

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра енергетики аграрного виробництва

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

**Методичні рекомендації**

до виконання лабораторних робіт

для здобувачів ступеня вищої освіти «бакалавр» напрямку

6.100101 «Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі» денної та заочної форм навчання

Миколаїв  
2016

УДК 621.315.5

ББК 31.23я73

Е50

Друкується за рішенням методичної ради інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету, протокол № 9 від 27.05.15р.

Укладачі:

О.О. Плахтир - канд. техн. наук, доцент кафедри енергетики аграрного виробництва Миколаївського національного аграрного університету

О.М. Циганов - асистент кафедри енергетики аграрного виробництва Миколаївського національного аграрного університету

Рецензент:

Д.Л. Кошкін - канд. техн. наук, доцент директор інституту післядипломної освіти Миколаївського національного аграрного університету

## ВСТУП

Сучасна електроенергетика використовує в елементах конструкцій надзвичайно широкий спектр різноманітних електротехнічних матеріалів (ЕТМ), від електричних, механічних, фізико-хімічних й інших властивостей яких значною мірою залежить надійність роботи електроенергетичного обладнання. Тому актуальним завданням забезпечення систем електроспоживання якісним обладнанням є розробка і впровадження нових, більш якісних матеріалів з кращими функціональними і експлуатаційними характеристиками.

При проектуванні та розробці нових електротехнічних приладів і обладнання з покращеними характеристиками знання електрофізичних, фізико-технічних і механічних властивостей використовуваних матеріалів є обов'язковою умовою раціонального вирішення цього завдання. Забезпечення високої надійності роботи електроенергетичного обладнання ґрунтується, насамперед, на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються в матеріалах протягом їх експлуатації, на знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів на їх основі, вимогах чинних ДСТУ, нормативних і технічних умовах їхнього використання. Це є гарантом надійної роботи електричних мереж і всього комплексу енергетичного обладнання: генераторів, трансформаторів, комутаційних апаратів, компенсуючих пристроїв та інших, в конструкції яких використовують ЕТМ. Вони знаходяться під впливом різноманітних зовнішніх факторів, у тому числі сильних електромагнітних полів, високих температур, статичних і динамічних навантажень, атмосферних впливів. Тому знання умов забезпечення стабільності параметрів цих матеріалів під дією вказаних факторів є важливим для забезпечення безперебійного функціонування електрообладнання та всієї електроенергетичної системи в цілому.

Дисципліна «Електротехнічні матеріали» є нормативною для всіх електротехнічних і електроенергетичних спеціальностей, оскільки в ній комплексно розглядаються властивості матеріалів, у тому числі в реальних умовах експлуатації електроенергетичного обладнання. Виконання студентами лабораторних робіт дасть можливість отримати практичні навички з методів випробування ЕТМ, вивчити їх характеристики та навчитись використовувати їх в реальних електротехнічних конструкціях.

Методичні рекомендації містять опис лабораторних робіт, основні теоретичні відомості для підготовки до виконання лабораторних робіт, методичку дослідження характеристик електротехнічних матеріалів, методи випробування та застосування ЕТМ на практиці, обробку результатів експериментів і порівняння їх з теоретичними розрахунками, порядок оформлення звіту та контрольні питання. При виконанні лабораторних робіт студент повинен вміти вирішувати практичні інженерні задачі, складати різні схеми для випробування ЕТМ та ізоляційних конструкцій. Кожна робота розрахована на дві години занять в лабораторії і передбачає обов'язкову самостійну підготовку до неї. Успішне самостійне проведення потребує від студента систематичної роботи з різними джерелами інформації.

## ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Мета виконання даного циклу лабораторних робіт - закріпити теоретичні знання в галузі електротехнічного матеріалознавства, ознайомитися з властивостями, методами випробування і визначення характеристик електрорадіоматеріалів у відповідності з державними стандартами; набути вмінь та навиків організації і проведення випробувань та вимірювань, реєстрації, аналізу і оцінки одержуваних результатів.

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

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

Готувати устаткування до роботи студенти повинні при відключеному живленні. Після перевірки правильності з'єднань викладач дає дозвіл на виконання роботи. Він також контролює хід роботи і її результати.

Звіт про роботу повинен містити мету роботи; принципову чи структурну схему установки; алгоритм та формули для чисельних розрахунків; перелік проведених досліджень з вказівкою необхідних відомостей про конфігурацію електродів, параметри схеми і т.п.; результати досліджень у вигляді таблиць та графіків; аналіз результатів; загальні висновки по роботі.

Текст звіту слід оформляти на листах формату А4. Графіки можна викреслювати на міліметровій, стежачи за раціональним вибором масштабу, чіткістю нанесення експериментальних точок.

Рисунки, таблиці, графіки, схеми слід виконувати у відповідності з ЄСКД, а умовні позначення у відповідності з державними стандартами.

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

На першому занятті студенти повинні пройти інструктаж з техніки безпеки. Інструктаж проводить викладач або відповідальний за техніку безпеки при роботі в даній лабораторії. Після ознайомлення з інструкцією кожний студент повинен зареєструватися у контрольному журналі чи листі проведення інструктажу по техніці безпеки.

**Увага! При обслуговуванні високовольтного електроустаткування повинен бути виключений дотик до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою.** Недоступність струмопровідних частин електричних установок забезпечується використанням надійної ізоляції, застосуванням захисних огорож для неізольованих струмопровідних частин або розташуванням їх на значній висоті, а також блокуванням.

Виконання дослідів з високою напругою в лабораторії вимагає великої уваги і суворого виконання таких вимог по техніці безпеки:

1. Забороняється працювати з високовольтними установками одній людині.
2. Працювати з високовольтними установками слід в захисних рукавичках, стоячи на ізоляційному килимку.
3. До ввімкнення високої напруги всі огорожі повинні бути надійно закриті, категорично не допускається робота з несправним або навмисне відключеним (перемкнутим) блокуванням.
4. Категорично забороняється виконувати перемикання в схемі, замінювати чи поправляти електроди після подачі напруги. Для заміни електродів необхідно зняти напругу.
5. Високовольтна установка повинна знаходитися під напругою лише на протязі часу, необхідного для проведення випробувань чи вимірювань.
6. Напруга повинна бути негайно знята у випадку виникнення сумніву в правильності проведення дослідів. При необхідності слід проаналізувати результати спостережень та обдумати подальший хід дій.
7. У випадку появи ознак пошкодження обладнання (розряди, дим, запах і т.п.) чи раптового припинення подачі енергії потрібно негайно вимкнути рубильник на щиті, доповісти керівникові та залишатися біля робочого місця, очікуючи на його розпорядження.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

#### **Мета роботи**

Дослідити вплив природи матеріалу та навколишнього середовища на значення питомих об'ємного та поверхневого опорів твердих діелектриків.

#### **Завдання**

– визначити  $\rho_v$  і  $\rho_s$  твердих діелектриків при кімнатній температурі (об'єкт досліджень призначає викладач).

– оцінити вплив вологи на електропровідність волокнистих, полярних і неполярних діелектриків.

– зняти температурну залежність питомого опору матеріалів (по вказівці викладача).

– визначити енергію активації власної і домішкової електропровідності діелектрика, що досліджувався.

– виконати додаткові завдання, які дано в методичних вказівках по виконанню конкретних розділів роботи.

#### **Стислі теоретичні відомості**

*Електропровідність діелектрика* це властивість проводити під дією незмінного в часі електричного поля незмінний в часі електричний струм. Ця властивість викликана спрямованим рухом вільних носіїв заряду в матеріалі під дією електричного поля. Електропровідність речовини характеризується такими параметрами, як *питома провідність  $\gamma$*  чи *питомий опір  $\rho$* . До діелектриків відносять речовини зі значеннями  $\rho$  понад  $10^8$  Ом·м.

Електропровідність діелектриків зумовлена тим, що навіть при обмежених температурах та напруженостях електричного поля в них завжди існує певна кількість вільних носіїв заряду. Причиною появи цих носіїв є такі процеси, як *іонізація* (процес утворення позитивних та негативних іонів і вільних електронів з електрично нейтральних атомів та молекул внаслідок дії часток високої енергії), *дисоціація* (процес розпаду молекул на іони при зіткненнях чи хімічній взаємодії) та *генерація* (утворення вільних електронів внаслідок переходу валентних електронів в зону провідності при дії температури, світла, часток високих енергій тощо на конденсовані діелектрики).

Природа вільних носіїв в діелектрикові визначається його фазовим 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 (високі температури) чи дії електричного поля (область сильних полів).

В рідких діелектриках, окрім іонізації причиною появи вільних носіїв заряду є процес електролітичної дисоціації. Ступінь дисоціації і, отже, електропровідність діелектрика визначаються природою його молекул. В неполярних діелектриках дисоціюють лише домішкові молекули. Тому рафіновані (очищені від домішок) неполярні рідини мають низьку провідність. У полярних рідинах окрім домішкових молекул дисоціюють власні молекули, причому ступінь дисоціації визначається електричним моментом молекул рідини. Концентрація вільних іонів в полярних рідинах набагато більша, ніж в неполярних, тому полярні рідкі діелектрики використовують в електроізоляційній техніці тільки як конденсаторні матеріали, коли вимагається електрична ізоляція з підвищеною діелектричною проникністю (силові та імпульсні конденсатори та ін.).

В твердих діелектриках електропровідність носить здебільшого іонний характер та зумовлюється процесами термічної дисоціації, причому природа вільних носіїв визначається 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.

При високих температурах і в сильних полях електропровідність твердих діелектриків може носити електронний (дірковий) характер. Електронна електропровідність при звичайних умовах характерна для сегнетоелектричних матеріалів на основі титанату барію.

Найбільш значимі фактори зовнішнього середовища, які впливають на питому провідність твердих діелектриків - температура  $T$  та вологість  $H$  - змінюють як концентрацію вільних носіїв заряду в діелектрику  $n$ , так і їхню рухливість  $u$ , внаслідок чого

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

Збільшення температури приводить до експоненціального збільшення концентрації вільних носіїв заряду внаслідок зростання ступеня дисоціації або інтенсивності термогенерації  $n(T) \sim \exp(-W_g/kT)$  ( $W_g$  - енергія активації процесу утворення вільного носію заряду) і до зростання їх рухливості  $u(T) \sim \exp(-W_n/kT)$  ( $W_n$  - енергія активації процесу переносу носія з одного положення рівноваги в інше).

Тому температурна залежність провідності твердого діелектрика, що містить  $n$  типів носіїв, описується формулою:

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

де  $W_i$  - енергія активації електропровідності  $W_i = W_{di} + W_{ni}$ .

Вплив вологи на електропровідність діелектрика зумовлюється сорбцією (поглинанням) вологи поверхнею та об'ємом твердого тіла. Поверхнева сорбція вологи приводить до зміни поверхневої провідності матеріалу; об'ємна сорбція змінює і його об'ємну провідність. Зростання провідності відбувається внаслідок як розчинення домішок та матеріалу діелектрика, так і дисоціації молекул води.

Реакція діелектрика на вплив вологи визначається характером взаємодії матеріалу з полярними молекулами води. Неполярні діелектрики не змочуються водою, тому підвищення вологості навколишнього середовища майже не відбивається на їхній провідності. Полярні діелектрики змочуються водою, їхня поверхнева провідність в значній мірі залежить від вологості навколишнього середовища та від поверхневих забруднень. Найбільш чутливі до вологи пористі діелектрики, які поглинають велику кількість води завдяки капілярному ефекту. Іонні діелектрики змочуються водою та можуть частково розчинятися в ній, тому їх електропровідність також чутлива до вологості навколишнього середовища.

### **Методичні вказівки**

Електропровідність твердих діелектриків прийнято оцінювати питомим об'ємним  $\rho_V$  та питомим поверхневим  $\rho_S$  опорам.

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

*Питомий поверхневий опір* матеріалу по значенню дорівнює поверхневому опору плоскій ділянці поверхні твердого діелектрика в формі квадрату довільного розміру при протіканні наскрізного струму між двома протилежними сторонами цього квадрату.

Як видно з визначення питомих опорів, їхні значення можна визначити по значеннях *об'ємного* та *поверхневого наскрізних струмів*. Разом з тим, при вимірах необхідно звернути увагу на те, що у діелектриках окрім *наскрізного струму*, який *не змінюється в часі*, можуть протікати *затухаючі з часом струми*, зумовлені рухом зв'язаних зарядів: *струми зміщення* та *абсорбційні струми*. Якщо у технічних умовах на матеріал немає вказівок про час витримки зразка матеріалу під напругою при вимірі, то відлік значення струму слід робити на 60-й секунді після прикладання напруги.

Для відокремлення в наскрізному струмі об'ємної та поверхневої складових, необхідних для визначення питомих опорів, рекомендується використовувати трьохелектродні вимірювальні **ячейки**, що дозволять на одному і тому ж зразку визначити питомий об'ємний та питомий поверхневий опори. Найбільш часто ці параметри визначають на плоских зразках (рис.1.1).

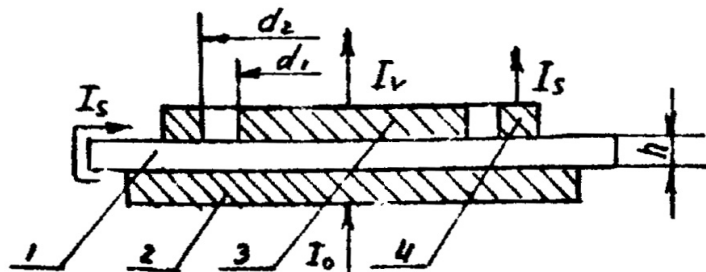


Рис. 1.1

При поданні електричної напруги на зразок 1 через високовольтний електрод 2 буде протікати загальний струм  $I$ , який складається з струмів, що протікають по об'єму матеріалу  $I_V$ , та його поверхні  $I_S$ . Ці струми легко відділити



і виміряти окремо за допомогою вимірювального електроду 3 та кільцевого захисного електроду 4. Питомий опір для описаного випадку складає:

$$\rho_v = \frac{U}{I_v} \frac{\pi d_1^2}{4h},$$

де  $U$  - прикладена напруга.

А питомий поверхневий опір:

$$\rho_s = \frac{U}{I_s} \frac{\pi(d_2 + d_1)}{d_2 - d_1}.$$

### Опис експериментальної установки

Випробування матеріалів з питомим об'ємним опором до  $10^{12}$  Ом·м звичайно проводять з допомогою гальванометра методом безпосереднього відхилення. Схема виміру об'ємного опору зразка по цьому способу показана на рис. 1.2.

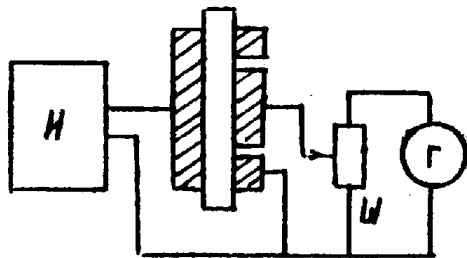


Рис. 1.2.

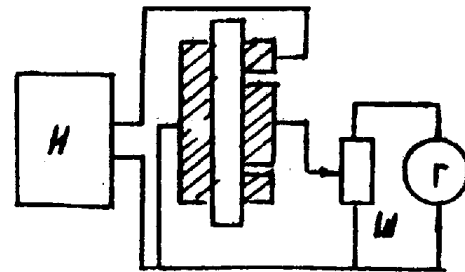


Рис. 1.3.

Об'ємний наскрізний струм від джерела живлення вимірюється гальванометром  $G$ , який має універсальний шунт  $Ш$  для розширення меж виміру струму. Поверхневий струм за допомогою кільцевого електроду відводиться в ланцюг живлення. В схемі виміру поверхневого опору зразка (рис. 1.3) поверхневий струм  $I_s$  від джерела живлення проходить крізь кільцевий та вимірювальний електроди та гальванометр, об'ємна складова відводиться в ланцюг живлення через високовольтний електрод вимірювального пристрою.

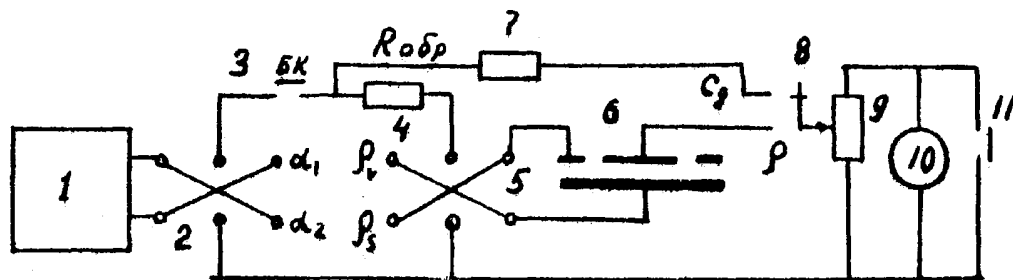


Рис. 1.4.

Блок-схема установки для вимірювання опорів зразка матеріалу показана на рис. 1.4. Установка включає в себе: 1 - стабілізоване джерело напруги до 2000 В; 2 - перемикач полярності прикладеної напруги для усунення впливу електродних ефектів та паразитних струмів; 3 - блокування, що виключає подачу на високовольтний електрод напруги при відкритих дверцях установки; 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 наскрізних струмів; 6 - трьохелектродна вимірювальна **ячейка**; 7 - зразковий резистор ( $2 \cdot 10^6$  Ом) для градування гальванометра; 8 - перемикач роду робіт для вимірювання струмів або динамічної сталої гальванометра; 9 - універсальний шунт з числами  $m = 10^4, 10^3, 10^2, 30, 1$ ; 10 - динамічний гальванометр; 11 - кнопку  $k$  для шунтування гальванометра (струм слід вимірювати при нажатій кнопці  $k$ ).

### **Порядок роботи на установці**

#### *Визначення динамічної сталої гальванометра*

Для визначення динамічної сталої гальванометра, тобто значення струму, необхідного для відхилення світлової плями на одну поділку шкали (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. Крізь гальванометр буде протікати струм  $I=U/R_{обр} m=\alpha C_d$  - ( $\alpha$  - відхилення світлової плями на гальванометрі) звідки:

$$C_d = \frac{U}{R_{обр} m \alpha}.$$

Для виключення електродних ефектів та паразитних струмів вимірювання слід повторити змінивши полярність прикладеної напруги за допомогою перемикача 3. Дані вимірів  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  заносять до табл. 1.1.

Таблиця 1.1

U, В	m	$\alpha_1$ , мм	$\alpha_2$ , мм	$C_d$ , А/мм

#### *Визначення питомих опорів діелектрика*

При вимкненому живленні та відключеному блокуванні зразок матеріалу, що досліджується, встановити в вимірювальні електроди. Перемикач 8 поставити в положення  $\rho$ . На шунті 9 встановити шунтове число  $m=10^4$ . Перемикач 5 встановити в положення, яке визначає характер опору, що вимірюється ( $\rho_v$  або  $\rho_s$ ). На джерелі 1 встановити вимірювальну напругу 1000 В. Включити блокування 3 та при натиснутій кнопці 11 відрахувати відхилення  $\alpha_1$  світлової плями гальванометра 10 та  $\alpha_2$  (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 вимірів

при  $U=1000$  В заносять у табл. 1.2, фіксують також температуру  $T$  та відносну вологість в %.

Таблиця 1.2

Матеріа л	$h, \text{м}$	$t$	$\alpha_1, \text{мм}$	$\alpha_2, \text{мм}$	$\alpha_{\text{CP}}, \text{мм}$	$\rho_V, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_S, \text{Ом}\cdot\text{м}$
$\rho_V$							
$\rho_S$							

Значення  $\rho_V$  і  $\rho_S$  слід визначати за формулами:

$$\rho_V = \frac{U}{C_D m \alpha_{\text{CP}}} \frac{\pi d_1^2}{4h} \quad \rho_S = \frac{U}{C_D m \alpha_{\text{CP}}} \frac{\pi(d_2 + d_1)}{d_2 - d_1}$$

### Температурні дослідження

1. Помістити досліджуваний матеріал в електродний пристрій установки, схема якого показана на рис. 1.5, де 1 - тераомметр; 2 - термометр; 3 - зразок; 4 - електроди; 5 - термостат.

2. Включити тераомметр, зміряти опір зразка при кімнатній температурі.

3. Ввімкнути термостат та зміряти опір зразка по п 1.4.2. з інтервалом  $5 \dots 10^\circ\text{C}$  до температури, яка визначається нагрівостійкістю досліджуваного матеріалу, та занести дані в таблиці типу 1.2.

4. Зміряти геометричні розміри електродів та зразка (площа,  $\text{м}^2$  та товщину,  $\text{м}$ ) та розрахувати значення питомого об'ємного опору матеріалу.

5. Дані вимірів та розрахунків занести у табл. 1.3.

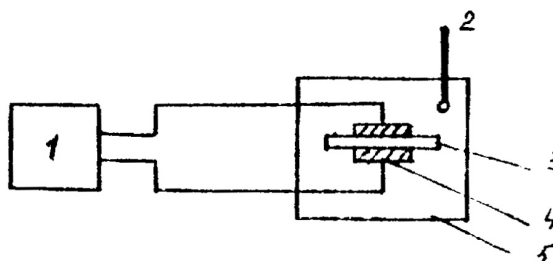


Рис. 1.5.

Таблиця 1.3.

Температур а $T$		$1/T, \text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\rho_V, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\lg \rho_V$
$^\circ\text{C}$	$\text{K}$				

6. Побудувати температурну залежність питомого опору в напівлогарифмічному масштабі від зворотної абсолютної температури ( $\lg(\rho_V) = \log(1/T)$ ). На 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 - постійна Больцмана,  $\lg(\rho_{V1} / \rho_{V2})$  - приріст логарифма питомого опору при зміні температури від  $T_1$  до  $T_2$ .

7. Пояснити температурну залежність опору досліджуваних діелектричних матеріалів.

#### *Визначення впливу вологи на електропровідність твердих діелектриків*

1. Висушити зразки матеріалів, що досліджуються при температурі 100 °С.
2. По методиці п.1.4.2. визначити питомі опори сухих зразків та занести в таблицю типу табл. 1.2.
3. Помістити зразки досліджуваних матеріалів в **ексикатор** з водою на 10, 20, 30 хв.
4. По методиці п. 1.4.2. визначити питомі опори зволжених зразків. Дані вимірів занести в таблицю типу табл. 1.2.
5. Проаналізувати вплив вологи на матеріали з різною будовою.

#### *Завдання для самостійної підготовки*

1. Уявити відмінності між електропровідністю та поляризацією, між електропровідністю та електричною провідністю.
2. Розглянути зв'язок між структурою діелектрика та типом вільних носіїв заряду в ньому.
3. Виявити відмінність між струмом витоку і наскрізним струмом діелектрика.
4. Вивчити фізичну суттєвість впливу зовнішніх чинників на параметри електропровідності діелектрика.
5. Підібрати приклади з врахуванням вашої спеціальності, коли електропровідність є визначальною при виборі матеріалу в конструкціях.

#### *Контрольні питання*

1. Чим зумовлюється електропровідність газоподібних, рідких та твердих діелектриків.
2. Які фактори впливають на електропровідність твердих діелектриків?
3. Як змінюється електропровідність діелектрика при переході з аморфного (склоподібного) стану в кристалічний?
4. Чому питома провідність полярних електроізоляційних матеріалів при рівних умовах більша, ніж у неполярних?
5. Чим викликана поверхнева електропровідність твердих електроізоляційних матеріалів.
6. Якими параметрами характеризується електропровідність діелектриків.
7. Пояснити особливості підключення зразка діелектрика при визначенні  $\rho_v$  і  $\rho_s$ .

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

#### *Мета роботи*

Дослідити вплив природи матеріалу та зовнішніх умов на поляризацію твердих діелектриків.

#### *Завдання*

1. Вивчити інструкцію по експлуатації вимірювальних приладів, що використовуються.
2. Визначити відносну діелектричну проникність твердих діелектриків (по вказівці викладача).
3. Дослідити вплив температури на ємність конденсаторів з різними діелектричними матеріалами.
4. Зобразити графічно температурну залежність ємності конденсаторів.
5. Визначити типи матеріалів, що використовуються в конденсаторах.

#### *Стислі теоретичні відомості*

Поляризація - стан речовини, який характеризується тим, що електричний момент, пов'язаний з обмеженим зміщенням зв'язаних зарядів або орієнтацією полярних молекул під дією електричного поля, для даного об'єму цієї речовини має значення, відмінне від нуля. Електричний момент одиниці об'єму речовини  $M/V$ - ( $M$  - наведений електричний момент,  $V$  - об'єм речовини) визначає значення діелектричної проникності  $\epsilon$ , яка дорівнює відношенню абсолютної діелектричної проникності до діелектричної сталої  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м і є основною характеристикою здатності діелектрика поляризуватися в зовнішньому електричному полі та ємності діелектричної конструкції.

В залежності від характеру руху зв'язаних зарядів та виду молекул у речовині розрізняють такі механізми поляризації: електронну, іонну, дипольно-релаксаційну, іонно-релаксаційну, електронно-релаксаційну, міграційну, резонансну та спонтанну.

Електронна поляризація характерна для будь-якого діелектрика. Вона пов'язана з пружним зміщенням та деформацією електронних оболонок атомів та іонів. 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. Цей механізм поляризації характерний для діелектриків з іонною будовою. Час встановлення іонної поляризації - порядку  $10^{-13}$  с.

Дипольно-релаксаційна поляризація характерна для діелектриків з іонно-ковалентним зв'язком, що мають молекули з електричним моментом, відмінним від нуля, та зв'язана з їх непружною орієнтацією. Час встановлення дипольно-релаксаційної поляризації для різних діелектриків знаходиться у межах  $10^{-1} \dots 10^{-8}$  с.

Іонно-релаксаційна поляризація зумовлюється непружним зміщенням слабо зв'язаних іонів в іонних діелектриках з нещільною кристалічною решіткою або в аморфних іонних діелектриках. Час встановлення цього механізму поляризації залежить від температури та особливостей структури діелектрика та складає при кімнатних температурах  $10^{-4} \dots 10^{-8}$  с.

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

Міграційна поляризація зумовлюється перерозподілом вільних зарядів в об'ємі неоднорідного діелектрика та їхнім накопиченням на границях розділу. Цей механізм поляризації - найповільніший. Час його становлення для різних діелектриків знаходиться у діапазоні  $10^2 \dots 10^4$  с.

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

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

2) Полярні, для яких характерні електронна та дипольно-релаксаційна поляризації (наприклад, поліаміди, фенолформальдегідні смоли, полівінілхлорид, епоксидна 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 та ін.) з типовими значеннями  $\epsilon_r = 4 \dots 10$ , а для кристалів, що містять іони титану  $\epsilon_r$  навіть більше 100;

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

При заданій температурі значення діелектричної проникності діелектриків визначається щільністю зв'язаних зарядів, які приймають участь у процесі поляризації, та залежить від частоти електричного поля. Необхідно пам'ятати, що вклад кожного механізму в процес поляризації можливий лише до певних частот, коли зв'язаний заряд встигає стежити за змінами зовнішнього електричного поля. В зв'язку з цим у неполярних діелектриків значення діелектричної проникності залишається незмінним у діапазоні частот від нуля до  $10^{15} \dots 10^{16}$  Гц, у іонних діелектриків з щільною упаковкою - від нуля до  $10^{13}$  Гц, у полярних - від нуля до  $10^4 \dots 10^{10}$  Гц.

Температура навколишнього середовища виявляє сильний вплив на процес поляризації в діелектриках. Його реакцію на зміну температури прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом діелектричної проникності  $TK\epsilon$  - котрий в загальному вигляді визначається рівнянням  $TK\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}$ . Характер

залежності діелектричної проникності від температури визначається природою матеріалу та частотою електричного поля.

У випадку електронної поляризації наведений електричний момент  $\vec{M} = N\alpha\vec{E}$  ( $N$  - загальне число атомів в речовині;  $\alpha$  - поляризованість атомів) не залежить від температури. Разом з тим, внаслідок зменшення кількості часток, які поляризуються в одиниці об'єму речовини, діелектрична проникність діелектрика при електронній поляризації з ростом температури буде зменшуватися (рис. 2.1, крива 1).

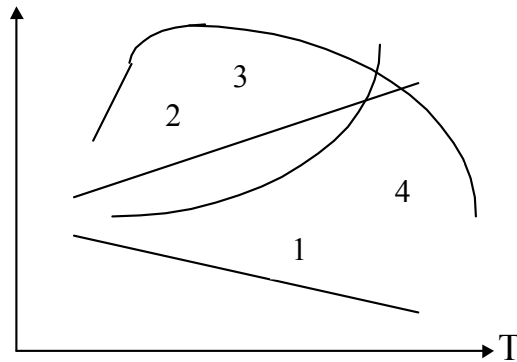


Рис. 2.1

У випадку іонної поляризації поляризованість іонних молекул або пружно зв'язаних іонів в кристалічній решітці з ростом температури збільшується в результаті розширення нагрітого тіла та посилення коливань вузлів кристалічної решітки. Температурний коефіцієнт діелектричної проникності у цьому випадку позитивний та постійний у широкому діапазоні температур (рис. 2.1, крива 2).

Електричний момент речовини з полярними молекулами визначається ступенем орієнтації цих молекул по напрямку зовнішнього поля. З зростанням температури сили зв'язку молекул послабляються, що сприяє поляризації речовини: діелектрична проникність речовини збільшується. Однак при деяких температурах енергія теплового (хаотичного) руху молекул послаблює орієнтуючу дію електричного поля, в результаті чого діелектрична проникність, що визначається ступенем орієнтації полярних молекул в речовині, зменшується (рис. 2.1, крива 3).

Збільшення температури матеріалу з домінуючим іонно-релаксаційним механізмом поляризації збільшує експоненціально концентрацію часток, приймаючих участь в процесі поляризації. Тому температурна залежність діелектричної проникності матеріалу з іонно-релаксаційною поляризацією характеризується позитивним  $TK\epsilon$ , який збільшується з ростом температури (рис. 2.1, крива 4).

### **Методичні вказівки**

Згідно [8] відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r$  може бути визначена як відношення ємності  $C_x$  конденсатора, в якому простір між електродами повністю заповнений діелектричним матеріалом, що випробовується, до ємності таким же ж чином розташованих електродів у вакуумі:

$$\varepsilon_r = C_x / C_0 \quad (2.1)$$

При визначенні по формулі (2.1) можна замінити міжелектродну ємність в вакуумі  $C_v$  на міжелектродну ємність у повітрі  $C_d$  з врахуванням, що  $\varepsilon_{TB} = 1.00053$ .

Значення  $\varepsilon_r$  визначають на зразках матеріалів у вигляді пластин або трубок з застосуванням двох- чи трьохелектродних вимірювальних систем в залежності від застосовуваних засобів вимірів. Двохелектродну систему рекомендується використовувати, якщо вимірювальний прилад не дозволяє підключати охоронний електрод, а поверхневою провідністю зразка можна знехтувати. При вимірі 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

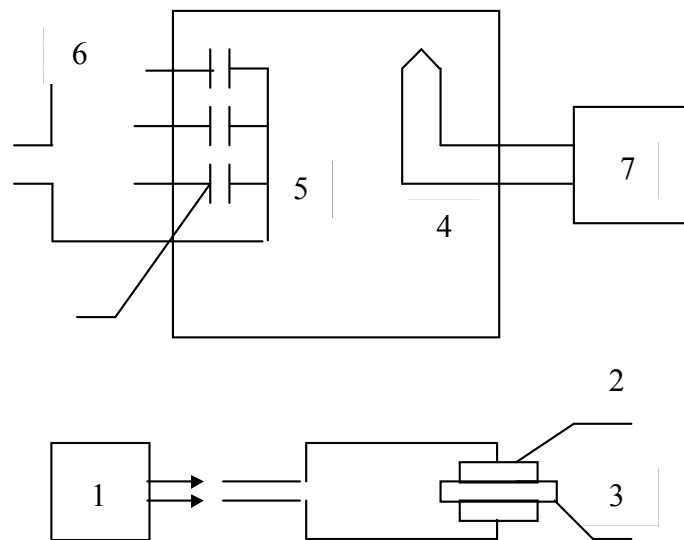


Рис. 2.2

приладів, що забезпечують тиск на зразок  $1012 \text{ кН/м}^2$ . При ємнісних вимірах необхідно враховувати, що електродна система може дати суттєвий вклад у вимірювану величину, що призведе до систематичної похибки.

### **Опис експериментальної установки**

Блок-схема експериментальної установки показана на рис .2.2, де 1- вимірник ємності; 2 - гвинтовий електродний прилад; 3 - зразок матеріалу; 4 - термостат; 5 - набір конденсаторів з різними діелектричними матеріалами; 6 - перемикач (комутатор); 7 - термопарний термометр.

### **Порядок виконання роботи**

#### *Визначення відносної діелектричної проникності матеріалу*

1. Зміряйте товщину матеріалу.
2. Вставте в електродну систему зразок матеріалу забезпечивши необхідний електродний тиск.
3. Підключіть вимірник ємності до електродної системи та зміряти сумарну ємність зразка та електродної системи  $C_1$ .
4. Вилучте з електродної системи зразок матеріалу.



5. Встановіть в електродній системі відстань між електродами, рівну товщині зразка, що досліджується.
6. Зміряйте сумарну ємність повітряного проміжку та електродного приладу  $C_2$ .
7. Результати вимірів занесіть в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Матеріал	$h, \text{м}$	$C_1, \text{пФ}$	$C_2, \text{пФ}$	$\Delta C, \text{пФ}$	$C_B, \text{пФ}$	$\epsilon_r$

*Визначення температурної залежності діелектричної проникності*

1. Підключіть вимірник ємності до комутатору термостатованого приладу.
2. Послідовно визначте ємність встановлених у термостаті конденсаторів при кімнатній температурі.
3. Включіть термостат. По мірі підвищення температури проводьте періодичні виміри ємності конденсаторів.

Примітка. При дослідженнях повинно бути зафіксоване не менше п'яти температурних точок. Ємність рекомендується вимірювати через кожні 5...10 °С.

4. Результати вимірів занести у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Температура, °С	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$

**Обробка результатів експерименту**

Відносну діелектричну проникність визначають по формулі (2.1.). Реальні ємнісні виміри не дозволяють у чистому вигляді визначити  $C_X$  та  $C_B$  через додаткову ємність електродного приладу  $C_Y$ . Фактичні виміри дадуть  $C_1 = C_X + C_Y$  та  $C_2 = C_B + C_Y$ . Ємність електродного приладу можна виключити, визначаючи  $\Delta C = C_1 - C_2 = C_X - C_B$ .

Знаючи  $\Delta C$  та ємність повітряного конденсатора, відносну діелектричну проникність можна визначити по формулі

$$\epsilon_r = C_X / C_B = \Delta C / C_B + 1$$

Ємність повітряного конденсатора

$$C_B = \epsilon_{rB} \epsilon_0 S / h$$

де  $\epsilon_{rB} \approx 1$ ;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $S$  - площа вимірювального електрода,  $S = \pi d^2 / 4$ ;  $d = 0,07$ м;  $h$  - товщина зразка матеріалу.

**Завдання для самостійної підготовки**

1. Визначити класифікаційні ознаки механізмів поляризації.
2. Виявити відмінність між пружними та релаксаційними видами поляризації
3. Встановити взаємозв'язок між будовою діелектрика та механізмами його поляризації.

4. Вивчити фізичну суть впливу зовнішніх факторів на поляризацію діелектрика.

5. Підібрати приклади використання поляризаційних явищ в інженерній практиці по вашій спеціальності.

### ***Контрольні питання запитання***

1. Що характеризує діелектрична проникність?
2. Чи є діелектрична проникність постійною величиною?
3. Які фактори впливають на діелектричну проникність?
4. Які механізми поляризації існують у діелектриках?
5. По яких ознаках здійснюють класифікацію діелектриків.
6. Чи можна отримати діелектричний матеріал з нульовим температурним коефіцієнтом діелектричної проникності?
7. Які матеріали використовуються в високочастотній техніці ?
8. Які матеріали використовуються в конденсаторобудуванні для підвищення ємності виробу?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ**

#### ***Мета роботи***

Визначити природу матеріалу по діелектричних параметрах.

#### ***Завдання***

1. Вивчити інструкцію по експлуатації вимірювальних пристроїв.
2. Визначити при кімнатній температурі  $\text{tg}\delta$  твердих діелектриків (об'єкт дослідження визначає викладач).
3. Дослідити вплив вологи на діелектричні втрати досліджуваних матеріалів.
4. Зняти температурну залежність величини ємності та  $\text{tg}\delta$  для ряду конденсаторів.
5. Побудувати температурні залежності ємності та  $\text{tg}\delta$  та визначити тип діелектрика, що використовувався у конденсаторі.
6. Побудувати залежність добутку ємності і  $\text{tg}\delta$  і дати аналіз температурної залежності діелектричних втрат для досліджених матеріалів.
6. Зняти криву іонізації діелектрика.

#### ***Стислі теоретичні відомості***

Діелектричними втратами називають електричну потужність, що виділяється в діелектрику при впливі на нього електричного поля. Діелектричні втрати в матеріалі зумовлюються процесами, що протікають за рахунок енергії зовнішнього електричного поля: направленим переносом вільних носіїв заряду,

непружним зміщенням зв'язаних зарядів або орієнтацією полярних молекул, іонізацією газу, перерозподілом носіїв заряду в неоднорідному діелектрикові.

В залежності від характеру домінуючих процесів розрізняють діелектричні втрати на електропровідність, релаксаційні та іонізаційні втрати, зумовлені відповідно наскрізним струмом діелектрика, повільними механізмами поляризації та іонізацією діелектрика.

Діелектричні втрати викликають розігрів діелектрика, що може призвести до теплового пробою, або до прискореного старіння. Тому при виборі матеріалу для проєктованого електротехнічного виробу необхідно знати вид та порядок величини діелектричних втрат, що можуть мати місце при заданих умовах експлуатації.

Мірою діелектричних втрат в матеріалі служать кут діелектричних втрат  $\delta$ ; тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta$ ; повна потужність діелектричних втрат; питома потужність діелектричних втрат; коефіцієнт діелектричних втрат  $\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$ .

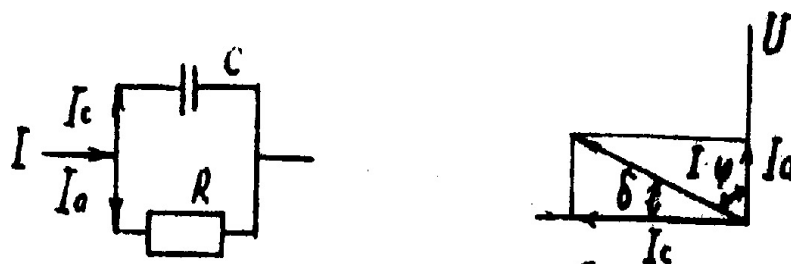


Рис. 3.1.

Кутом діелектричних втрат називають кут, що доповнює до  $90^\circ$  кут зсуву фаз  $\varphi$  між струмом та напругою в ємнісному ланцюзі. У випадку ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджає вектор напруги на кут, рівний  $90^\circ$ ; при цьому діелектричні втрати будуть відсутні. Чим більше розсіювання у діелектрикові потужність, що переходить в теплоту, тим менш кут зсуву фаз  $\varphi$  та тим більше кут діелектричних втрат  $\delta$  та його функція  $\operatorname{tg}\delta$ . Паралельна еквівалентна схема діелектрика з втратами та його векторна діаграма показані на рис. 3.1. Повна потужність діелектричних втрат в електроізоляційній конструкції  $P = \omega U^2 \operatorname{tg}\delta C$

Питома  $P_{\text{вд}} = \omega E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$  де  $E$  - напруженість електричного поля в діелектрику,  $\varepsilon$  характеристикою міри навантаження матеріалу.

На практиці діелектричні втрати матеріалу характеризуються тангенсом куту діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta$  із-за відносної простоти виміру цього параметру. Значення  $\operatorname{tg}\delta$  у залежності від природи матеріалу знаходиться у діапазоні від  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$ . Про умови можливої експлуатації діелектрика судять по значенню коефіцієнта діелектричних втрат  $\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$ . Так матеріали з малим значенням  $\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$  перспективні для високовольтної та високочастотної ізоляції, з більшим значенням - можуть використовуватися в низьковольтних та низькочастотних конструкціях.

Характер діелектричних втрат та їхнє значення визначаються будовою речовини. Так, у однорідних неполярних та іонних діелектриках з щільною

упаковкою діелектричні втрати визначаються, в основному, втратами на домішкову електропровідність, бо процеси поляризації з пружним зміщенням зв'язаних зарядів протікають без втрат енергії зовнішнього поля,  $\text{tg}\delta$  для них складає  $10^{-5} \dots 10^{-4}$ .

У однорідних полярних, а також іонних діелектриків з нещільною упаковкою діелектричні втрати включають в себе втрати на електропровідність та релаксаційні втрати та досягають значень  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  та більш.

Для газоподібних діелектриків, а також твердих або рідких діелектриків, що містять газові включення, при високих напругах характерні окрім інших видів іонізаційні втрати.

Діелектричні втрати в матеріалі залежать від зовнішніх умов (частоти та напруженості електричного поля, температури та вологості навколишньої середовища), а тому приведені в довідковій літературі дані по  $\text{tg}\delta$  відповідають певним умовам вимірювання. По одноразово зміряному значенню  $\text{tg}\delta$  важко провести ідентифікацію діелектрика. Повну інформацію про тип діелектричного матеріалу дадуть функціональні залежності  $\text{tg}\delta$  від частоти електричного поля, його напруженості, а також температури навколишньої середовища, оскільки кожний вид діелектричних втрат характеризується своєю реакцією на зміну зовнішніх умов.

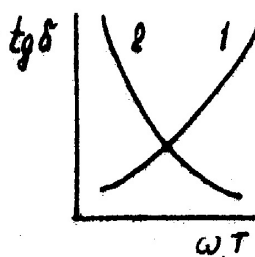


Рис. 3.2.

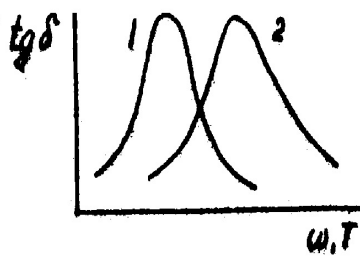


Рис. 3.3.

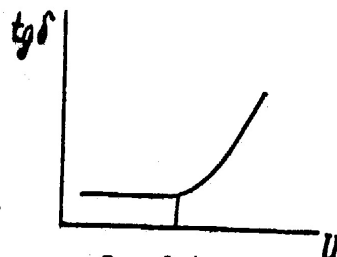


Рис. 3.4.

Для втрат на електропровідність характерна монотонно зростаюча залежність  $\text{tg}\delta$  від температури (рис. 3.2, крива 1) та гіперболічна - від частоти (крива 2).  $\text{tg}\delta$  при релаксаційних втратах має максимум в залежності від температури (рис. 3.3, крива 1) та від частоти (крива 2). Іонізаційні втрати з'являються лише при напругах, що перевищують напругу виникнення часткових розрядів  $U_{\text{вчр}}$ . (рис. 3.4).

### **Методичні вказівки**

Діелектричні втрати визначають згідно з [8]. Для низькочастотних вимірів (до декількох кілогерц) звичайно використовують мостові прилади, причому високовольтні виміри на частоті 50 Гц виконують на мостах типу мосту Шерінга.

### **Опис експериментальної установки**

Блок-схема експериментальної установки показана на рис. 3.5, де 1 - міст змінного струму; 2 - електродний прилад; 3 - зразок матеріалу, що досліджується; 4 - термостат; 5 - термопарний термометр; 6 - конденсатори з різними діелектричними матеріалами; 7 - перемикач.

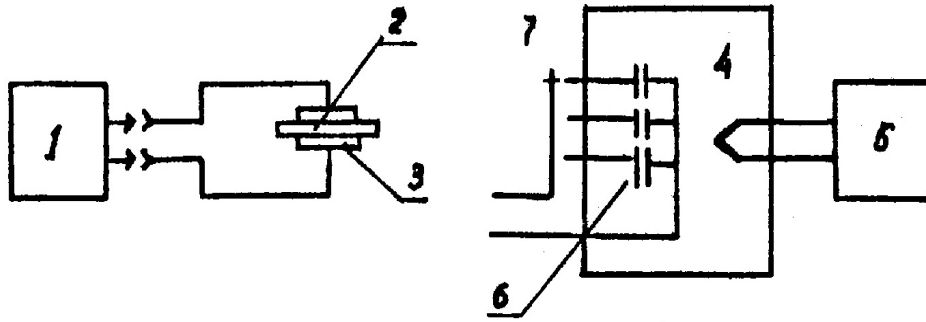


Рис. 3.5.

**Порядок виконання роботи**

*Визначення  $tg\delta$  матеріалу*

1. Помістити досліджуваний матеріал між електродами електродного приладу.
2. Підключити міст змінного струму до електродного приладу, ввімкнути міст і зміряти значення  $tg\delta$  та ємності зразка.
3. Якщо дослідження проводяться на зразках матеріалів, зміряти товщину матеріалу, що досліджується, та діаметр вимірювального електрода.

Таблиця 3.1

Матеріал	Товщина зразка, м	Діаметр електрода, м	Ємність конденсатора, Ф	$tg\delta$

4. Дані вимірів занести в табл. 3.1.
- 5 Розрахувати діелектричну проникність матеріалу.
6. По значенням  $\epsilon$  та  $tg\delta$  визначити тип діелектрика.

*Дослідження впливу вологи на діелектричні втрати матеріалу*

1. Висушити матеріали при температурі 100 °С.
2. Визначити  $tg\delta$  матеріалу по методиці підрозділ 3.4.1.
3. Помістити матеріали, що досліджуються в ексікатор з водою на 10, 20, 30 хв.
4. Провести визначення  $tg\delta$  зволжених матеріалів по методиці підрозділ 3.4.1.
5. Дані вимірів занести в табл. типу 3.1.
6. По характеру реакції на вологу визначити тип діелектрика.

*Дослідження впливу температури на діелектричні втрати матеріалу*

1. Підключити міст змінного струму до термостатованого приладу.
2. Зміряти  $tg\delta$  та ємність конденсаторів при кімнатній температурі.
3. Ввімкнути термостат по мірі його нагріву періодично через 10 °С вимірювати  $tg\delta$  та ємність кожного конденсатора.

4. Побудувати температурні залежності  $tg\delta$ , ємності та фактора втрат кожного конденсатора.

5. Визначити тип діелектрика в конденсаторах.

#### *Визначення іонізаційних втрат у діелектрику*

1. Помістити матеріал в електродний прилад високовольтного мосту змінного струму.

2. Включити живлення мосту.

3. Включити блокіровку та встановити вимірювальну напругу на зразку (по вказівці викладача).

4. Провести балансування моста та визначити при обраних напругах значеннях  $tg\delta$  та ємності.

5. Змінити значення вимірювальної напруги та провести операції по п. 4.

6. Побудувати залежність  $tg\delta$  досліджуваного матеріалу (не менше п'яти точок) від прикладеної напруги.

7. Зробити висновок про наявність у матеріалі газових включень.

#### *Завдання для самостійної підготовки*

1. Вияснити фізичну суть діелектричних втрат та їхнє практичне значення.

2. Обґрунтувати, що для діелектричних втрат на електропровідність характерна гіперболічна залежність  $tg\delta$  від частоти.

3. Вивчити закономірності впливу зовнішніх факторів (електричне поле, його частота, температура, вологість) на діелектричні втрати у діелектрику.

4. Встановити взаємозв'язок між будовою речовини та домінуючими в ньому видами діелектричних втрат.

5. Підібрати приклади застосування діелектриків з врахуванням вашої спеціальності для випадку, коли діелектричні втрати - основний критерій придатності матеріалу.

#### *Контрольні запитання*

1. Чим викликані втрати електричної енергії в діелектричних матеріалах?

2. Чи є значення  $tg\delta$  постійним для матеріалу?

3. Від яких факторів залежать діелектричні втрати?

4. Як по діелектричних втратах визначити тип діелектрика?

5. Чи існують діелектрики без втрат?

6. По якій ознаці визначити сферу застосування дослідженого матеріалу.

7. Як по діелектричних втратах визначити наявність у матеріалі газових включень?

8. Чи можна по значенню діелектричних втрат однозначно визначити тип діелектрика?

9. Як по діелектричних втратах визначити тип діелектрика?

### ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

#### *Мета роботи*

Дослідити загальні закономірності пробою діелектриків.

#### *Завдання*

1. Вивчити інструкцію по експлуатації випробувального обладнання.
2. Визначити в однорідному електричному полі значення пробивної напруги для повітря при різних тисках.
3. Побудувати та пояснити залежність електричної міцності повітря від тиску.
4. Визначити у неоднорідному електричному полі значення міцності 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.
7. Оцінити вплив зволоження (регенерації) на електричну міцність масла.
8. Визначити електричну міцність твердих діелектричних матеріалів по завданню викладача при постійному або змінній напрузі.

#### *Стислі теоретичні відомості*

Всі діелектрики зберігають свої електроізоляційні властивості тільки лише до необхідного значення напруженості електричного поля, після чого виникає пробій. Пробоєм називається явище утворення у діелектрикові провідникового каналу під дією електричного поля. Здатність діелектрика витримувати дію електричного поля оцінюється його електричною міцністю. Електрична міцність діелектрика - мінімальна напруженість однорідного електричного поля, що призводить до пробою діелектрика. Електрична міцність, діелектрика є характеристикою матеріалу.

Витривалість електроізоляційних конструкцій до впливу електричного поля можна оцінювати по значенню пробивної напруги. Пробивна напруга - мінімальна прикладена до ізоляції електрична напруга, що призводить до її пробою.

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

При електричному пробої зростання провідності діелектрика зумовлюється ударною іонізацією або розривом зв'язків між частками діелектрика під дією електричного поля. Цей механізм пробою є домінуючим для газоподібних діелектриків та при певних умовах може бути відповідальним за пробій рідких та твердих діелектриків.

При тепловому пробої зростання провідності діелектрика зумовлюється зростанням концентрації іонів із-за термодисоціації та електронів із-за термогенерації при розігріві діелектрика під дією електричного поля. Цей

механізм пробою характерний для твердих діелектриків в тому випадку, коли внаслідок діелектричних втрат порушується теплова рівновага діелектрика. Пробивна напруга при тепловому механізмі часто характеризує діелектричний виріб, а не матеріал, оскільки в значній мірі визначається умовами відводу від діелектрика виділеної в ньому теплоти.

### *Пробій газоподібних діелектриків*

Газоподібні діелектрики є середовищем, що виконує роль електричної ізоляції у більшості електротехнічних приладів. Газ служить ізоляцією у повітряних лініях електропередачі, електричних апаратах, газонаповнених кабелях, конденсаторах та трансформаторах.

В газі завжди існує невелика кількість позитивних та негативних іонів, а також електронів, що утворюються під дією зовнішніх іонізуючих факторів, космічного та ультрафіолетового проміння, випромінювань радіоактивних речовин та т.п., яка зумовлює питому провідність газу на рівні  $10^{-15}$  См. Пробій газів пов'язаний з явищами ударної іонізації та фотоіонізації. При створенні електричного поля заряджені частки починають переміщуватися, набуваючи при цьому додаткову енергію:

$$W_E = qU_\lambda,$$

де  $q$  - заряд;  $U_\lambda$  - різниця потенціалів на довжині вільного пробігу  $\lambda$ .

Здобута зарядженими частками енергія передається атомам або молекулам газу, з котрими ці частки зіштовхуються. Якщо ця енергія достатньо велика, то може відбутися іонізація молекул, тобто їхнє розщеплення на електрони та позитивні іони. В результаті іонізації газу збільшується кількість вільних носіїв в ньому та його провідність. Умовою, яка визначає можливість іонізації, є нерівність  $W_E \geq W_U$ , де  $W_U$  - енергія іонізації газу.

Утворені при ударній іонізації заряджені частки в свою чергу прискорюються електричним полем та іонізують інші молекули, утворюючи електронну лавину. В ряді випадків спостерігається збудження молекул, пов'язане з переходом електронів на більш віддалену від ядра орбіту. При переході молекули у рівноважний стан випромінюється фотон, котрий поглинається якою-небудь іншою молекулою та може викликати її фотоіонізацію з наступним утворенням 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 починається просування зустрічного потоку позитивно заряджених часток до катоду із утворенням газорозрядної плазми. 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 відстань між електродами менша довжини вільного пробігу електронів для набуття енергії, необхідної для іонізації газу в міжелектродному просторі, також вимагається підвищена напруженість. Внаслідок того, що для пробою газу необхідно утворення в проміжку певної кількості носіїв, пробивна напруга газу визначається добутком його тиску  $P$  на довжину проміжку, а не кожним з цих



факторів окремо. Кількісно ця залежність описується законом Пашена. Електрична міцність газу визначається і його складом. Наявність у газі компонентів (наприклад, парів води), здатних захопити вільні електрони з утворенням негативних від'ємних іонів, збільшує електричну міцність газу. Великий вплив на електричну міцність газу має степінь однорідності електричного поля.

Електрична міцність повітря у однорідному полі при довжині проміжку порядку 1 см та нормальних умовах складає близько 30 МВ/м, елегазу -75 МВ/м. 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.

### *Пробій рідких діелектриків*

Рідкі діелектрики (трансформаторне масло, совол, совтол та ін.) широко використовуються у високовольтному обладнанні для просочення ізоляції кабелів та конденсаторів, для заливки трансформаторів, вимикачів та вводів. У деяких випадках рідкі діелектрики виконують додаткові функції теплоносіїв або середовища для гасіння дуги. Електрична міцність рідких діелектриків складає 40...200 МВ/м. Підвищені значення її у порівнянні з газоподібними діелектриками зумовлені зменшеною довжиною вільного пробігу електронів. Електрична міцність рідких діелектриків залежить від багатьох факторів (температури, тиску, частоти та форми кривої напруги, форми та матеріалу електродів), проте особливо слід відзначити сильний вплив домішок.

Пробій дуже чистого та вільного від газу рідкого діелектрика пов'язують з двома основними процесами - ударною іонізацією електронами та холодною емісією з катоду.

Пробій технічно чистих 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 обов'язкові операції рафінування одержуваного продукту.

### *Пробій твердих діелектриків*

Тверді діелектрики 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 у самих різноманітних приладах, де використовується електрика.

Характерною особливістю твердих діелектриків, що відрізняє їх від рідких та газоподібних, є те, що після пробою вони не відновлюють свої ізоляційні властивості і тому пробій твердої ізоляції у процесі експлуатації недопустимий.

Повна втрата електричної міцності твердих діелектриків спостерігається як при електричному, так і при тепловому пробі. Тому без знання закономірностей зміни електричної міцності твердих діелектриків в залежності від характеру

пробою, природи та особливостей будови діелектрика, впливу зовнішніх факторів неможливі конструювання та правильна експлуатація електронних виробів та електрообладнання.

Розглянемо основні закономірності пробою твердих діелектриків. Згідно теорії електричного пробою Фрьоліха пробивна напруженість твердих діелектриків слабо зростає в області низьких температур та експоненціально знижується в області високих. Така ж температурна залежність електричної міцності згідно теорії теплового пробою Фока-Вальтера-Семенова спостерігається і при тепловому пробойі. Тому незалежність  $U_{\text{ПР}}$  від температури свідчить про електричний пробой.

Більш чітку різницю між електричним та тепловим пробоем можна провести, використовуючи залежність пробивної напруги від частоти напруги та від часу. При електричному пробойі  $U_{\text{ПР}}$  слабо залежить від частоти та форми діючої напруги, визначаючись його амплітудою. При тепловому пробойі  $U_{\text{ПР}} \sim f^{-0,5}$  значення його визначається діючим значенням.

Якщо пробой відбувається в однорідному полі, то при електричному пробойі електрична міцність твердих діелектриків не залежить від товщини, а при тепловому - знижується, причому при більших товщинах - по гіперболічному закону, тобто пробивна напруга перестає залежати від товщини діелектрика.

Електрична міцність неоднорідних діелектриків значно знижується при збільшенні площі електродів та товщини діелектрика. Це явище зв'язується з неоднорідністю діелектрика, наявністю у ньому слабких місць, ймовірність попадання яких в міжелектродний простір зростає із збільшенням об'єму діелектрика. При використанні двох тонких шарів неоднорідного діелектрика, наприклад конденсаторного паперу, ймовірність збігу слабких місць зменшується, тому електрична міцність підвищується. Це відбувається до певного числа шарів  $n$ . При подальшому збільшенні числа шарів  $E_{\text{ПР}}$  зменшується. Означена закономірність має практичне значення при виборі оптимальної кількості шарів багатошарового діелектрика.

Різде 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  $U_{\text{РОБ}}$  повинна бути значно нижче пробивної  $U_{\text{ПР}}$ . Відношення  $U_{\text{ПР}}/U_{\text{РОБ}}$  носить назву коефіцієнта запасу по електричній міцності. Він встановлюється на підставі результатів випробувань матеріалів і досвіду експлуатації електроізоляційних конструкцій з врахуванням впливу перерахованих факторів. Для перевірки здатності електричної ізоляції витримувати дію високої напруги при прийнятно-здавальних випробуваннях та в експлуатації вона випробується в обов'язковому порядку нормованою підвищеною напругою.

### **Опис експериментальної установки**

Випробування по визначенню електричної міцності трансформаторного масла та повітря проводиться на комбінованій установці за допомогою апарату типу АВМТІ-60 на змінному струмі промислової частоти.

Блок-схема установки показана на рис. 4.1, де 1-апарат АВМТІ-60; 2-осередок для виміру пробивної напруги рідких діелектриків; 3 - розрядник типу площина - голка із регульованим розрядним проміжком; 4 - вакуумна камера; 5 - шарові електроди; 6 - форвакуумний насос; 7 - вакуумметр; 8 - перемикач роду робіт (перемичка); 9 - електроди для визначення електричної міцності твердих плівкових діелектриків.

### **Порядок виконання роботи**

#### *Дослідження впливу тиску на електричну міцність повітря*

1. Під'єднати за допомогою перемички шарові електроди до виводів високовольтного трансформатора випробувального апарату АВМТІ - 60.
2. Ввімкнути блокування комбінованої установки.
3. Ввімкнути автомат апарату.
4. Плавню обертаючи ручку автотрансформатора, підвищувати випробувальну напругу (зі швидкістю 1 кВ/с) до пробою.
5. Записати значення пробивної напруги.
6. Повернути автотрансформатор у похідний стан.
7. Ввімкнути форвакуумний насос та створити розрідження в вакуумній камері.
8. Визначити тиск у вакуумній камері як різницю між показами барометру та манометричного вакуумметра.
9. Зміряти пробивну напругу при встановленому тиску повітря в камері по пп. 3-6.

**Примітка.** Рекомендується проводити трикратний вимір напруги пробою для кожного значення тиску повітря.

10. Результати вимірів занести у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Пробивна напруга, кВ	Тиск повітря, мм рт.ст.							
	атм	атм-100	атм-200	атм-300	атм-400	атм-500	атм-600	атм-700
$U_1$								
$U_2$								
$U_3$								
$U_{CP}$								
$E, \text{кВ/м}$								

$$E_{\text{пробивне}} = U_{\text{пробивне}} / d, \text{ де } d = 10 \text{ мм.}$$

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

1. Під'єднати за допомогою перемички проміжок площина - голка до виводів високовольтного трансформатора.
2. Встановити за допомогою шаблону задану відстань між електродами.
3. Визначити пробивну напругу проміжку по пп. 2-5 підрозділу 4.5.1. для зазначених в табл. 4.2 відстаней.
4. Результати вимірів занести у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Пробивна напруга, кВ	Відстань між електродами, см						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$U_1$							
$U_2$							
$U_3$							
$U_{CP}$							
$E, \text{кВ/м}$							

*Визначення електричної міцності масла*

1. Зняти перемичку з установки.
2. Осередок, наповнений досліджуваним трансформаторним маслом, під'єднати до високовольтних виводів апарату АВМТІ –10.
3. Визначити пробивну напругу масла по пп. 2-5 підрозділу 4.5.1 з інтервалом між випробуваннями не менше 5 хв.
4. Результати випробувань сухого або зволоженого масла занести в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_{CP}$	$E \text{кВ/м}$

$l=2,5\text{мм}$

При визначенні електричної міцності масла врахувати, що у осередку відстань між електродами 2,5 мм.

Для оцінки впливу вологи на електричну міцність масла необхідно додати невелику кількість води в досліджуване масло. Для оцінки впливу регенерації на електричну міцність масло необхідно піддати тепловій обробці.

*Визначення електричної міцності кабельного паперу*

1. Від'єднати осередок з трансформаторним маслом від високовольтних електродів.
2. Під'єднати за допомогою перемичок електродну систему 9.
3. Визначити пробивну напругу  $U_{ПР}$  одного шару непросоченого паперу при діаметрі електродів 10 та 50 мм. Випробування повторити 10 раз та по

середньому значенню пробивної напруги обчислити електричну міцність непросоченого паперу.

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

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

### ***Аналіз результатів та формулювання висновків по роботі***

В залежності від обсягу виконаних вимірів проаналізувати вплив факторів на електричну міцність діелектриків, що знаходяться у різних агрегатних станах та сформулювати рекомендації по практичному використанню одержаних результатів.

### ***Завдання для самостійної роботи***

1. Вивчити загальні закономірності пробою.

2. Вивчити особливості розвитку лавинного та стримерного пробоїв газоподібних діелектриків.

3. Розібратись, чому не спостерігається кореляція (відповідності) між енергією іонізації молекул газу та його електричної міцності.

4. Вивчити відмінності в механізмах пробою особливо чистих та технічних рідких діелектриків.

5. Вивчити закономірності розвитку електричного та теплового пробою твердих діелектриків та умови, при яких можуть спостерігатися ці, а також іонізаційний та електрохімічний види пробоїв.

6. Виділити основні характеристики діелектриків, що визначають їхню електричну міцність.

7. Ознайомитись з механізмами впливу різних зовнішніх факторів (частоти або напруженості електричного поля, його конфігурації (однорідності), температури, вологості та т. д.) на електричну міцність діелектриків у різному агрегатному стані.

8. Виявити, які можливості суміщення функцій (електрична ізоляція, тепловідвід, конструкційні та ін.) існують для різних електроізоляційних матеріалів. Випробувальні напруги для різних видів електрообладнання на різні класи напруг регламентуються ГОСТ 1516.1-76, методичні питання випробувань - ГОСТ 1516.2-76;

### ***Контрольні запитання***

1. Які процеси призводять до пробою діелектриків?

2. Механізм пробою газоподібних діелектриків.

3. Які фактори впливають на електричну міцність газоподібних діелектриків?

4. Як можливо підвищити робочу напругу газонаповнених електротехнічних конструкцій?

5. Назвіть особливості пробою газоподібних діелектриків у неоднорідному електричному полі.

6. Механізми пробою рідких діелектриків.

7. Як домішки виявляють на електричну міцність рідких діелектриків?
8. Як можливо збільшити електричну міцність трансформаторного масла?
9. Як впливає відстань між електродами розрядного проміжку на електричну міцність масла та газоподібних діелектриків?
10. Пояснити екстремальний перебіг електричної міцності кабельного паперу у залежності від кількості шарів.
11. Як та чому геометричні фактори впливають на пробивну напругу електроізоляційних конструкцій?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

#### ***Мета роботи***

Дослідити вплив температури на електропровідність напівпровідника, навчитись визначати тип вільних носіїв заряду.

#### ***Завдання***

1. Визначити тип електропровідності напівпровідникового матеріалу.
2. Зняти температурну залежність питомого опору напівпровідникового матеріалу у діапазоні температур від кімнатної до 100 °С.
3. Побудувати температурну залежність питомого опору у лінійному масштабі.
4. Визначити значення  $TK\rho$  напівпровідникового матеріалу при температурах 60 і 100 °С.
5. Побудувати температурну залежність питомого опору у напівлогарифмічному масштабі  $lg\rho = f(1/T)$
6. Визначити значення ширини забороненої зони напівпровідника.
7. Обчислити теоретичні значення  $TK\rho$  матеріалу при температурах 60 та 100 °С.

#### ***Стислі теоретичні відомості***

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. Характер реакції напівпровідника на зовнішній вплив визначає можливу область його технічного застосування. В табл. 5.1 показана область застосування напівпровідникових матеріалів без врахування контактних явищ в напівпровідникових приладах та інтегральних схемах.

<b>Зовнішній фактор</b>	<b>Реакція матеріалу</b>	<b>Можлива область застосування</b>
Температура T Випромінювання $h\nu$	Зміна провідності Зміна провідності	Терморезистори Фоторезистори, датчики випромінювання
Електричне поле E	Зміна провідності	Варистори
	Генерація високочастотних коливань	Діоди Ганна
Магнітне поле H	Зміна провідності Виникнення поперечної ЕРС	Магніторезистори Датчики Холла, вимірники магнітних полів
Механічне навантаження G	Зміна провідності	Тензорезистори
Градiєнт температури	Виникнення термоЕРС	Термогенератори, вимірники температури

Напівпровідникові властивості мають багато електротехнічних матеріалів. Їхню систематизацію проводять по ряду класифікаційних ознак. Зокрема, по фазовому стану розрізняють тверді та рідкі напівпровідники, по структурі - кристалічні та аморфні, по складу – прості, утворені атомами одного хімічного елементу, складні, утворені атомами двох або більшого числа хімічних елементів, та композиційні, що являють собою механічну суміш напівпровідникової та діелектричної фази. Найважливішою ознакою класифікації напівпровідникових матеріалів є характер їх електропровідності. По цій ознаці розрізняють власні напівпровідники, які не містять дефектів та домішок, що впливають на їхню електропровідність, та домішкові, які, в свою чергу, у залежності від 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 eV) забороненої зони на енергетичній діаграмі. На рис. 5.1, а показана енергетична діаграма для власного напівпровідника, у якого електрони можуть надходити в зону вільних енергетичних рівнів лише з валентної зони. У валентній зоні в результаті переходу зона - зона з'являється вільний дозволений енергетичний рівень, на який можуть переходити електрони валентної зони. Вакансію для валентного електрона прийнято називати діркою. Вона переміщується в електричному полі у напрямку, протилежному переміщенню вільного електрона. Враховуючи це, у власному напівпровіднику в кожному випадку збудження водночас створюються два носії з супротивними зарядами, їх концентрації рівні одна одній:

$$n_i = P_i,$$

де  $n_i$  - концентрація вільних електронів;  $P_i$  – концентрація дірок .

При заданих умовах (температура, освітлення) значення  $n_i$  визначається природою матеріалу:

$$n_i = 2N_C \exp(-E_D / 2KT),$$

де  $N_C$  - концентрація енергетичних рівнів для електронів у зоні провідності;  $E_D$  - ширина забороненої зони напівпровідника;  $K$  - постійна Больцмана.

Значення питомої провідності власного напівпровідника  $\gamma_i$  визначається не лише концентрацією вільних носіїв заряду, але і їхньою рухливістю:

$$\gamma_i = qn_i(U_n + U_p),$$

де  $U_n, U_p$  - рухливість відповідно електронів та дірок.

Через більшу інерційність 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 решітки (фотонне 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

$$\gamma_i(T) = A \exp(-E_D / 2KT),$$

де  $A$  - константа.

#### *Електропровідність домішкового напівпровідника*

Будь-якому порушенню періодичності кристалічної решітки матеріалу (вакансія, атом домішки) відповідає поява у забороненій зоні напівпровідника дозволених для електронів енергетичних рівнів. Якщо такі зайняті електронами рівні розташуються біля вільної зони, то перехід електронів з цих рівнів в зону провідності буде спостерігатися при менших енергетичних збудженнях, ніж перехід зона - зона (рис. 5.1, б). Концентрація вільних електронів у цьому випадку перевищує концентрацію дірок:  $n \gg p$ . Напівпровідник має яскраво виражену електронну електропровідність:  $\gamma = qnU_n$ . Дефекти кристалічної решітки, здатні при збудженні віддати електрон у зону провідності, прийнято називати донорами. Вони зумовлюють електропровідність електронних напівпровідників.

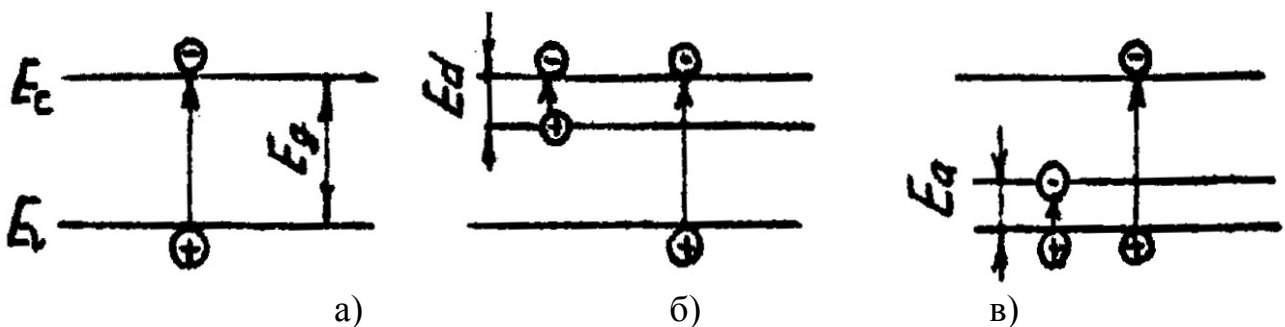


Рис.5.1.

Якщо вільні дозвалені енергетичні рівні з'являються у забороненій зоні поблизу валентної зони, то ймовірність переходу валентного електрона на цей рівень буде значно перевищувати ймовірність переходу зона - зона (рис. 5.1, в), в



результаті чого концентрація дірок у валентній зоні буде перевищувати концентрацію електронів у зоні провідності:  $p \gg n$ . Напівпровідник буде володіти дірковою електропровідністю:  $\gamma = qnU_p$ . Дефекти кристалічної решітки, здатні при збудженні захоплювати електрони з валентної зони, називаються акцепторами. Напівпровідникові матеріали, леговані акцепторними домішками, прийнято називати дірковими напівпровідниками.

Концентрація вільних носіїв заряду у домішкових напівпровідниках залежить від міри легування, природи домішок та температури навколишньої середовища. При невисоких температурах 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 решіток.

При середніх температурах домішки повністю іонізовані:  $n=N_d; p=N_a$ ; при високих температурах електропровідність напівпровідника стає власною:  $n=n_i; p=p_i$ ;

У домішкових напівпровідниках окрім фотонного розсіювання необхідно враховувати розсіювання рухливих заряджених часток на іонізованих домішках. Розсіювання на домішках впливає на рухливість носіїв заряду при низьких температурах ( $U_i \sim T^{3/2}$ ), при підвищенні температури помітніше стає розсіювання на теплових коливаннях вузлів кристалічної решітки ( $U_\phi \sim T^{3/2}$ ).

### **Методичні вказівки**

#### *Визначення типу електропровідності*

Для визначення типу електропровідності напівпровідника пропонується використати метод термозонда, що полягає в нагріванні одного кінця напівпровідника гарячим електродним зондом або будь-яким зовнішнім джерелом теплоти. Якщо випробовується напівпровідник  $n$ -типу, то у нагрітому кінці за рахунок зовнішньої теплової енергії буде звільнена з донорних рівнів більша кількість електронів, ніж у холодному кінці (рис. 5.2). Надлишкові електрони дифундують до холодного кінця напівпровідника, і заряджають його негативно. Гарячий кінець внаслідок відходу електронів зарядиться позитивно. Між гарячим та холодним кінцями напівпровідника виникне термоЕРС.

#### **Опис експериментальної установки**

Схема експериментальної установки, на якій проводиться визначення типу електропровідності, показана на рис. 5.3, де 1 - досліджуваний напівпровідниковий матеріал; 2 - електрод-зонд; 3 - нагрівач; 4 - масивний холодний електрод; 5 - гальванометр.

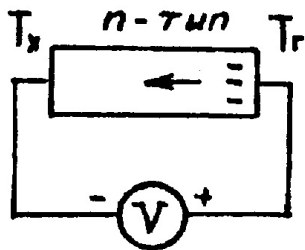


Рис. 5.2.

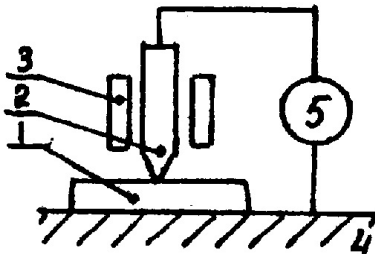


Рис. 5.3.

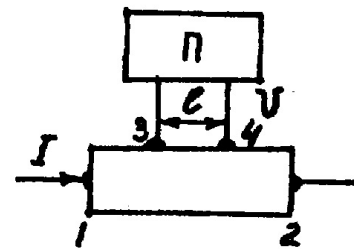


Рис. 5.4.

### **Порядок виконання роботи**

1. Включити нагрівач зонда.
2. Покласти матеріал на масивний металевий електрод.
3. Короткочасно торкнутися зразка нагрітим зондом та визначити по відхиленню стрілки гальванометра полярність гарячого кінця напівпровідника.

### **Вимір питомого опору напівпровідникових матеріалів**

При вимірі питомого опору напівпровідника основним джерелом помилок є перехідний опір на контактах метала - напівпровідник та виникаюча в них термоЕРС. Тому для вимірів використовуються компенсаційні зондові методи. Принципова схема компенсаційного методу показана на рис. 5.4. Через контакти 1 та 2 зразка матеріалу пропускають струм силою  $I$ . До поверхні зразка притискаються два електрода 3 та 4 з міжелектродною відстанню  $l$ . Різниця потенціалів між електродами вимірюється потенціометром  $\Pi$ . Якщо поперечний перетин зразка  $S$ , той його питомий опір  $\rho = US/I$ .

### **Опис експериментальної установки**

Дослідження електропровідності напівпровідника проводиться на установці, блок-схема якої показана на рис. 5.5, де 1 - зразок напівпровідникового матеріалу; 2 - генератор струму; 3 - термостат; 4 - потенціометр постійного струму; 5 - термопарний термометр.

### **Порядок виконання роботи**

1. Зміряти геометричні розміри зразка та помістити його в електродний прилад.
2. Встановити робітничий робочий струм; робочий струм не повинен викликати розігрів зразка.
3. Зміряти потенціометром постійного струму падіння напруги на потенційних зондах при кімнатній температурі.
4. Включити термостат.
5. По мірі розігріву зразка через кожні 10 °С проводити вимір падіння напруги на потенційних зондах. Робочий струм повинен підтримуватися на одному рівні.
6. Дані вимірів при перетині зразка взірця  $S = 9,43 \text{ см}^2$ ; відстані між зондами  $l = 6 \text{ мм}$  та робочому струмі 10 мА занести до табл. 5.2.

Температура		$1/T, K^{-1}$	Напруга на зондах, В	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$\lg \rho$
$^{\circ}\text{C}$	К				

### Визначення ширини забороненої зони напівпровідника

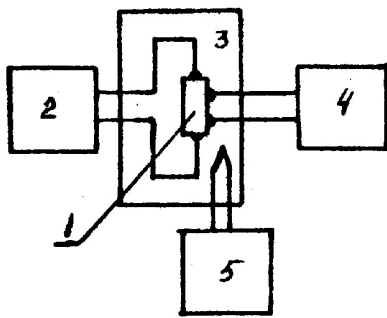


Рис. 5.5.

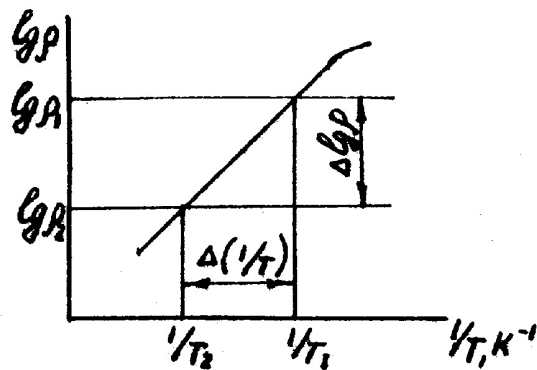


Рис. 5.6.

Ширина забороненої зони визначається на ділянці власної електропровідності напівпровідникового матеріалу по температурній залежності його питомого опору (можна застосувати графічний метод визначення  $E_d$  (рис. 5.6)).

1. Побудувати графік залежності  $\rho(T)$  у напівлогарифмічному масштабі від зворотної температури  $\lg \rho = f(1/T)$ , де  $T$  - абсолютна температура.

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

3. Визначити ширину забороненої зони напівпровідника по формулі

$$E_d = [4,6k \lg(\rho_1 / \rho_2)] / \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

де  $k=8,6 \cdot 10^{-5}$  еВ/К - постійна Больцмана;  $\lg(\rho_1 / \rho_2)$  - приріст логарифму питомого опору матеріалу при зміні температури від  $T_1$  до  $T_2$   $\lg(\rho_1 / \rho_2) = \lg \rho_1 - \lg \rho_2$ .

### Визначення $TK\rho$ напівпровідникового матеріалу

Емпіричні значення температурних коефіцієнтів питомого опору слід визначати на ділянці власної електропровідності по формулі  $TK\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ .

Рекомендується застосовувати графічний метод визначення  $TK\rho$  (рис. 5.7).

1. Побудувати графік залежності  $\rho(T)$  у лінійному масштабі (температура,  $^{\circ}\text{C}$ ).

2. При заданій температурі  $T^*$  визначити значення  $\rho^*$ .

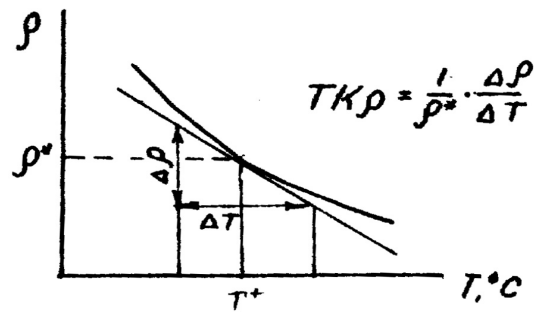


Рис. 5.7.

3. Визначити похідну залежності  $\rho(T)$  при температурі  $T^*$  по нахилу дотичної, проведеної до функції  $\rho(T)$  при температурі  $T^*$ :  $\frac{d\rho}{dT} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$

4. Порівняти отримані значення  $TK\rho$  з теоретичними, знайденими по формулі  $TK\rho = -E_d/2kT^2$

### **Завдання для самостійної підготовки**

1. Виявити природу фоторезистивного ефекту у напівпровідниках, визначити вплив домішок на спектральну характеристику напівпровідникових фоторезисторів.

2. Виявити природу та область застосування тензорезистивного ефекту у напівпровідника.

3. Виявити природу та область застосування магніторезистивного ефекту у напівпровідниках.

4. Виявити суть ефекту Холу та визначити області його технічного застосування.

5. Встановити відмінність між основними та неосновними носіями заряду, ознайомитись з принципом роботи напівпровідникових приладів на неосновних носіях заряду.

6. Наведіть приклади використання напівпровідникових матеріалів з врахуванням вашої спеціальності.

### **Контрольні питання запитання**

1. Чим відрізняються напівпровідникові матеріали від провідникових та електроізоляційних.

2. По яких признаках проводиться класифікація напівпровідникових матеріалів?

3. Природа електропровідності напівпровідника.

4. Які зовнішні фактори впливають на електропровідність напівпровідника?

5. Які внутрішні фактори впливають на електропровідність напівпровідника?

6. Чи визначає питомий опір природу напівпровідникового матеріалу?

7. Коли електропровідність напівпровідника є власною? Коли домішковою?

8. Які фізичні явища у напівпровідниках є найбільш важливими для технічного застосування?

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

#### *Мета роботи*

Дослідити вплив температури на електропровідність провідникових матеріалів з високою провідністю та високого опору; визначити питому термоЕРС.

#### *Завдання*

1. Вивчити інструкцію по експлуатації вимірювальних приладів.
2. Зняти залежність опору провідникових матеріалів від температури.
3. Побудувати графік цієї залежності.
4. Визначити температурний коефіцієнт опору ТК<sub>R</sub> для матеріалів, що досліджуються.
5. Зняти залежність термоЕРС термопар від температури.
6. Побудувати графік залежності термоЕРС від температури.
7. Визначити питому термоЕРС для термопар.

#### *Стислі теоретичні відомості*

До провідників відносяться речовини, основною електричною властивістю яких є електропровідність. В залежності від типу вільних носіїв у речовині розрізняють провідники з із 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 та іонізований газ.

Провідниковий матеріал - електротехнічний матеріал, що має властивості провідника та призначений для виготовлення струмоведучих деталей. До основних характеристик провідникових матеріалів відносяться: питома провідність  $\gamma$  або зворотна її величина - питомий опір  $\rho$ ; температурний коефіцієнт питомого опору; питома теплопровідність; контактна різниця потенціалів та термоЕРС; межа міцності при розтягненні та відносне видовження при розриві. У нормальному стані провідникові матеріали характеризуються питомим електричним опором, який знаходиться у діапазоні  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  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.

#### *Електропровідність провідників*

З точки зору зонної теорії до металів відносять речовини, для яких характерна відсутність забороненої зони, а валентна та вільна зони можуть навіть перекриватися, внаслідок чого всі валентні електрони металів вільні.

Концентрація вільних електронів у всіх металів відрізняється не більш ніж на 10%. Але розкид значень  $\rho$  складає декілька порядків. Причину цього слід шукати у природі рухливості електронів в матеріалі, що визначається характером розсіювання носіїв заряду. Згідно з електронною теорією металів рухливість електронів зв'язана з параметрами матеріалу рівнянням

$$U = q\lambda/2mU_T$$

де  $q$ ,  $m$  - відповідно заряд та маса електрона;  $\lambda$  - довжина вільного пробігу електрона у матеріалі;  $U_T$  - теплова швидкість електронів.

Оскільки у провідниках електронний газ вироджений, теплова швидкість руху електронів приблизно однакова для різних матеріалів та практично не залежить від температури у області робочих температур. Отже значення  $U$ , в основному, залежить від довжини вільного пробігу електрона у даному провіднику, який, в свою чергу, залежить від будови провідника та його структури.

Чисті метали з досконалою кристалічною решіткою характеризуються найменшим значенням  $\rho$ . Домішки, спотворюючи кристалічну решітку, призводять до збільшення значення  $\rho$ .

#### *Вплив температури на електропровідність провідника*

Концентрація електронів в металевих провідниках при збільшенні температури залишається незмінною, тому температурна залежність провідності провідників повинна визначатися характером зміни рухливості носіїв заряду від температури із-за температурної залежності довжини вільного пробігу.

Для чистих металів (без домішок) рухливість електронів визначається фононним розсіюванням (розсіюванням електронів на теплових коливаннях вузлів кристалічної решітки). Концентрація фотонів  $n_\Phi$  при температурах нижче температури Дебая  $\theta$  пропорційна  $T^3$ , а при  $T > \theta$  пропорційна  $T$ . Довжина вільного пробігу при фотонному розсіюванні обернено пропорційна  $n_\Phi$ .

Враховуючи сказане, на залежності  $\rho(T)$  для чистих металів можна виділити дві ділянки (рис. 6.1, крива 1). На першій ділянці (до температури Дебая)  $\rho \sim T^n$  на другому  $\rho \sim T$ . Температурний коефіцієнт питомого опору металів  $\text{TK}_\rho$  позитивний і для другої ділянки температурної залежності, де  $\rho = \text{BT}$ , має постійне значення:  $1/T = 1/273 = 0,00367 \text{ K}^{-1}$ . Для деяких провідників при температурах, близьких до абсолютного нуля, може наступити стан надпровідності. Для таких матеріалів на температурній залежності (див. рис. 6.1, крива 1) характерний стрибок питомого опору при температурі надпровідності  $T_{\text{св}}$ .

Якщо метал має дефектну кристалічну решітку, то окрім фотонного розсіювання у матеріалі повинно спостерігатися розсіювання електронів на іонізованих домішках, в результаті чого їхня рухливість знижується.

Довжина вільного пробігу електрона при розсіюванні на іонах залежить від теплової швидкості носіїв заряду  $\lambda \sim U_T^{-4}$ , але оскільки в металевих провідниках теплова швидкість електронів не залежить від температури навколишнього

середовища, рухливість, зумовлена іонним розсіюванням, також не змінюється з температурою.

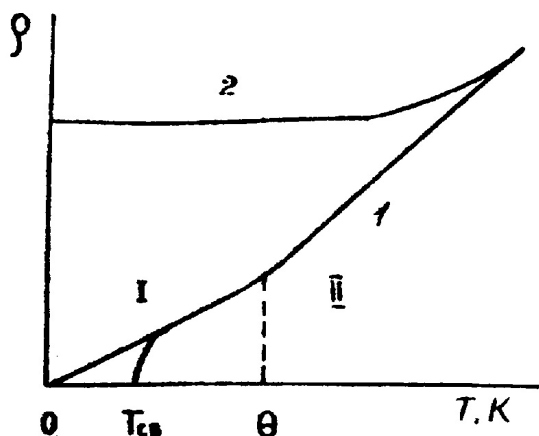


Рис. 6.1.

Вплив іонного розсіювання на електропровідність металів відбивається при відносно низьких температурах, коли фотонним розсіюванням можна знехтувати. Значення  $\rho$  у цьому випадку однозначно визначається концентрацією дефектів у кристалічній решітці, а  $T_{кр}$  близький до нуля. При досить високих температурах електропровідність дефектного металу визначається фотонним розсіюванням (рис. 6.1, крива 2).

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  $\rho$  та низькі значення  $T_{кр}$ .

### *ТермоЕРС*

При контакті двох різних металів в зв'язку з переходами електронів з одного металу в інший між ними виникає різниця потенціалів. Контактна різниця потенціалів зумовлена різними значеннями роботи виходу електронів металів. Її значення для різних пар знаходиться у діапазоні від десятих часток вольт до декількох вольт.

В замкнутому електричному колі, що складається з послідовно з'єднаних різних провідникових матеріалів, сума контактних різниць потенціалів буде рівна нулю, якщо температура всіх спаїв однакова. Якщо спаї провідників знаходяться при різних температурах, то виникає термоЕРС. Для кола, що складається з двох провідників А та В.

$$U = \frac{k}{q}(T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B} = \alpha(T_1 - T_2) \quad (6.1)$$

де  $U$  - термоЕРС;  $T_1, T_2$  - температури спаїв;  $n_A, n_B$  - концентрації електронів в контактуючих провідникових матеріалах;  $\alpha$  - питома термоЕРС.

### *Опис експериментальної установки*

Лабораторна робота проводиться на установці, блок-схема якої показана на рис.6.2, де 1 - резистори з провідникових матеріалів; 2 - вимірник опору; 3 -

перемикач резисторів; 4 - термостат; 5 - ртутний термометр. 6 – досліджувані термопари; 7- перемикач термопар; 8 - мілівольтметр.

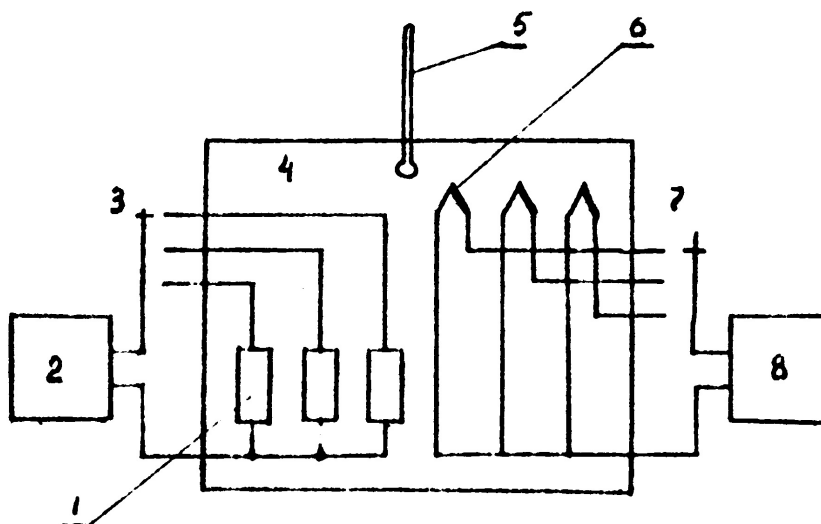


Рис. 6.2

### **Методичні вказівки**

При виборі вимірювача опорів необхідно звернути увагу на те, що у досліджуваних матеріалів температурний коефіцієнт питомого опору може знаходитись у діапазоні від  $10^{-6}$  до  $10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Отже, вимірник повинен гарантовано реєструвати зміну опору матеріалів в п'ятому-шостому знакові.

Температуру необхідно вимірювати прямо на зразках з тим, щоб виключити неоднорідність теплового поля у термостаті. Для досліджень рекомендується рідинний термостат.

Температурний коефіцієнт опору рекомендується визначати графічно. Для провідникових матеріалів відповідає лінійна залежність  $R=R_0 [1+\alpha_R(T-T_0)]$   $R_0$ ,  $R$  - опори матеріалу при температурі відповідно  $T_0$  та  $T$ ;  $\alpha_R$  - температурний коефіцієнт опору  $\text{TKR}$ ;  $\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ ; між  $\text{TKR}$  та  $\text{TK}_p$  існує зв'язок  $\text{TKR} = \text{TK}_p - \text{TK}_l$ ;  $\text{TK}_l$  - температурний коефіцієнт лінійного розширення.

При виборі вимірника термоЕРС необхідно врахувати, що питома термоЕРС більшості термопар, що використовуються у техніці знаходиться у діапазоні 30... 80 мкВ/град.

Питому термоЕРС  $\alpha$  термопар рекомендується визначати графічним методом. Оскільки термоЕРС термопари залежить від температури по лінійному закону (6.1),

$$\alpha = \Delta U / \Delta T,$$

де  $\Delta U$  - приріст термоЕРС термопари при зміні температури гарячого спаю на величину  $\Delta T$ .

### **Порядок виконання роботи**



*Дослідження впливу температури на опір провідника*

1. За допомогою перемикача підключити до вимірника опору обраний об'єкт дослідження.
2. Зміряти значення опору об'єктів дослідження при кімнатній температурі.
3. Включити термостат.
4. По мірі нагріву зразків проводити вимір значень їхнього опору через кожні 5 °С.
5. Результати вимірів занести у табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Температура, °С	Опір зразка, Ом			
	Мідь	Манганін	Ніхром	Константант

6. Побудувати графік зміни опору зразків від температури.
7. Визначити ТКР зразків.
8. Зробити висновки про природу матеріалу зразків.

*Дослідження впливу температури на термоЕРС термопар*

1. За допомогою перемикача підключити до мілівольметра обрану термопару.
2. Включити термостат.
3. По мірі нагріву зразків вимірювати значення термоЕРС через кожні 5 °С.
4. Результати вимірів занести в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Температура, °С	ТермоЕРС, мВ	
	Мідь-константан	Хромель-алюмель

5. Побудувати графік зміни термоЕРС термопар від температури.
6. Визначити питому термоЕРС термопар.

# ПРИБЛИЗНИЙ ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ

## ЧАСТИНА І

1. Поняття електропривода і задачі курсу.
2. Механічні характеристики робочих машин.
3. Механічні характеристики двигунів і режими їх роботи.
4. Сумісна робота двигуна і робочої машини. Статична сталість.
5. Рівняння руху електропривода .
6. Зведення статичних моментів, махових мас від одної осі обертання до другої .
7. Зведення сил і махових мас від поступального руху до обертального.
8. Механічні властивості двигунів з незалежним збудженням в рушійному режимі.
9. Штучні характеристики :
  - а) при зміні опору якірного кола ;
  - б) при зміні напруги живлення ;
  - в) при зміні магнітного потоку .
10. Вираз характеристик двигуна у відносних одиницях.
11. Розрахунок і побудова характеристик по паспортним даним.
12. Розрахунок пускового реостата.
13. Гальмівні режими роботи двигуна:
  - а) з віддачею енергії в мережу - рекуперативне гальмування ;
  - б) режим противмикання ;
  - в) режим електродинамічного гальмування .
14. Механічні характеристики і регулювання швидкості двигуна при шунтуванні якоря .
15. Механічні властивості двигунів з послідовним збудженням в рушійному режимі.
16. Розрахунок і побудова швидкісних характеристик.
17. Побудова механічних характеристик методом перехідної.
18. Розрахунок пускового реостату.
19. Гальмівні режими роботи двигуна :
  - а) режим противмикання ;
  - б) режим електродинамічного гальмування .
20. Спеціальні схеми вмикання двигуна :
  - а) при шунтуванні якоря ;
  - б) при шунтуванні обмотки збудження .
21. Механічні властивості двигунів змішаного збудження в рушійному режимі.
22. Розрахунок швидкісної і механічної характеристик.
23. Область застосування двигунів постійного струму.
24. Система Г-Д.
25. Система Г-Д із зворотними зв'язками:
  - а) із зворотнім зв'язком за швидкістю;
  - б) із зворотнім зв'язком за струмом;
  - в) з відсічкою за струмом.

26. Гальмівні режими системи Г-Д.
  27. Механічні властивості асинхронних двигунів:
    - а) швидкісні характеристики;
    - б) механічні характеристики.
  28. Штучні характеристики при зміні:
    - а) активного опору роторного кола;
    - б) напруги мережі живлення;
    - в) частоти мережі живлення;
    - г) активно-індуктивного опору роторного кола;
    - д) активного опору в колі статора.
  29. Розрахунок пускового реостата асинхронного двигуна.
  30. Несиметричні режими роботи асинхронного двигуна.
  31. Гальмівні режими роботи АД:
    - а) генераторний режим з віддачею енергії в мережу ;
    - б) режим противмикання;
    - в) режим електродинамічного гальмування.
  32. Механічні властивості синхронних двигунів :
    - а) вираз електромагнітного моменту ;
    - б) кутова характеристика машини ;
    - в) запуск синхронного двигуна ;
    - г) енергетичні показники синхронного двигуна.
  33. Характеристики двошвидкісних асинхронних двигунів.
  34. Багатодвигунний електропривод. Загальні положення .
  35. Дводвигунний привод постійного струму з двигунами незалежного збудження з жорстким зв'язком валів і паралельним вмиканням якорів.
  36. Дводвигунний привод постійного струму з двигунами незалежного збудження з жорстким зв'язком валів і послідовним вмиканням якорів.
  37. Дводвигунний привод з жорстким зв'язком валів асинхронних двигунів:
    - а) з короткозамкненим ротором;
    - б) з фазним ротором.
- Зрівнювання навантаження дводвигунних електроприводів.  
Електричний вал з робочими зрівнювальними машинами.
38. Електричний вал з допоміжними зрівнювальними машинами :
    - а) асинхронними;
    - б) синхронними.

## ЧАСТИНА II

1. Особливості роботи вентиляльних перетворювачів в системах електропривода.
2. Класифікація вентиляльного приводу постійного струму.
3. Реверсивний вентиляльний привод з активним моментом на валу.
4. Вентильний привод з реверсом обмотки збудження.
5. Вентильний привод з реверсом обмотки якоря.
6. Вентильний привод постійного струму з двома комплектами вентилів.
7. Особливості статичних характеристик в системі ТП-Д.

8. Імпульсне регулювання напруги.
9. Імпульсне регулювання опору.
10. Класифікація вентильного приводу змінного струму.
11. Привод з перетворювачами частоти з безпосереднім зв'язком.
12. Привод з перетворювачами частоти з проміжною ланкою постійного струму.
13. Каскадні схеми вмикання асинхронного двигуна. Загальні положення.
14. Машинно-вентильний каскад сталої потужності.
15. Машинно-вентильний каскад сталого моменту.
16. Асинхронно-вентильний каскад .
17. Імпульсне регулювання опору в роторному колі АД.
18. Вентильний двигун. Запуск вентильного двигуна.
19. Перехідні процеси в електроприводі. Загальні положення.
20. Рівняння руху електропривода. Аналіз рівняння руху.
21. Методи рішення рівняння руху.
22. Аналітичний метод рішення рівняння руху.
23. Графо - аналітичний метод рішення рівняння руху.
24. Перехідні процеси двигуна з незалежним збудженням :
  - а) по керуючій дії;
  - б) по збуджуючій дії.
25. Розрахунок і побудова кривих перехідного процесу двигуна з незалежним збудженням без урахування електромагнітної сталої часу  $T_e$ :
  - а) при спуску двигуна в одну ступінь ;
  - б) при реостатному пуску двигуна ;
  - в) при електродинамічному гальмуванні з активним моментом опору ;
  - г) при електродинамічному гальмуванні з реактивним моментом опору;
  - д) при режимі противмикання і активному моменті опору ;
  - е) при режимі противмикання і реактивному моменті опору ;
26. Перехідні процеси при прийманні і скиданні навантаження.
27. Перехідні процеси з ударним навантаженням.
28. Перехідні процеси в системах Г-Д з ТЗ , ТП-Д , АВК , МВК.  
Загальна структура.
29. Особливості перехідних процесів в системі ТП-Д (при лінійній зміні напруги) :
  - а) по керуючій дії;
  - б) по збуджуючій дії;
30. Особливості перехідних процесів в системі Г-Д.
31. Форсування перехідних процесів в системі Г-Д (схеми форсування).
32. Форсування перехідних процесів в системі Г-Д з тиристорним збудженням.
33. Перехідні процеси двигуна постійного струму з урахуванням електромагнітної сталої часу силового кола  $T_e$  :
  - а) аперіодичні ;
  - б) коливальні.
34. Втрати енергії при перехідних процесах двигуна з незалежним збудженням:

- а) при пуску;
  - б) в режимі електродинамічного гальмування ;
  - в) в режимі противмикання;
  - г) при лінійній зміні напруги.
35. Способи зменшення втрат енергії при перехідних процесах.
  36. Вибір потужності двигунів. Загальні положення.
  37. Режими роботи двигунів у відношенні нагрівання.
  38. Нагрівання і охолодження двигунів при тривалому режимі роботи.
  39. Побудова навантажувальних діаграм.
  40. Вибір потужності двигунів при тривалому режимі роботи:
    - а) при незмінному навантаженні;
    - б) метод середніх втрат;
    - в) метод еквівалентних величин.
  41. Нагрівання і охолодження двигунів при короткочасному режимі навантаження .
  42. Вибір потужності двигунів при короткочасному навантаженні.
  43. Нагрівання і охолодження двигунів при повторно-короткочасному навантаженні.
  44. Вибір потужності двигунів при повторно-короткочасному навантаженні.
  45. Визначення допустимого числа вмикань за годину асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
  46. Робота електропривода з маховиком і ударним навантаженням.
  47. Особливості вибору потужності двигунів для регульованного електропривода.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Корицкий Ю. В. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. Т. 1 / Ю. В. Корицкий; под ред. Ю. В. Корицкого и др. – [3-е изд., перераб.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
2. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев – изд. 7-е, перераб. и доп. - Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1985. – 304 с.
3. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.
4. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы : учебник для студентов вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 352 с.
5. Колесов С. Н. Электротехнические и конструкционные материалы : учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. транспортных и других вузов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – К. : Транспорт Украины, 2003. – 376 с.
6. Пасынков В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.
7. Панченко В. І. Матеріали методичного забезпечення лабораторних робіт з дисципліни “Електротехнічні матеріали” / В. І. Панченко, А. С. Головченко, А. М. Гребенюк. – Дніпр. : Дніпр. НГУ, 2012. – 40 с.
8. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство : [підруч.] / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с.
9. Колесов С. Н. Электроматериаловедение (Электротехнические материалы) : учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. вузов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Днепропетровск. : Лира ЛТД, 2007. – 476 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП	3
ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	13
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ.....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ.....	30
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	37
ПРИБЛИЗНИЙ ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДЛЯ САМОПІДГОТОВКИ.....	42
ЛІТЕРАТУРА.....	46

Навчальне видання

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Методичні рекомендації

Укладачі: **Плахтир** Олег Олегович  
**Циганов** Олександр Миколайович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. акр. 13,14.

Тираж 50 прим. Зам № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р