д1.2. Схема заміщення і фазова діаграма діелектрика з втратами на електропровідність.

Для втрат на електропровідність характерна експоненційно зростаюча залежність $\operatorname{tg}\delta$ від температури (рис. Д1.3, а, крива 1) та гіперболічна – від частоти (рис. Д1.3, а, крива 2). При релаксаційних втратах $\operatorname{tg}\delta$ має максимум в залежності від температури (рис. Д1.3, б, крива 1) та від частоти (рис. Д1.3, б, крива 2). Іонізаційні втрати з'являються лише при напругах, що перевищують напругу виникнення часткових розрядів $U_{\text{вчр}}$ в газових порожнинах твердих і рідких діелектриків, і різко зростають з підвищенням напруги. (рис. Д1.3, в).

Ідентифікацію механізму діелектричних втрат важко провести за одноразовим виміряним значенням $\operatorname{tg}\delta$. Більш повну інформацію про природу діелектричних втрат дають саме функціональні залежності $\operatorname{tg}\delta$ від частоти електричного поля, його напруженості, а також температури навколишнього середовища, оскільки кожний вид діелектричних втрат характеризується своєю реакцією на зміну зовнішніх умов.

При виборі матеріалу в процесі конструювання електротехнічного виробу необхідно знати вид та порядок значень діелектричних втрат, що можуть мати місце в його ізоляції при заданих умовах експлуатації, щоб гарантувати експлуатаційну надійність і ресурс виробу.



а – втрати на електропровідність, б – релаксаційні втрати,
в – іонізаційні втрати.

Рис. Д1.3. Характерні залежності $\operatorname{tg}\delta$ від температури – 1, частоти – 2 і напруги для різних механізмів діелектричних втрат.

Приведені в довідковій літературі дані по $\operatorname{tg}\delta$ відповідають певним умовам вимірювання, а тому при їх використанні слід пам'ятати, що діелектричні втрати в матеріалі залежать від зовнішніх чинників (частоти та напруженості електричного поля, температури та вологості навколишнього середовища).

Пробій діелектриків

Всі діелектрики зберігають свої електроізоляційні властивості тільки до певного значення напруженості електричного поля, після чого виникає пробій. Пробоєм називається явище утворення у діелектрикові провідникового каналу під дією сильного електричного поля. Здатність діелектрика витримувати дію електричного поля оцінюється його електричною міцністю. Електрична міцність діелектрика – мінімальна напруженість однорідного електричного поля, що приводить до пробою діелектрика. Вона є характеристикою матеріалу при електричному пробіі.

Стійкість електроізоляційних конструкцій до дії сильних електричних полів можна оцінювати за значеннями пробивної напруги. Пробивна напруга – мінімальна, прикладена до ізоляції електрична напруга, що призводить до її пробою. Пробивна напруга залежить від конфігурації електричного поля і геометричних розмірів ізоляції, і саме тому характеризує діелектричну конструкцію, а не матеріал. Часто пробивну напругу ізоляції називають електричною міцністю ізоляції на відміну від електричної міцності діелектрика, яка визначається мінімальною електричною напруженістю пробою в однорідному полі.

В залежності від причини зростання провідності розрізняють два основних механізми пробою: електричний та тепловий

При електричному пробіі зростання провідності діелектрика зумовлюється ударною іонізацією електронами, прискореними під дією електричного поля, та інколи, в суміші газів, фотоіонізацією частинок діелектрика при гашенні збудження молекули одного газу, якщо енергія його збудження більша за енергію іонізації другого газу. Цей механізм пробою є домінуючим для газоподібних діелектриків. При певних умовах (низька температура, короткий імпульс напруги) він може бути відповідальним і за пробій рідких та твердих діелектриків. З врахуванням специфіки механізму їх електропровідності під іонізацією у цьому випадку слід розуміти перекидання електронів із валентної зони в зону провідності.

Тепловий механізм пробою виникає в твердих діелектриках в тому випадку, коли порушується теплова рівновага між діелектричними втратами і теплотою, що відводиться у навколишнє середовище з поверхні діелектрика. При цьому зростання провідності діелектрика зумовлюється збільшенням концентрації іонів при розігріванні діелектрика під дією електричного поля внаслідок переходу іонів з вузлів у міжвузля, термодисоціації молекул або генерації вільних електронів шляхом термоактивованого переходу з валентної зони в зону провідності. При тепловому механізмі пробою пробивну напругу і електричну міцність не можна вважати однозначними характеристиками матеріалу чи конструкції, оскільки вони в значній мірі залежать від умов відведення від діелектрика виділеної в ньому теплоти. Цю обставину слід враховувати при використанні довідникових даних про електричну міцність технічних діелектриків.

Пробій газоподібних діелектриків

Найпоширеніший з газоподібних діелектриків повітря є середовищем, що практично завжди виконує роль електричної ізоляції в електротехнічному обладнанні. Воно служить ізоляцією у повітряних лініях електропередачі та між зовніш-

німи виводами електричних апаратів, конденсаторів, електричних машин та трансформаторів. В сучасних високовольтних апаратах та розподільних пристроях як основний електроізоляційний матеріал все частіше використовують елегаз (шестифтористу сірку), що при нормальних умовах має в 2.5 рази більшу у порівнянні з повітрям електричну міцність.

В газі завжди існує невелика кількість позитивних та негативних іонів, а також електронів, що утворюються під дією зовнішніх іонізуючих факторів: космічного та ультрафіолетового проміння, радіаційного фону Землі, випромінювань радіоактивних речовин тощо і зумовлюють питому провідність газу на рівні 10^{-15} См м⁻¹.

Пробій газів пов'язаний з явищами ударної іонізації та у деяких випадках фотоіонізації при пробіі суміші газів. В електричному полі заряджені частинки починають переміщуватися, набуваючи при цьому додаткову енергію. Здобута зарядженими частинками на довжині вільного пробігу енергія.

$$W = q E \lambda = q U_{\lambda}$$

де q – заряд, E – напруженість поля, U_{λ} – різниця потенціалів на довжині вільного пробігу λ , передається атомам або молекулам газу, з якими ці частинки зіштовхуються. При пружному зіткненні електронів з нейтральними частинками вони передають незначну ($< 5 \cdot 10^{-4}$) частину своєї енергії, що не заважає накопиченню енергії електрона з часом. Коли накопичена енергія W після певної кількості вільних пробігів, що закінчувалися пружними зіткненнями, достатньо велика, то може відбутися непружне зіткнення, яке супроводжується збудженням молекул, пов'язаним з переходом електронів на більш віддалену від ядра орбіталь, або іонізацією атомів чи молекул газу, тобто розщепленням їх на електрони та позитивні іони. Слід пам'ятати, що одному непружному зіткненню у не дуже розрідженому газі передують кілька, іноді багато пружних зіткнень.

Результатом непружних зіткнень є світіння каналу розряду при гасінні збудженого стану (перехід збуджених частинок газу у рівноважний стан супроводжується випромінюванням фотонів з відповідною енергією), а також збільшення кількості вільних носіїв заряду та його електричної провідності в результаті іонізації газу. Умовою, яка визначає можливість іонізації, є нерівність $W \geq \phi_i$, де ϕ_i – енергія іонізації частинок газу. Критична напруженість поля, при якій стає можливою ударна іонізація і формування провідникового каналу дорівнює

$$E_{\text{пр}} = \phi_i / (e \cdot \lambda)$$

Згенеровані при ударній іонізації електрони в свою чергу прискорюються електричним полем та іонізують інші атоми чи молекули, утворюючи електронну лавину. При високій густині газу поряд з іонізацією може відбуватися протилежний їй процес – рекомбінація. Рекомбінація супроводжується випромінюванням фотона з енергією, що дорівнює енергії іонізації. Поглинання такого фотона якою-небудь іншою частинкою газу в об'ємі може викликати її фотоіонізацію з наступним утворенням нової окремої електронної лавини. При злитті всіх окремих електронних лавин утвориться суцільний канал іонізованого газу – від'ємний стример. Водночас із проростанням від'ємного стримера до аноду відбувається просування зустрічного потоку позитивно заряджених частинок до катоду.

Збільшення тиску призводить до зменшення довжини вільного пробігу електронів у газі, в результаті чого напруженість електричного поля, необхідна для іонізації газу, збільшується. При малому тиску, коли довжина вільного пробігу електронів наближається до відстані між електродами, для набуття енергії, необхідної для іонізації газу в міжелектродному просторі після меншої кількості пружних зіткнень, також вимагається підвищена напруженість поля. Якщо довжина вільного пробігу електронів зрівнюється з відстанню між електродами, електричний пробій стає неможливим. В цьому випадку ми маємо справу з технічним вакуумом, пробій якого зумовлений явищем автоелектронної (холодної) емісії з катода.

Внаслідок того, що для пробою газу, тобто утворення провідникового каналу, необхідна наявність в проміжку певної кількості носіїв ($\sim 10^8$), пробивна напруга газу визначається добутком його тиску P на довжину проміжку, а не кожним з цих факторів окремо (закон Пашена). Кількісно ця залежність описується формулою Пашена, згідно якої залежність пробивної напруги від добутку тиску на відстань між електродами має екстремальний характер з мінімумом, наприклад для повітря та електродів із міді він має місце при $P \cdot d = 0,75$ Па·м. Мінімальна пробивна напруга при цьому дорівнює 327 В.

Електрична міцність газу визначається і його складом. Наявність у газі електронегативних компонентів (наприклад, парів води), здатних захопити вільні електрони з утворенням негативних від'ємних іонів, збільшує електричну міцність газу. Саме ця обставина є причиною того, що електрична міцність повітря у однорідному полі при довжині проміжку порядку 1 см та нормальних умовах складає близько 3 МВ/м, а значно електронегативнішого елегазу – 7,5 МВ/м. В той же час пробивна напруга інертного газу гелію, що має максимальну енергію іонізації 24,6 еВ, в 17 раз менша, ніж повітря, енергія іонізації якого 13,6 еВ.

Великий вплив на пробивну напругу газу має ступінь однорідності електричного поля. В неоднорідному полі пробій газу починається з виникнення коронного розряду в місцях з критичною напруженістю електричного поля, внаслідок чого відбувається подальше викривлення поля та зниження пробивної напруги, яка в цьому випадку характеризує стійкість до пробою електроізоляційної конструкції, а не використаних у цій конструкції матеріалів.

При нормальних умовах газова ізоляція має досить низьку електричну міцність. Сприяє її підвищенню використання стиснутих газів. До позитивних особливостей газової ізоляції відноситься швидке відновлення її електроізоляційних властивостей після зняття електричної напруги.

До недоліків газової ізоляції в першу чергу слід віднести відсутність конструкційних властивостей (здатності сприймати механічні навантаження).

Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики (трансформаторне масло та ін.) широко використовуються у високовольтному обладнанні для просочення ізоляції кабелів, високовольтних вводів та конденсаторів, а також для заповнення трансформаторів, вимикачів та вводів. У другому випадку рідкі діелектрики ефективно виконують додаткові функції відведення теплоти або середовища для гасіння дуги. Конструкційні властивості так само не властиві для рідких діелектриків, як і для газоподібних.

Електрична міцність рідких діелектриків складає 10...25 МВ/м. Підвищені значення її у порівнянні з газоподібними діелектриками зумовлені зменшеною довжиною вільного пробігу електронів. Пробій дуже чистого та вільного від газу рідкого діелектрика пов'язують з двома основними процесами – ударною іонізацією електронами та холодною емісією з катода.

Електрична міцність ретельно очищених рідких діелектриків залежить від багатьох факторів: температури, тиску, частоти та форми кривої напруги, форми та матеріалу електродів. У випадку технічно чистих рідин слід відзначити сильний вплив на формування пробою домішок, які викликають викривлення поля. Пробій таких рідин пояснюється частковим перегрівом рідини та закипанням її в місцях найбільшої кількості домішок, що призводить до утворення газового містка між електродами та різкого зниження електричної міцності діелектрика. Для отримання високоякісних електроізоляційних рідин у технологічному процесі передбачають операції рафінування одержаного продукту.

Як і у випадку газоподібних діелектриків рідкі діелектрики відновлюють свої електроізоляційні властивості після вимкнення напруги, але цей процес набагато повільніший, бо пов'язаний з процесами зникнення газових бульбашок, що утворилися внаслідок розкладання рідини високотемпературною дугою.

Пробій твердих діелектриків

До основних переваг твердих діелектриків відноситься те, що вони можуть одночасно виконувати функції електричної ізоляції та використовуватися як конструктивні елементи, що сприймають механічне навантаження. Ця особливість дозволяє різко зменшувати розміри електроізоляційних конструкцій та зумовлює дуже широке застосування твердих діелектриків в різноманітних пристроях, де використовується електрика.

Пробій твердої ізоляції у процесі експлуатації не допускається, бо характерним недоліком твердих діелектриків є те, що після пробою вони не відновлюють свої ізоляційні властивості. Як при електричному, так і при тепловому пробії спостерігається значна або повна втрата електричної міцності твердих діелектриків. Тому, без знання закономірностей зміни електричної міцності твердих діелектриків в залежності від характеру пробою, природи й особливостей будови діелектрика та впливу зовнішніх факторів неможливі конструювання та правильна експлуатація електрообладнання.

Необхідно звернути увагу на відмінність у значеннях поняття електричної міцності діелектричних матеріалів та діелектричних конструкцій. У першому випадку це найменша напруженість однорідного електричного поля, при якій відбувається пробій діелектрика, в другому – максимальна напруга, що витримується діелектричною конструкцією без пробою.

Якщо враховувати, що пробивна напруга при тепловому пробії може регулюватися шляхом інтенсифікації тепловідведення, то знання форми пробою має практичне значення. Для визначення форми пробою можна використати різні критерії.

Згідно з теорією електричного пробою Фрьоліха пробивна напруженість твердих діелектриків слабо зростає в області низьких температур та експоненціально

знижується в області високих. Експоненціальний спад електричної міцності від температури згідно теорії теплового пробоя Фока – Вальтера – Семенова спостерігається і при тепловому пробі. Тому незалежність $U_{пр}$ від температури в певному інтервалі низьких температур свідчить про електричний пробій.

Більш чітко зробити вибір між електричним та тепловим пробоем можна, якщо використати залежність пробивної напруги від частоти та від часу прикладення напруги. При електричному пробі $U_{пр}$ в області низьких частот слабо залежить від частоти та форми діючої напруги, бо визначається її амплітудою. При тепловому пробі пробивна напруга визначається діючим значенням, а також величиною діелектричних втрат, внаслідок чого $U_{пр} \sim f^{-0,5}$.

Якщо пробій відбувається в однорідному полі, то при електричному пробі електрична міцність твердих діелектриків слабо залежить від товщини, при тепловому пробі – знижується пропорційно $h^{-0,5}$, а при великих товщинах – по гіперболічному закону, так що у цьому випадку з врахуванням погіршення тепловідводу з об'єму діелектрика пробивна напруга значно слабкіше зростає зі збільшенням товщини діелектрика.

Електрична міцність неоднорідних діелектриків значно знижується при збільшенні площі електродів та товщини діелектрика. Це явище пояснюється наявністю у неоднорідному діелектрику слабких місць, ймовірність попадання яких в міжелектродний простір зростає із збільшенням об'єму діелектрика. При використанні кількох тонких шарів неоднорідного діелектрика, наприклад конденсаторного паперу, ймовірність збігу наскрізних слабких місць мала, тому електрична міцність підвищується до певного числа шарів. При подальшому збільшенні числа шарів $E_{пр}$ знову зменшується. Зазначена закономірність має практичне значення при виборі оптимальної кількості шарів багатошарового діелектрика.

Різка зниження електричної міцності твердого діелектрика може спостерігатися у неоднорідному полі, при зволоженні, порушенні механічної цілісності, старінні під впливом електричного поля, температури, часткових розрядів, механічних напруг, атмосферних факторів.

Для забезпечення надійної роботи твердих діелектриків їхня робоча напруга $U_{роб}$ повинна бути значно нижчою пробивної напруги $U_{пр}$. Відношення $U_{пр}/U_{роб}$ носить назву коефіцієнта запасу за електричною міцністю. Він встановлюється на підставі результатів випробувань матеріалів і досвіду експлуатації електроізоляційних конструкцій з врахуванням впливу перерахованих вище факторів. Для перевірки здатності електричної ізоляції витримувати дію високої напруги при прийнятно-здавальних випробуваннях та в експлуатації ізоляція випробується в обов'язковому порядку нормованою підвищеною напругою. Випробувальні напруги для різних видів електрообладнання на різні класи напруг регламентуються ГОСТ 1516.1–76, методичні питання випробувань – ГОСТ 1516.2–76.

Напівпровідникові матеріали

Загальні властивості напівпровідників

Напівпровідник – речовина, основною властивістю якої є сильна залежність її електропровідності від впливу зовнішніх факторів, що здатні змінити або енергетичний стан електронів у напівпровіднику, або параметри самого напівпровідника.

До зовнішніх факторів звичайно відносять температуру, випромінювання, магнітне та електричні поля, механічні напруги тощо. Характер реакції напівпровідника на зовнішній вплив визначає можливу область його застосування. В табл. 5.1 наведені приклади застосування напівпровідникових матеріалів в залежності від характеру реакції на зовнішню дію.

Таблиця 5.1 – Дія зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників та можливості їх використання

Зовнішній фактор	Реакція матеріалу	Можлива область застосування
Температура T	Зміна провідності	Терморезистори
Випромінювання $h\nu$	Зміна провідності	Фоторезистори, датчики випромінювання
Електричне поле E	Зміна провідності	Варистори, обмежувачі перенапруги, польові прилади
	Генерація високочастотних коливань	Діоди Ганна
Магнітне поле H	Зміна провідності	Магніторезистори
	Виникнення поперечної ЕРС	Датчики Холла, вимірники магнітних полів
Механічне навантаження G	Зміна провідності	Тензорезистори
Градiєнт температури	Виникнення термоЕРС	Термоелектрогенератори, вимірники температури
Контакт напівпровідників	Утворення р–п переходу	Активні елементи електронної техніки

Напівпровідникові властивості характерні для багатьох електротехнічних матеріалів. Систематизацію напівпровідників проводять за рядом класифікаційних ознак. Зокрема, за фазовим станом розрізняють тверді та рідкі напівпровідники, за структурою – кристалічні та аморфні, за складом – прості, утворені атомами одного хімічного елементу, складні, утворені атомами двох або більшого числа хімічних елементів, об'єднаних, як правило, за допомогою ковалентного чи донорно-акцепторного зв'язку, та композиційні, що є механічною сумішшю напівпровідникової та діелектричної фаз. Найважливішою ознакою, що дозволяє віднести дану речовину до напівпровідникових матеріалів є характер їх електропровідності. За цією ознакою розрізняють власні напівпровідники, які не містять дефектів та домішок, що впливають на їхню електропровідність, і мають електронну і діркову електропровідність одночасно, та домішкові, які, в свою чергу, у залежності від типу основних носіїв заряду та природи домішок, діляться на електронні (донорні домішки) та діркові (акцепторні домішки).

Електропровідність власних напівпровідників

Електропровідність напівпровідників зручніше всього розглядати з позицій зонної теорії твердого тіла, що пояснює появу у речовині вільних носіїв заряду. Поза залежністю від будови для напівпровідників згідно цієї теорії характерна наявність не дуже широкої (не більш 3 еВ) забороненої зони між валентною зоною та зоною електропровідності (зоною вільних енергетичних рівнів) на енергетичній діаграмі (рис. Д1.4).

На рис. Д1.4,а показана енергетична діаграма для власного напівпровідника, у якого електрони можуть надходити в зону вільних енергетичних рівнів, що називається зоною провідності, лише з валентної зони.

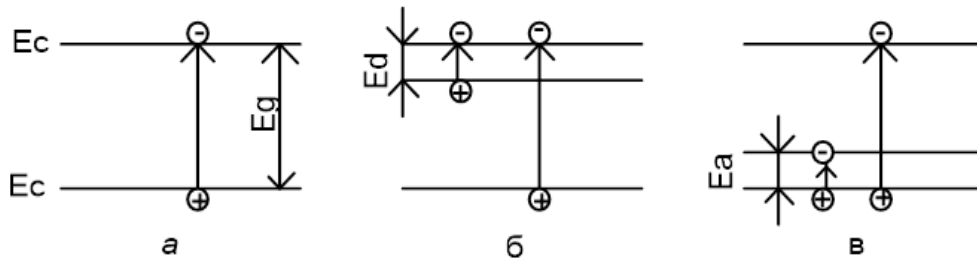


Рис Д1.4. Взаємне розташування енергетичних зон у власному (а), електронному (б) та дірковому (в) напівпровідниках в енергетичному просторі.

У валентній зоні в результаті переходу зона – зона з'являється вільний дозволений енергетичний рівень, на який може перейти електрон валентної зони з енергією, меншою енергії вакансії, звільнивши при цьому свій енергетичний рівень, який стає доступним для інших електронів, внаслідок чого у валентній зоні виникає естафетний рух електронів, який замінюють рухом однієї вакансії і називають дірковим струмом.

В результаті естафетного заповнення електронами вакансія для валентного електрона переміщується в електричному полі у напрямку, протилежному напрямку руху вільного електрона, а тому її можна формально розглядати як квазічастинку – носій заряду, яку прийнято називати діркою. Їй приписують позитивний заряд, рівний за значенням заряду електрона, і ефективну масу, що визначається як друга похідна по швидкості від кінетичної енергії. Враховуючи це, у власному напівпровіднику в кожному випадку збудження водночас створюються два носії з протилежними зарядами, їх концентрації рівні одна одній: $n_i = p_i$, де n_i – концентрація вільних електронів; p_i – концентрація дірок у власному напівпровіднику. При заданих умовах значення n_i визначається природою матеріалу та температурою напівпровідника: $n_i = 2 N_C \exp(-E_D / 2kT)$, де N_C – концентрація енергетичних рівнів для електронів у зоні провідності напівпровідника; E_D – ширина забороненої зони напівпровідника; k – стала Больцмана.

Значення питомої провідності власного напівпровідника γ_i визначається не лише концентрацією вільних носіїв заряду, але і їхньою рухливістю (швидкістю у полі з одиничною напруженістю) u :

$$\gamma_i = qn_i(u_n + u_p),$$

де u_n , u_p – рухливість відповідно електронів та дірок.

Через більшу інерційність дірок і рівність концентрацій електронів і дірок електропровідність власних напівпровідників носить здебільшого електронний характер: $\gamma_i = qn_i U_n$. Значення рухливості носіїв заряду у власному напівпровідникові визначається їхнім розсіюванням на теплових коливаннях вузлів кристалічної ґратки (фононне розсіювання), що в меншій мірі залежить від температури напівпровідника, ніж концентрація носіїв заряду.

З певною точністю температурну залежність питомої провідності власного напівпровідника можна описати рівнянням (A – константа)

$$\gamma_i(T) = A \exp(-E_d/2kT)$$

Електропровідність домішкових напівпровідників

Порушення періодичності кристалічної ґратки напівпровідникового матеріалу (вакансія, атом домішки) може спричинити появу у забороненій зоні напівпровідника дозволених електронних енергетичних рівнів. Якщо такі рівні зайняті електронами і розташовані біля дна вільної зони, то перехід електронів з цих рівнів, в зону провідності буде спостерігатися при менших енергіях збудження, ніж перехід зона – зона (рис. Д1.4, б). Концентрація вільних електронів n у цьому випадку значно перевищує концентрацію дірок p , внаслідок чого такі напівпровідники мають яскраво виражену електронну електропровідність $\gamma = qn\mu_n$, а тому їх називають електронними напівпровідниками. Електрони в них є основними носіями заряду, дірки – не основними.

Дефекти кристалічної ґратки, здатні при збудженні віддати електрон у зону провідності, прийнято називати донорами.

Якщо вільні дозвалені енергетичні рівні з'являються у забороненій зоні поблизу стелі валентної зони, то ймовірність переходу валентного електрона на цей акцепторний рівень буде значно перевищувати ймовірність переходу зона – зона (рис. Д1.4, в), в результаті чого концентрація дірок у валентній зоні p буде значно перевищувати концентрацію електронів у зоні провідності n .

Дефекти кристалічної ґратки, здатні при збудженні захоплювати електрони з валентної зони, називаються акцепторами. Напівпровідникові матеріали, леговані акцепторними домішками, прийнято називати дірковими напівпровідниками. Вони мають діркову електропровідність

$$\gamma = qp\mu_p.$$

У випадку діркових напівпровідників дірки це основні носії заряду, не основними носіями заряду є електрони.

Концентрація вільних носіїв заряду у домішкових напівпровідниках залежить від природи домішок, міри легування та температури навколишнього середовища. При високих концентраціях домішок у забороненій зоні утворюються не окремі ізольовані енергетичні рівні, а домішкові енергетичні зони. При невисоких температурах, коли електропровідність зумовлюється іонізацією домішок:

$$n = \sqrt{N_c N_d} \exp(-E_d / 2kT); p = \sqrt{N_c N_a} \exp(-E_a / 2kT)$$

де N_d , N_a – концентрація відповідно донорних та акцепторних домішок; E_d , E_a – енергетичний рівень відповідних дефектів кристалічних ґраток. При середніх температурах домішки повністю іонізовані: $n=N_d$; $p=N_a$, і має місце так зване «виснаження»

домішкової енергетичної зони. При подальшому підвищенні температури електропровідність домішкового напівпровідника поступово переходить у власну. Слід відзначити, що при будь-якій температурі для домішкових напівпровідників виконується закон діючих мас: $n_p = n_i^2$.

Питомий опір напівпровідників визначається в основному концентрацією носіїв заряду, але залежить також від механізму розсіювання електронів. До причин розсіювання електронів, які по різному впливають на температурну залежність рухливості відносяться:

- теплові коливання атомів чи іонів кристалічної ґратки (фононне розсіювання);
- дефекти ґратки (порожні вузли, домішки проникнення, дислокації, тріщини тощо);
- домішки в іонізованому чи нейтральному стані.

Для власних напівпровідників основним є фононне розсіювання. У домішкових напівпровідниках окрім фононного розсіювання необхідно враховувати розсіювання рухливих заряджених частинок на іонізованих домішках, що мають інші, ніж основний напівпровідник, дозволені для електронів енергії. При низьких температурах, коли рухливість носіїв заряду визначається розсіюванням на домішках, $\mu_d \sim T^{3/2}$, при підвищенні температури помітнішим стає розсіювання на теплових коливаннях вузлів кристалічної ґратки і $\mu_\phi \sim T^{-3/2}$. Саме ця обставина є причиною позисторного ефекту – зростання питомого опору домішкового напівпровідника з температурою у температурному інтервалі, в якому має місце виснаження домішкової зони, але тепла енергія недостатня для збудження валентних електронів.

Електропровідність провідникових матеріалів

До провідників відносяться речовини, основною електричною властивістю яких є електропровідність. В залежності від типу вільних носіїв у речовині розрізняють провідники з електронною (провідники 1 роду) та іонною (провідники 2 роду) електропровідністю, в залежності від складу розрізняють прості провідники, які складаються з одного хімічного елементу, та складні, що являють собою сплави або хімічні сполуки. Властивості провідника можуть мати тверді тіла, рідини, іонізований газ та плазма.

Провідниковий матеріал – електротехнічний матеріал, що має властивості провідника та призначений для виготовлення струмопровідних і потенціальних деталей.

До основних характеристик провідникових матеріалів відносяться: питома провідність γ або зворотна її величина – питомий опір ρ , температурний коефіцієнт питомого опору, питома теплопровідність, абсолютна термоЕРС, межа міцності при розтягненні та відносне видовження при розриві. У нормальному стані провідникові матеріали характеризуються питомим електричним опором, який знаходиться у діапазоні $10^{-8} - 10^{-7}$ Ом•м. В залежності від цільового призначення розрізняють провідникові матеріали високої провідності та високого опору, контактні, електродні, резистивні та жаростійкі. Найбільш широко в електротехніці та енергетиці застосовують металеві провідникові матеріали.

З точки зору зонної теорії до провідників першого роду відносять метали та металоподібні сполуки, для яких характерна відсутність забороненої зони, а валентна та

вільна зони можуть навіть перекриватися, внаслідок чого всі валентні електрони вільні. Для аналізу впливу внутрішніх та зовнішніх чинників на питомий опір металів скористаємося загальним виразом для питомого опору, згідно з яким $\rho = e n \mu$, і залежність питомого опору від будь-якого фактора повинна визначатися його впливом на концентрацію або (та) рухливість електронів.

Різниця у концентрації вільних електронів для всіх металів знаходиться в межах 10%. З врахуванням цієї обставини ясно, що різниця значень ρ в кілька порядків може бути пов'язана тільки з відмінностями у рухливості електронів.

Згідно з електронною теорією металів рухливість електронів зв'язана з параметрами матеріалу рівнянням

$$u = e\lambda / (2m v_T),$$

де e , m – відповідно заряд та маса електрона; λ – довжина вільного пробігу електрона у матеріалі; v_T – теплова швидкість електронів. Оскільки у провідниках електронний газ вироджений, теплова швидкість руху електронів приблизно однакова для різних матеріалів та практично не залежить від температури в області робочих температур. Отже, значення v_T , в основному, залежить від довжини вільного пробігу електрона у даному провіднику, який, в свою чергу, залежить від будови провідника та його структури. Причину цього слід шукати у впливі складу та структури матеріалу на характер розсіювання носіїв заряду.

Чисті метали з досконалою кристалічною решіткою характеризуються найменшим значенням ρ , дефекти та домішки, спотворюючи кристалічну ґратку, призводять до збільшення значення ρ .

Для чистих металів (без домішок) рухливість електронів визначається фононим розсіюванням (розсіюванням електронів на теплових коливаннях іонів у вузлах кристалічної ґратки). Концентрація фононів $n_{\text{ф}}$ при температурах нижчих температури Дебая θ пропорційна T^3 , а при $T > \theta$ пропорційна T . Довжина вільного пробігу при фононному розсіюванні обернено пропорційна $n_{\text{ф}}$.

Враховуючи сказане, на залежності $\rho(T)$ для чистих металів можна виділити дві ділянки (рис. Д1.5, крива 1). На першій ділянці (до температури Дебая) $\rho \sim T^3$, на другій $\rho \sim T$.

Температурний коефіцієнт питомого опору металів ТК_р позитивний і для другої ділянки температурної залежності, де $\rho = BT$, дорівнює $1/T$ і при нормальних умовах має значення: $1/293 = 0,0034 \text{ K}^{-1}$.

Для металевих провідників питомий опір при низьких температурах набагато нижчий, ніж при нормальній. Якщо він залишається не нульовим, то такі провідники називаються кріорезистивними матеріалами (рис. 6.1, крива 1). Для деяких металів і сплавів при температурах, близьких до абсолютного нуля, може наступити стан надпровідності, коли питомий опір при температурі надпровідності $T_{\text{нп}}$ стрибкоподібно падає до нуля (рис. Д1.5, крива 2).

Якщо метал має дефектну кристалічну ґратку, то окрім фононного розсіювання у матеріалі повинно спостерігатися розсіювання електронів на іонізованих домішках, в результаті чого їхня рухливість знижується, а питомий опір значно зростає. Оскільки в металевих провідниках теплова швидкість електронів не залежить

від температури, довжина вільного пробігу електрона при розсіюванні на іонах залишається сталою і рухливість, що зумовлена іонним розсіюванням, також не змінюється з температурою (рис. Д1.5, крива 3).

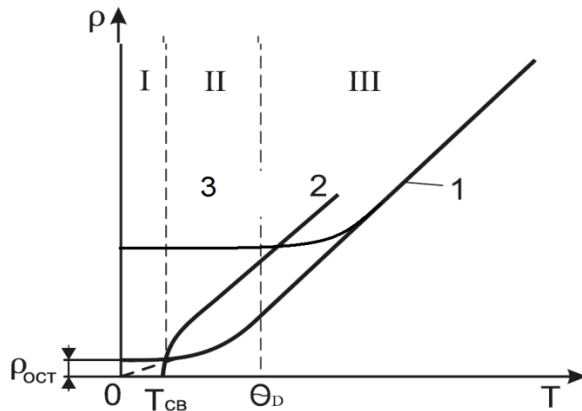


Рис. Д 1.5. Температурна залежність питомого опору металів.

Вплив іонного розсіювання на електропровідність металів переважає при відносно низьких температурах, коли фононним розсіюванням можна знехтувати. Значення ρ у цьому випадку однозначно визначається концентрацією дефектів у кристалічній решітці, а TK_p близький до нуля. При досить високих температурах, коли довжина вільного пробігу для фононного розсіювання, що зменшується з підвищенням температури, стає порівнянною з довжиною вільного пробігу для розсіювання на іонізованих домішках, електропровідність дефектного металу починає визначатися фононним розсіюванням.

В металевих сплавах високого опору, що застосовуються для виготовлення резистивних та нагрівальних елементів, основним механізмом розсіювання електронів є іонний. Для таких провідникових матеріалів характерно високе значення ρ та низькі значення TK_p .

При переході від твердого стану до рідкого в більшості металів спостерігається значне збільшення питомого опору (в 1.5...2 рази), пов'язане з порушенням ближнього порядку в розташування атомів. Винятком є вісмут, сурма, галій, об'єм яких при плавленні зменшується, що супроводжується зниженням питомого опору.

При контакті двох різних металів в зв'язку з переходами електронів з одного металу в інший між ними виникає внутрішня контактна різниця потенціалів (гальвані-потенціал). Контактна різниця потенціалів на розімкнутих кінцях (вольта-потенціал) зумовлена різницею у значеннях роботи виходу електронів із різних металів.

В замкнутому електричному колі, що складається з послідовно з'єднаних різних провідникових матеріалів, сума контактних різниць потенціалів дорівнює нулю, якщо температура всіх контактів однакова. Якщо контакти провідників знаходяться при різних температурах, то виникає термоЕРС. Для термопари, що складається з двох провідників А та В:

$$U = \frac{k}{q}(T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B} = \alpha(T_1 - T_2)$$

де U – термоЕРС; T_1, T_2 – температури контактів; n_A, n_B – концентрації електронів в провідникових матеріалах, що знаходяться у контакті; α – питома термоЕРС термопари.

Властивості магнетиків

Атом, іон чи молекула нейтральні у магнітному відношенні, якщо всі спінові та орбітальні магнітні моменти їх частинок взаємно скомпенсовані. Якщо ж повної компенсації немає, то атом має властивості магнітного диполя.

По характеру взаємодії речовини з магнітним полем розрізняють п'ять основних видів магнітних матеріалів: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики і феримагнетики.

Діамагнетик – речовина, атоми, іони або молекули якої не мають результуючого магнітного моменту за відсутності зовнішнього магнітного поля. Діамагнетики мають властивість намагнічуватися протилежно зовнішньому полю. Діамагнітне тіло виштовхується з нерівномірного магнітного поля, а в рівномірному – прагне розміститися перпендикулярно до напрямку силових ліній.

Парамагнетик – речовина, атоми, іони чи молекули якої мають не скомпенсовані результуючі магнітні моменти, хаотично орієнтовані, якщо відсутнє зовнішнє магнітне поле. Парамагнетики намагнічуються узгоджено з зовнішнім полем, вони втягуються в нерівномірне магнітне поле, а в рівномірному – прагнуть розміститися уздовж силових ліній.

Феромагнетик – як правило кристалічна речовина, магнітні моменти атомів або іонів якої знаходяться у стані самодовільного магнітного упорядкування, утворюючи домени – макрообласті, що мають просторово однорідне упорядкування магнітних моментів атомів або іонів. Результуючі магнітні моменти кожного з доменів відмінні від нуля, але через хаотичність орієнтації окремих доменів магнітний момент не намагніченого феромагнетика дорівнює нулю. В зовнішньому полі феромагнетики сильно намагнічуються та частково зберігають намагнічування при вилученні з поля.

Антиферомагнетик – кристалічна речовина, магнітні моменти атомів або іонів якої знаходяться в стані самодовільного магнітного упорядкування, при чому результуючі магнітні моменти кожного з доменів рівні нулю завдяки антипаралельному розташуванню некомпенсованих магнітних моментів сусідніх атомів чи іонів.

Феримагнетик – кристалічна речовина, магнітну структуру якої можна уявити у вигляді двох або більше феромагнітних підґраток з деякою перевагою однієї з них. Можна також визначити феримагнетик, як не повністю скомпенсований антиферомагнетик.

Магнітний стан речовини описується залежністю $B = f(H)$ (B – магнітна індукція; H – напруженість магнітного поля в речовині), що є багатозначною функцією. Значення індукції, що відповідає даному значенню напруженості магнітного поля, залежить від магнітної історії матеріалу. В залежності $B = f(H)$ прийнято розрізняти криві намагнічування, петлю гістерезисного циклу та петлі окремих циклів.

Якщо матеріал повністю розмагнічений, то при накладанні монотонно зростаючого поля H індукція B буде змінюватися по кривій початкового намагнічування (рис. Д1.6). На цій кривій виділяються чотири характерні ділянки, пов'язані з процесами намагнічування феромагнетика.

В області слабких полів I відбувається зворотне зміщення границь та збільшення об'єму тих доменів, вектор намагніченості яких утворює найменший кут з напрямком поля намагнічування H . Це збільшення відбувається за рахунок зменшення

об'єму сусідніх доменів. При зменшенні поля намагнічування до нуля розміри всіх доменів відновлюються.

У області середніх напруженостей магнітного поля II відбувається незворотне зміщення границь доменів з орієнтацією векторів намагніченості вздовж тієї осі легкого намагнічування, напрямом якої складає найменший кут з напрямком зовнішнього поля.

В області сильних полів III відбувається процес повороту векторів намагніченості з напрямків вздовж осі легкого намагнічування до напрямку паралельного зовнішньому полю. Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються вздовж поля, настає технічне насичення намагніченості (область IV).

Якщо намагнічувати феромагнетик в зовнішньому магнітному полі, а після цього починаючи з будь-якої точки основної кривої намагнічування, що відповідає областям 2 – 4, зменшувати напруженість поля, то значення індукції також буде зменшуватися, але не по основній кривій, а вище внаслідок явища гістерезису (відставання). При збільшенні поля протилежної напруги зразок може бути розмагнічений або перемагнічений, а при новій зміні напрямку поля індукції він знову може повернутися у вихідну точку, тобто буде описана замкнута крива, яка називається петлею гістерезисного циклу перемагнічування. Для визначення властивостей матеріалу використовують граничну петлю гістерезису, коли індукція в процесі намагнічування матеріалу досягає насичення B_s (рис. Д1.6).

За цією характеристикою визначаються наступні параметри: залишкова індукція B_r – індукція, що зберігається у магнітному матеріалі після намагнічування його до намагніченості технічного насичення та зменшення напруженості магнітного поля до нуля; коерцитивна сила H_c – величина, рівна напруженості магнітного поля, необхідній для зміни магнітної індукції від остаточної індукції до нуля (розмагнічування феромагнетика).

Крива початкового намагнічування не відповідає умові доброї відтворюваності, тому для характеристики магнітних матеріалів використовують близьку до неї основну криву намагнічування – геометричне місце вершин симетричних петель магнітного гістерезису, що одержуються шляхом кількох послідовних перемагнічувань шляхом зміни полярності магнітного поля при послідовно зростаючих максимальних значеннях напруженості магнітного поля. При цьому останній цикл перемагнічування повинен закінчуватися при одній і тій же полярності магнітного поля (рис. Д1.7). Основна крива намагнічування використовується для практичного визначення ряду технічних параметрів феромагнетиків. По ній можна визначити за дотичними, проведеними через початок координат - однією до початкової ділянки основної кривої намагнічування і другою з максимальним нахилом як описано в лабораторній роботі №7, початкову і максимальну магнітні проникності, які характеризують здатність феромагнетика намагнічуватися в слабких магнітних полях.

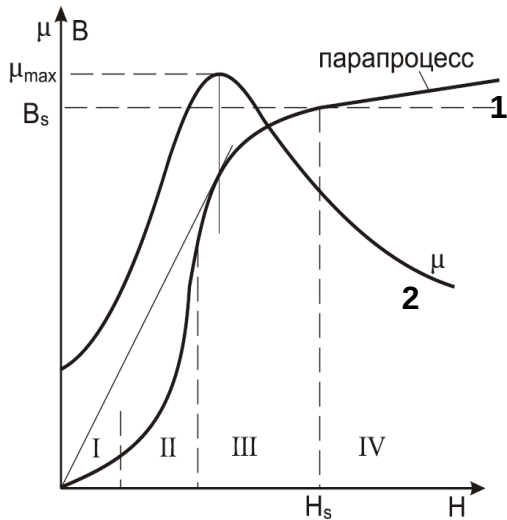


Рис. Д1.6. Крива початкового намагнічування (1) та залежність $\mu_r(H)$ (2).

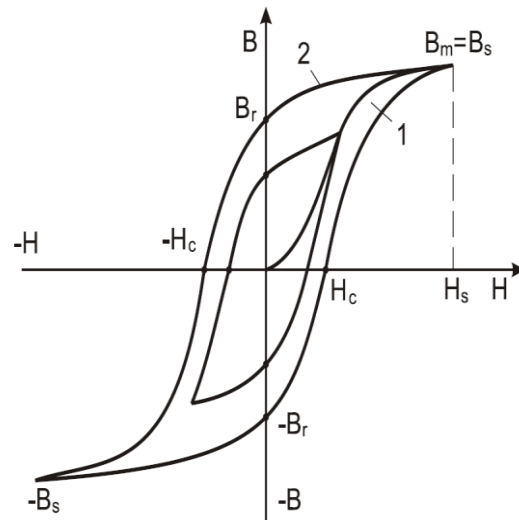


Рис. Д1.7. Основна крива намагнічування (1) та гранична петля гістерезису (2).

Між цими двома значеннями будуть лежати значення диференціальних магнітних проникностей які характеризують магнітні властивості феромагнетика в точці з координатами (B, H) і визначаються через дотичні до основної кривої намагнічування у цих точках за формулою

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H},$$

При намагнічуванні змінним струмом із збільшенням частоти через інерційність магнітних процесів феромагнетик намагнічується менше і магнітна проникність зменшується. Основній кривій намагнічування у змінному магнітному полі відповідає динамічна крива намагнічування. Магнітні проникності, визначені з допомогою динамічної кривої намагнічування називаються динамічними.

Магнітна проникність феромагнетиків при температурах, близьких до точки Кюрі, досягає максимальних значень. Вище точки Кюрі доменна структура речовини руйнується і матеріал стає парамагнетиком.

Феромагнітні матеріали, що використовуються у техніці, прийнято ділити на дві основні групи: магнітом'які та магнітотверді. Основною класифікаційною ознакою при діленні матеріалів є значення коерцитивної сили.

Магнітом'які матеріали ($H_c < 4$ кА/м) відрізняються здатністю намагнічуватися до насичення навіть у слабких полях (висока магнітна проникність) з малими втратами на перемагнічування. В техніці використовують магнітом'які матеріали з $H_c < 100$ А/м для виготовлення магнітопроводів та осердь.

Магнітотверді матеріали ($H_c > 4$ кА/м) мають велику питому енергію, яка тим більша, чим вище значення B_r та H_c . Матеріали з $H_c > 10$ кА/м знайшли застосування для виготовлення постійних магнітів.

Важливою характеристикою феромагнітних матеріалів є втрати потужності на процеси намагнічування, які викликають нагрівання матеріалу при перемагнічуваннях. Розрізняють втрати на гістерезис, втрати на вихрові струми та додаткові.

Втрати на вихрові струми залежать не тільки від магнітних і електричних властивостей феромагнетика, а і від форми зразка. Для листового зразка питомі магнітні втрати дорівнюють

$$p_r = 1,64 B_{\max}^2 f^2 d^2 / (\gamma \rho),$$

де $B_{\max}$ – амплітуда магнітної індукції, f – частота змінного струму, d – товщина листа, γ – густина матеріалу, ρ – питомий електричний опір.

Таким чином, основним способом боротьби з магнітними втратами на вихрові струми є підвищення питомого опору магнітного матеріалу. Саме тому для виготовлення магнітних осердь електричних машин та апаратів використовують електротехнічну сталь, яка є сплавом заліза і кремнію на відміну від конструкційної сталі – сплаву заліза і вуглецю. Можливості цього способу зниження магнітних втрат у сталі обмежені надмірним зростанням крихкості матеріалу при введенні більше 5% кремнію.

Крім того використовують такий конструктивний захід, як шихтування, тобто виготовлення осердь з тонких, товщиною порядку 1 мм, листів, ізольованих тонким шаром лаку один від одного, завдяки чому руйнуються шляхи протікання вихрових струмів і їхня інтенсивність різко знижується.

В феритах, в склад яких входять оксиди перехідних елементів з великим питомим опором, втрати на вихрові струми значно нижчі. Найбільш ефективно магнітні втрати подавляються в магнітодіелектриках, композиційних матеріалах з діелектричною матрицею та феромагнітним наповнювачем.

Питомі втрати енергії на гістерезис за цикл намагнічування дорівнюють площі петлі гістерезису $p_c = \oint BdH$, а питомі втрати потужності з врахуванням частоти і маси $p_c = f \oint BdH / \gamma = \eta f B_{\max}^n / \gamma$, де η – коефіцієнт, значення якого залежить від матеріалу; n знаходиться в межах 1,6...2. Для зменшення гістерезисних втрат в електротехнічному устаткуванні використовують магнітом'які матеріали.

Для додаткових магнітних втрат, пов'язаних з магнітною післядією, немає надійних розрахункових формул. На практиці вони обчислюються як різниця між повними магнітними втратами та сумою магнітних втрат на гістерезис і вихрові струми.

В схемотехніці магнітні втрати потужності в котушках індуктивності інколи характеризують тангенсом кута магнітних втрат. Якщо моделювати реальну котушку індуктивності послідовним з'єднанням ідеальної індуктивності L і активного опору r , то тангенс кута магнітних втрат на частоті ω дорівнює $\tan \delta = r/\omega L$.

ВАРІАНТИ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторна робота №1

1.1 д. Вимірювання опорів діелектриків гальванометром.

Схема вимірювання об'ємного опору зразка діелектрика за допомогою гальванометра показана на рис. Д2.1, а. При включенні по схемі згідно рис. Д2.1,а гальванометр Г вимірює об'ємний наскрізний струм I_V від джерела живлення Н, поверхневий струм I_S за допомогою охоронного електрода спрямовується в джерело живлення в обхід гальванометра.

В схемі вимірювання поверхневого опору зразка (рис. Д2.1, б) поверхневий струм від джерела живлення проходить крізь кільцевий та вимірювальний електроди та гальванометр, об'ємна складова струму відводиться в джерело живлення через високовольтний електрод вимірювального пристрою.

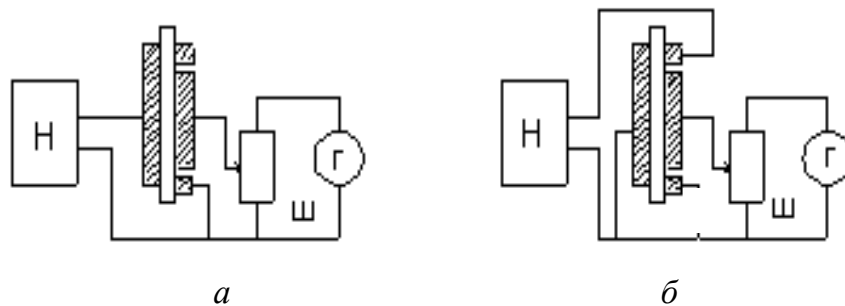
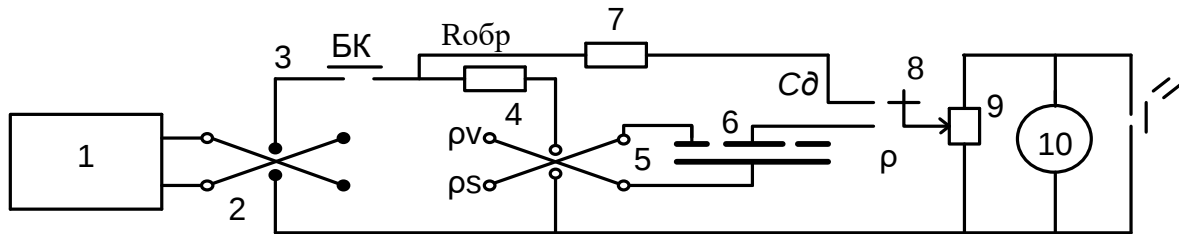


Рис Д2.1. Схема вимірювання об'ємного (а) та поверхневого (б) опору зразка діелектрика за допомогою гальванометра.

Блок-схема установки для вимірювання опорів діелектриків показана на рис.Д2.2. Для визначення динамічної сталої гальванометра (значення струму, необхідного для відхилення світлової плями на одну поділку шкали – тобто ціни поділки шкали), перемикач 8 поставити в положення C_d , на шунті 9 встановити шунтове число $m=10^4$, на джерелі живлення 1 встановити напругу 1000 В. Включити блокування 3 та натиснути на кнопку 11. Через гальванометр буде протікати струм $I = U/R_{зр} = \alpha C_d m$, α – відхилення світлової плями на гальванометрі), звідси $C_d = U/R_{зр} m \alpha$. Для виключення електродних ефектів та паразитних струмів вимірювання слід повторити змінивши полярність прикладеної напруги за допомогою перемикача 2. Дані вимірів α_1 та α_2 заносять до табл. Д2.1. Для зменшення впливу випадкових експериментальних похибок на вирахуване значення динамічної постійної гальванометра вимірювання слід повторити 3 рази.

Таблиця Д2.1

U, В	m	α_1 , мм	α_2 , мм	C_d , А/мм



1 – стабілізоване джерело напруги; 2 – перемикач полярності прикладеної напруги для усунення впливу електродних ефектів та паразитних струмів; 3 – блокування, що виключає подачу на високовольтний електрод напруги при заміні зразка діелектрика; 4 – обмежувальний резистор, що виключає вихід з ладу гальванометра при випадковому контакті високовольтного і вимірювального електродів; 5 – перемикач роду робіт для комутації електродів при вимірюванні значень поверхневого та об'ємного струмів; 6 – трьохелектродний вимірювальний пристрій; 7 – зразковий резистор для градуювання гальванометра; 8 – перемикач роду робіт для вимірювання динамічної сталої гальванометра, об'ємного чи поверхневого струмів; 9 – універсальний шунт; 10 – динамічний гальванометр; 11 – кнопка для шунтування гальванометра (відлік значення струму проводиться при натиснутій кнопці).

Рис Д2.2. Блок-схема установки для вимірювання об'ємного та поверхневого опору діелектриків.

Для вимірювання опору діелектрика при вимкненому живленні та розімкненому блокуванні зразок матеріалу, що досліджується, встановити в вимірювальні електроди. Перемикач 8 поставити в положення I_v . На шунті 9 встановити шунтове число $m=10^4$. Перемикач 5 встановити в положення, яке визначає характер опору, що вимірюється (ρ_v або ρ_s). На джерелі 1 встановити вимірювальну напругу 1000 В. Включити блокування 3 та при нажатій кнопці 11 відрахувати відхилення α_1 світлової плями гальванометра 10 та α_2 (після зміни полярності прикладеної напруги за допомогою перемикача 2). Якщо при шунтовому числі $m=10^4$ відхилення незначні, рекомендується послідовно зменшувати шунтове число, домагаючись помітних відхилень світлової плями на шкалі гальванометра. Результати вимірювань та розрахунків занести у таблиці за формою табл. Д2.2. Розрахувати значення поверхневих та об'ємних струмів за формулою, використовуючи відповідні значення. Питомий об'ємний опір у випадку дискового зразка товщиною h розраховують за формулою

$$\rho_v = \frac{U}{I_v} \frac{\pi d_1^2}{4h}, \text{ де } U - \text{прикладена напруга, } I_v - \text{об'ємний струм, а питомий поверхневий опір } \rho_s = \frac{U}{I_s} \frac{(d_1 + d_2)}{2(d_2 - d_1)}, \text{ де } I_s - \text{поверхневий струм.}$$

Таблиця Д2.2

Матеріал	Параметр		m	α_1 , мм	α_2 , мм	α_{cp} , мм	ρ_v , Ом·м	ρ_s , Ом·м
	ρ_v , Ом·м							
	ρ_s , Ом·м							

1.2 д. Вивчення кінетики зміни опору діелектриків при зволоженні.

Завдання на роботу.

Дослідити кінетику зміни питомих об'ємного та поверхневого опорів діелектриків з різним складом і структурою в процесі зволоження.

Порядок виконання.

1. Висушити зразки матеріалів, що досліджуються, при температурі 100 °С на протязі 30 хв. Охолодивши їх до кімнатної температури, визначити питомі опори сухих зразків по методиці п.1.3 основного тексту або 1.2 додатку 1 та занести у відповідні таблиці.

2. Помістити зразки досліджуваних матеріалів в ексикатор з водою на 10, 20, 30 хв. По відповідних методиках визначити питомі опори зразків в процесі зволоження. Дані вимірювань і розрахунків занести в таблиці. Проаналізувати кінетику зниження питомих опорів в процесі зволоження матеріалів з різним складом і будовою.

1.3 д. Дослідження впливу температури на значення питомих опорів діелектрика.

Завдання на роботу

1. Виміряти температурну залежність питомих опорів діелектриків (за вказівкою викладача) та побудувати відповідні графіки в лінійному та напівлогарифмічному масштабах.

2. Визначити енергію активації домішкової і власної електропровідності діелектриків, що досліджувалися, в залежності їх наявності.

Порядок виконання

1. Визначити площу електродів, м², та товщину зразка матеріалу, м. Помістити зразок матеріалу в електродний пристрій установки, схема якої показана на рис. Д2.3.

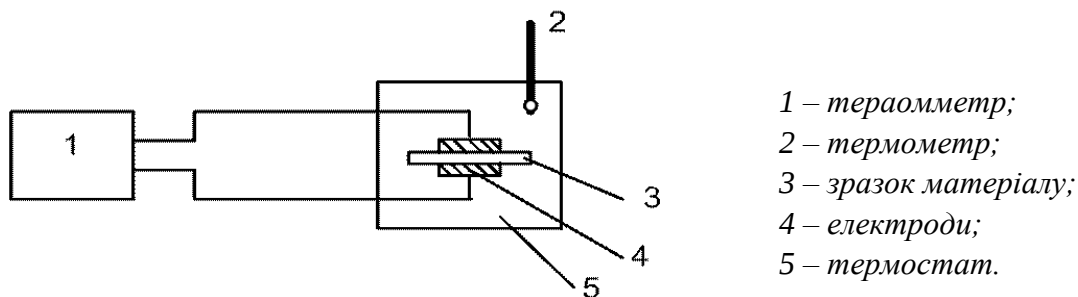


Рис Д2.3. Блок-схема установки для дослідження температурної залежності опору діелектриків.

2. Включити тераомметр, після прогрівання приладу і перевірки нуля виміряти опір зразка при кімнатній температурі. Ввімкнути термостат та виконати вимірювання опору матеріалу з інтервалом 5...10 °С до температури, яка визначається його нагрівостійкістю. Розрахувати значення питомого опору матеріалу. Дані і результати розрахунків занести в таблицю за формою табл. Д2.3.

Таблиця Д2.3

Температура Т		1/T, K ⁻¹	R, Ом	ρ_v Ом·м	lg ρ_v
°С	К				

3. Побудувати температурну залежність питомого опору в напівлогарифмічному масштабі від зворотної абсолютної температури $\lg(\rho_v)=f(1/T)$. На високотемпературних прямолінійних ділянках цієї залежності визначити значення енергії активації електропровідності:

$$W = [2,3k \lg(\rho_{v1} / \rho_{v2})] / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

де $k=8,6 \cdot 10^{-5}$ еВ/К – стала Больцмана, $\lg(\rho_{v1} / \rho_{v2})$ – приріст логарифма питомого опору при зміні температури від T_1 до T_2 .

4. Пояснити температурну залежність питомого опору досліджених діелектричних матеріалів.

Лабораторна робота №3

3.1д. Дослідження впливу вологи на діелектричні втрати матеріалу.

Завдання на роботу.

Дослідити вплив вологи на діелектричні втрати діелектричних матеріалів.

Порядок виконання

1. За вказівкою викладача відібрати кондиціоновані при малій вологості зразки діелектричних матеріалів з різними складом і структурою. Помістити один із зразків в електродний пристрій.

2. Ввімкнути міст змінного струму, підключити його до виводів електродного пристрою, і виміряти значення $\text{tg}\delta$ та ємності при кімнатній температурі. Аналогічні вимірювання виконати і для інших зразків.

Відібрати кондиціоновані при великій вологості зразки таких же діелектричних матеріалів, що досліджувалися при малій вологості, і провести вимірювання $\text{tg}\delta$ та ємності згідно з методикою, яка описана в основній частині. Дані вимірювань занести в табл. Д2.4.

3. Проаналізувати вплив вологи на діелектричні втрати досліджених матеріалів з різним складом і будовою.

Таблиця Д2.4

Стан матеріалу	Назва матеріалу			Назва матеріалу			Назва матеріалу			Назва матеріалу			Назва матеріалу		
	C	$\text{tg}\delta$	C· $\text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	C· $\text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	C· $\text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	C· $\text{tg}\delta$	C	$\text{tg}\delta$	C· $\text{tg}\delta$
сухий															
волог.															

3.2 д. Дослідження кінетики зволоження за допомогою діелектричних втрат.

Завдання на роботу.

Дослідити кінетику зміни діелектричних втрат в діелектриків з різним складом і структурою в процесі зволоження.

Порядок виконання

1. Висушити матеріали при температурі 100 °С на протязі 30 хв. та визначити ємність і $\text{tg}\delta$ матеріалу.

2. Помістити матеріали, що досліджуються в ексікатор з водою на 10, 20, 30 хв. Провести визначення ємності і $\text{tg}\delta$ зволжених матеріалів. Дані вимірів занести в таблицю за зразком табл. Д2.4.

3. Пояснити характер реакції діелектричних втрат на зволоження з врахуванням типу діелектрика.

3.3 д. Визначення іонізаційних втрат у діелектрику.

Завдання на роботу.

Зняти та побудувати криву іонізації діелектрика з повітряними порожнинами.

Порядок виконання

1. Помістити матеріал в електродний пристрій високовольтного мосту змінного струму. Ввімкнути блокування, живлення мосту та встановити перше значення вимірювальної напруги на зразку (за вказівкою викладача).

2. Провести балансування моста при вимірювальній напрузі та визначити значення $\text{tg}\delta$ і ємність. Повторити процес вимірювання при 5–6-ти зростаючих значеннях вимірювальної напруги до вказаного викладачем значення. Записати отримані дані.

3. Побудувати залежність ємності і $\text{tg}\delta$ досліджуваного матеріалу (не менше п'яти точок) від прикладеної напруги. Зробити висновок про наявність у матеріалі газових порожнин.

Лабораторна робота №4

4.1д. Визначення електричної міцності конденсаторного паперу.

Завдання на роботу.

Визначити електричну міцність твердих діелектричних матеріалів за завданням викладача при постійній або змінній напрузі.

Порядок виконання

1. Під'єднати за допомогою перемичок електродну систему 9 до високовольтного апарату.

2. Визначити пробивну напругу $U_{\text{пр}}$ одного шару непросоченого конденсаторного паперу при діаметрі електродів 10 та 50 мм. Випробування повторити 10 раз та по середньому значенню пробивної напруги обчислити електричні міцності непросоченого паперу і пояснити їх різницю.

3. Визначити середню пробивну напругу $U_{\text{пр}}$ 2...5-х шарів непросоченого паперу при діаметрі електродів 10 мм по п. 1, 2.

4. Побудувати та пояснити залежності $E_{\text{пр}} = f(n)$.

Лабораторна робота №5

5.1д. Визначення типу носіїв заряду в напівпровідниках

1. Завдання на роботу.

2. 1. Визначити тип вільних носіїв заряду напівпровідникового матеріалу за знаком термоЕРС.

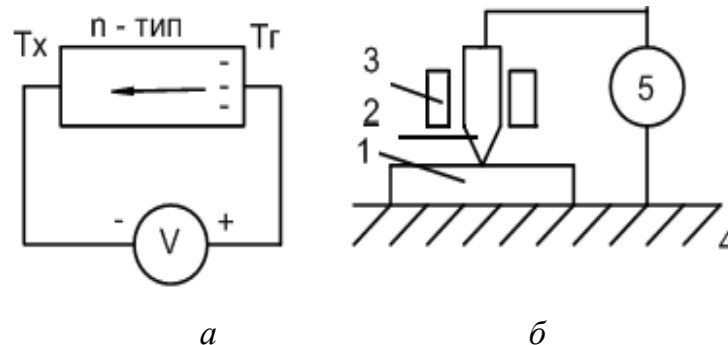
3. Для визначення типу носіїв заряду у напівпровідниках використовується метод термозонда, що полягає в нагріванні одного кінця напівпровідникового зразка гарячим електродним зондом або будь-яким зовнішнім джерелом теплоти. Якщо випробовується напівпровідник n -типу, то у нагрітому кінці за рахунок зовнішньої теплової енергії звільниться з донорних рівнів більша кількість електронів, ніж у холодному (рис. Д2.4, а).

4. Надлишкові електрони дифундують до холодного кінця напівпровідника, і зарядять його негативно. Гарячий кінець внаслідок відходу електронів зарядиться позитивно. У випадку діркового напівпровідника картина буде протилежна. Для власного напівпровідника холодний кінець буде мати знак, що відповідає носіям з більшою рухливістю. В загальному випадку між гарячим та холодним кінцями напівпровідника виникне термоЕРС, знак якої на холодній стороні зразка відповідає знаку носіїв заряду, що дають більший вклад в електропровідність.

Порядок виконання

1. Включити нагрівач зонда.
2. Покласти матеріал на масивний металевий електрод.
3. Короткочасно торкнутися зразка нагрітим зондом та визначити за напрямком відхилення стрілки гальванометра полярність гарячого кінця напівпровідника.
4. Зробити висновок про характер носіїв заряду у напівпровіднику.

Схема експериментальної установки, на якій проводиться визначення типу електропровідності, показана на рис. Д2.4.



1 – досліджуваний напівпровідниковий матеріал; 2 – електрод-зонд; 3 – нагрівач; 4 – масивний холодний електрод; 5 – гальванометр.

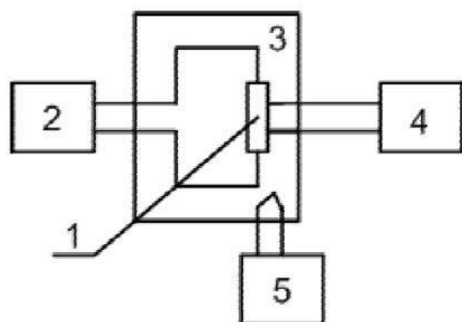
Рис. Д2.4. Схеми утворення (а) і вимірювання (б) термоЕРС

5.2 д. Вимірювання питомого опору напівпровідникових матеріалів

Дослідження температурної залежності електропровідності напівпровідникових матеріалів проводиться на установці, блок-схема якої показана на рис. Д2.5.

При вимірюванні питомого опору напівпровідника основним джерелом помилок є перехідний опір на контактах метал – напівпровідник та термоЕРС, яка виникає в них. Тому для вимірювання використовуються компенсаційні зондові методи. Через зразок матеріалу пропускають струм силою I . До поверхні зразка притискають два електрода з міжелектродною відстанню d .

Різниця потенціалів між електродами U вимірюється компенсаційним методом з допомогою потенціометра Π . Якщо поперечний перетин зразка S , то його питомий опір $\rho = US/(I \cdot d)$.



- 1 – зразок напівпровідникового матеріалу;
 2 – генератор струму;
 3 – термостат;
 4 – потенціометр постійного струму;
 5 – термопара або термометр.

Рис. Д2.5. Блок-схема установки для вимірювання температурної залежності електропровідності напівпровідникових матеріалів

Порядок виконання

1. Виміряти геометричні розміри зразка та помістити його в електродний прилад.
2. Встановити робочий струм $I = 10$ мА, який не повинен викликати нагрівання зразка.
3. Виміряти потенціометром постійного струму падіння напруги на потенційних зондах при кімнатній температурі.
4. Включити термостат.
5. По мірі нагрівання зразка через кожні 10°C проводити вимірювання падіння напруги на потенційних зондах. Робочий струм повинен підтримуватися на одному рівні.
6. Дані вимірів занести до таблиці за формою табл. Д2.5. При розрахунках врахувати значення робочого струму та геометрію зразка. Для стенда, що використовується у лабораторії перетин зразка $S = 9,43$ см²; відстань між зондами $l = 6$ мм.

Таблиця Д2.5

Температура		$1/T, \text{K}^{-1}$	Напруга на зондах, В	ρ_v Ом•м	$\lg \rho_v$
$^\circ\text{C}$	К				

7. Побудувати залежність ρ_v від температури та визначити температурний коефіцієнт питомого опору графічним методом при температурі 60°C .
8. Побудувати залежність $\ln(\rho_v)$ від оберненої абсолютної температури і визначити у високотемпературному діапазоні ширину забороненої зони.
9. Розрахувати теоретичне значення $\text{TK}\rho_v$.
10. Методика розрахунків ширини забороненої зони і $\text{TK}\rho_v$ графічним методом і теоретичного $\text{TK}\rho_v$ аналогічні наведеним в основному тексті лабораторної роботи №5.

Додаток 3

ДОВІДКОВІ ДАНІ

Фізичні сталі

Електрична стала $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

Магнітна стала $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Стала Больцмана $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ еВ/К

Число Авогадро $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹

Основні електричні параметри ряду електроізоляційних матеріалів

Назва матеріалу	ϵ_r при 50 Гц	ρ_v , Ом•м	ρ_s , Ом	tgδ при 50 Гц
Поліетилен	2,3...2,4	$10^{14} \dots 10^{15}$	10^{14}	$(1 \dots 5)10^{-4}$
Полістирол	2,4...2,6	$10^{14} \dots 10^{15}$	10^{15}	$(1 \dots 3)10^{-4}$
Політетрафторетилен	1,9...2,2	$10^{15} \dots 10^{16}$	10^{17}	$(1 \dots 2)10^{-4}$
Політрифтормонохлоретилен	2,3...3,5	$10^{15} \dots 10^{16}$	10^{17}	$(1 \dots 2)10^{-2}$
Поліхлорвініл	3,5	$10^{13} \dots 10^{14}$	$10^{13} \dots 10^{14}$	$(3 \dots 8)10^{-2}$
Поліметилметакрилат	3,5...4,5	$10^{11} \dots 10^{12}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	$(2 \dots 8)10^{-2}$
Слюда	5...8	$10^{11} \dots 10^{14}$	$10^{10} \dots 10^{14}$	$(4 \dots 80)10^{-4}$
Корунд	10	$10^{14} \dots 10^{15}$	$10^{13} \dots 10^{14}$	$(1 \dots 5)10^{-4}$
Рутил	110	$10^9 \dots 10^{10}$	10^{10}	$(8 \dots 20)10^{-4}$
Нітрид кремнію	9	$10^{10} \dots 10^{15}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	$(5 \dots 20)10^{-4}$

Характеристики провідникових матеріалів

Марка сплаву	Параметр		
	ρ , мкОм•м	ТКР•10 ⁶ , К ⁻¹	Гранично допустима робоча температура, °С
Константан	0,48...0,52	5...25	450...500
X13Ю4	1,20...1,34	100...120	900
X15Н60	1,10...1,20	100...200	1000
Н80	1,0...1,1	100...200	1100
X23Ю5	1,3...1,5	65	1200

Метал	Параметр		
	ρ , мкОм•м	Густина, г/см ³	Атомна маса
Алюміній	0,0265	2,7	27
Вольфрам	0,055	19,3	183,8
Залізо	0,097	7,87	55,8
Золото	0,0225	19,3	197
Мідь	0,0168	8,92	63,5
Молібден	0,05	10,2	96
Нікель	0,068	8,96	98,7
Олово	0,113	2,29	116,6
Платина	0,0981	21,45	195
Тантал	0,124	16,6	181
Титан	0,47	4,52	48

Ширина забороненої зони напівпровідникових матеріалів

Матеріал	Ge	Si	SiC	Se	InSb	HgSe	PbS	PbSe	GaAs	GaP	InP
W, eV при 20 °С	0,67	1,12	3,1	1,7	0,18	0,12	0,41	0,27	1,43	2,25	1,28

Література

Основна

1. Електротехнічні матеріали: Курс лекцій. Частина 1. Діелектричні матеріали. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Електричні станції», «Електричні системи і мережі», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії», «Електричні машини і апарати», «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Управління, захист та автоматизація енергосистем» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», уклад.: В. М. Кириленко, К.В. Кириленко. В.М. Головка – Київ : КПІ ім Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45608>
2. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с.
3. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.– 344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.
4. Електротехнічні матеріали: навч. посібн. / А.С. Головченко, Д.В. Ципленков, А.А.Колб, А.В. Ніколенко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» - Дніпро: НТУ «ДП», 20212. – 184 с.
5. Воронов С.А., Переверзева Л.П., Поплавко Ю.М. Физическое материаловедение. Часть 1. Перспективные направления материаловедения: Учебное пособие. – К.: НТУУ «КПІ», 2004. – 195 с.
6. Фізичне матеріалознавство: Навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, С.О. Воронов, Ю.І. Якименко. - К.: НТУУ «КПІ», 2007. – Ч. 2: Діелектрики. - 392 с.

Додаткова

1. ДСТУ 2843–94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.
2. ДСТУ 2815-94 "Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення".
3. ДСТУ 2725–94. Матеріали магнітні. Терміни та визначення.