

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторного практикуму з дисципліни
**«МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ,
ВИПРОБУВАНЬ ТА КОНТРОЛЮ»**

для студентів спеціальності
152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»,
денної й заочної форм навчання

2022

Методичні вказівки до лабораторного практикуму з дисципліни «Методи та засоби вимірювань, випробувань та контролю» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», денної й заочної форм навчання / Укл.: Сніжної Г.В. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 58 с.

Укладачі: Сніжної Г. В., доц., канд. фіз.-матем. наук,
д-р. техн. наук

Рецензент: Погосов В. В. , проф., д-р фіз.-матем. наук

Відповідальний за випуск: Коротун А.В., доц.,
канд. фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
мікро- та наноелектроніки
Протокол №1
від «17» серпня 2021 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол №1
від «19» серпня 2021 р.

ЗМІСТ

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 «ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»	5
1.1 Основні теоретичні відомості.....	5
1.1.1 Клас точності.....	5
1.1.2 Засоби вимірювання сили струму.....	6
1.1.3 Вимірювальні шунти.....	6
1.2 Описання експериментальної установки.....	7
1.3 Порядок виконання роботи.....	8
1.4 Контрольні питання.....	9
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ МОСТОВИМ МЕТОДОМ»	10
2.1 Основні теоретичні відомості.....	10
2.2 Описання експериментальної установки.....	11
2.3 Порядок виконання роботи.....	13
2.4 Контрольні питання.....	14
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 «ВИМІРЮВАННЯ ЄМНОСТІ РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ З ІНДИКАЦІЄЮ РЕЗОНАНСУ ЗА НУЛЬОВИМИ БИТТЯМИ»	15
3.1 Основні теоретичні відомості.....	15
3.1.1 Резонансний метод вимірювання параметрів елементів.....	15
3.1.2 Розрахунок ємності плоского конденсатора.....	17
3.1.3 Розрахунок ємності циліндричного конденсатора.....	18
3.2 Описання експериментальної установки.....	19
3.2.1 Опис та призначення Е7-5А.....	19
3.2.2 Принцип дії та електрична схема приладу.....	20
3.3 Порядок виконання роботи.....	21
3.4 Контрольні питання.....	21
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 «ВИМІРЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ»	22
4.1 Основні теоретичні відомості.....	22
4.2 Порядок виконання роботи.....	29
4.2.1 Вимірювання індуктивності котушки і кута зсуву фаз між струмом і напругою в RL-колі.....	29
4.2.2 Визначення ємності конденсатора й кута зсуву фаз між струмом і напругою в RC-колі.....	30
4.2.3 Перевірка закону Ома.....	32
4.3 Контрольні питання.....	33

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 «ДОСЛІДЖЕННЯ НАМАГНИЧУВАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ФЕРОМАГНЕТИКІВ»	34
5.1 Основні теоретичні відомості.....	34
5.2 Описання експериментальної установки	38
5.3 Порядок виконання роботи.....	39
5.4 Контрольні питання.....	40
6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 «ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАННЯ ЕРС ХОЛЛА»	41
6.1 Основні теоретичні відомості.....	41
6.1.1 Ефект Холла.....	41
6.2 Методи вимірювання ЕРС Холла.....	43
6.2.1 Класичний метод	43
6.2.2 Вимірювання ефекту Холла методом Ван-дер-Пау	45
6.2.3 Чотиризондовий холлівський метод	46
6.2.4 Порядок виконання роботи.....	48
6.3 Контрольні питання.....	49
7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 ВИЗНАЧЕННЯ П'ЄЗОМОДУЛЯ ПОЛЯРИЗОВАНОЇ КЕРАМІКИ	50
7.1 Основні теоретичні відомості.....	50
7.2 Порядок виконання роботи.....	56
7.3 Контрольні питання.....	56
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	57

1 ЛАБОАТОРНА РОБОТА № 1 «ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

Мета роботи:

- отримати уявлення про клас точності вимірювального приладу;
- дізнатись як розширити діапазон вимірювань амперметра та навчитись розраховувати параметри шунта;
- отримати практичні навички вимірювання постійного електричного струму за допомогою амперметрів різного типу.

Прилади та обладнання: джерело живлення постійного струму Б5-44, вольтметр універсальний В7-16, мікроамперметр, цифровий мультиметр.

1.1 Основні теоретичні відомості

Наведені відомості у цій та наступних темах, складені із залученням текстів, рисунків та завдань, наведених у працях зі переліку рекомендованої літератури на стор. 57.

1.1.1 Клас точності

Якість вимірювального пристрою характеризують його точністю, тобто ступенем відповідності між показанням приладу та істинним значенням вимірюваної величини.

Оскільки абсолютно точно вимірювання величин технічно неможливе, за справжнє значення вимірюваної величини приймають таке значення, яке відраховується за показанням зразкового приладу.

Різниця між показаннями робочого (A_x) та зразкового (A) приладів, виражена в одиницях вимірюваної величини, називається похибкою показань робочого приладу (ΔA):

$$\Delta A = A_x - A. \quad (1.1)$$

Точність приладу оцінюють відношенням найбільшої похибки його показань до номінального значення величини, що вимірюється приладом. Це відношення виражають у відсотках, називають основною приведеною похибкою та позначають буквою γ (гамма):

$$\gamma = \frac{A_x - A}{A_N} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де A_x – показання робочого приладу за нормальних умов його експлуатації;

A – показання зразкового приладу;

$(A_x - A)$ – найбільша основна похибка показань;

A_N – нормуюче значення (кінцеве значення шкали приладу, A_k).

За ступенем точності електровимірювальні прилади поділяються на 9 класів: 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5 та 4.0.

Зауважимо, що прилад має клас точності 1,5, це означає, що його максимальна приведена похибка дорівнює 1.5%.

Клас точності дозволяє обчислити значення максимальної абсолютної похибки:

$$\Delta_{\max} = \frac{K \cdot A_k}{100\%}, \quad (1.3)$$

де K – клас точності.

1.1.2 Засоби вимірювання сили струму

Для прямого вимірювання сили струму використовують спеціальний прилад – амперметр (для приладів, призначених для вимірювання малих струмів, також використовуються назви міліамперметр, мікроамперметр, гальванометр). Його включають безпосередньо у розрив ланцюга там, де потрібно виміряти силу струму. Цей засіб вимірювання відноситься до ручних (неавтоматичних). При вимірюванні струму необхідно, щоб виконувались наступні умови:

- максимальна межа вимірювання амперметра (вольтметра) не менше максимального струму (напруги) у ланцюзі;
- номінальна напруга амперметра не менша за номінальну напругу мережі;
- опір амперметра R_A набагато менше, а опір вольтметра набагато більший за опір вимірюваного ланцюга R_{BL} ;
- дотримання полярності вмикання приладів.

1.1.3 Вимірювальні шунти

Шунтом називається опір, який під'єднується паралельно затискачам амперметра (паралельно внутрішньому опору приладу), щоб збільшити діапазон вимірювань. Вимірюваний струм I розділяється між вимірювальним шунтом ($R_{ш}, I_{ш}$) та амперметром (R_A, I_A) обернено пропорційно їх опорам.

$$\left. \begin{array}{l} I_{III} = \frac{U}{R_{III}} \\ I_A = \frac{U}{R_A} \end{array} \right\} I = \frac{U}{R_{III} + R_A} \Rightarrow R_{III} = \frac{U}{I - I_A}. \quad (1.4)$$

Для збільшення діапазону вимірювань у n разів шунт повинен мати опір

$$R_{III} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (1.5)$$

1.2 Описання експериментальної установки

Джерело живлення постійного струму Б5-44, вольтметр універсальний В7-16, мікроамперметр М907 (межа вимірювань $500 \mu\text{A} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ A}$), цифровий мультиметр. Вимірювальні пристрої з'єднані послідовно, та підключені до лабораторного джерела живлення як показано на рисунку 1. До вольтметра В7-16 (A_1) та мікроамперметру М907 (A_3) під'єднані шунти $R_{ш1}$ та $R_{ш2}$ відповідно.

Шунт $R_{ш1}$ в ланцюг навантаження підключено послідовно, до нього паралельно під'єднаний вольтметр В7-16, що вимірює падіння напруги на $R_{ш1}$. Таким чином, вольтметр В7-16 виступає в якості амперметра A_1 і за законом Ома визначається струм, що протікає в ланцюзі (1.4).

$$I_{A_1} = \frac{U_{A_1}}{R_{ш1}} \quad (1.6)$$

Шунт $R_{ш2}$, що під'єднаний паралельно до мікроамперметру М907 (A_3), збільшує його діапазон вимірювань.

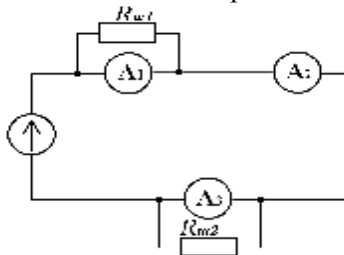


Рисунок 1.1 – Схема з'єднання вимірювальних пристроїв

Приклад розрахунків

Маємо мікроамперметр з межею вимірювання $500 \mu A$ (I_A), ціна поділки $C = 5 \mu A$. Необхідно розрахувати опір шунта, щоб за допомогою мікроамперметра виміряти струм величиною до $25 mA$ (I).

Відомо, що стрілка приладу при напрузі $U = 34 mV$ відхилиться до максимального значення вимірювальної шкали.

Розрахуємо (або виміряємо) внутрішній опір R_A мікроамперметра:

$$R_A = \frac{U}{I_A} = \frac{0.034}{0.0005} = 68 \text{ Ом.}$$

Визначимо струм, що буде протікати через шунт.

$$I_{ш} = I - I_A = 0.025 - 0.0005 = 0.0245 \text{ A.}$$

Звідси видно, що струм між внутрішнім опором та шунтом розділиться в пропорції 1:49, а межа вимірювань та ціна поділки збільшаться в $n = 50$ разів.

Розрахуємо опір шунта $R_{ш}$ та ціну поділки C :

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1} = \frac{68}{49} = 1.38 \text{ Ом.}$$

$$C = 0.000005 \cdot 50 = 0.00025 \text{ A} = 250 \mu A.$$

Припустимо, що після підключення шунта клас точності амперметра не змінився, та розрахуємо його максимальну абсолютну похибку за формулою 1.1.

$$\Delta_{\max} = \frac{K \cdot A_k}{100\%} = \frac{1 \cdot 0.025}{100} = 0.00025 \text{ A} = 250 \mu A.$$

1.3 Порядок виконання роботи

а. Розрахувати параметри шунта $R_{ш2}$ відповідно до величини вимірюваного струму ($5 mA$), користуючись формулами (1.4, 1.5).

б. Підключити шунт до мікроамперметра М907.

в. Розрахувати ціну поділки мікроамперметра М907 з урахуванням підключеного шунта.

г. Перевірити налаштування вимірювальних приладів:

– закоротити плюсовий провід на землю/мінус;

– звірити показання приладів (всі прилади повинні показувати «0»).

Якщо є відхилення, то прилад необхідно налаштувати відповідним чином¹.

д. Увімкнути джерело живлення, виставити значення струму 5 мА.

е. Записати показання кожного з приладів.

ж. Розрахувати значення максимальної абсолютної похибки кожного з приладів за формулою (1.3).

з. Результати вимірювань та розрахунків занести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати вимірювань та розрахунки

Прилад	Клас точності	Показання: I, A	Похибка Δ_{\max}
A_1			
A_2			
A_3			

Звіт повинен містити:

- стислі теоретичні положення щодо класу точності вимірювальних приладів, засобів вимірювання струму;
- схему проведення вимірювань;
- таблицю експериментальних даних;
- результати розрахунку шунта та похибки;
- висновки з проведеної роботи.

1.4 Контрольні питання

- а. Чим характеризується якість вимірювального приладу?
- б. Як оцінюють точність вимірювального приладу?
- в. Що означає клас точності?
- г. Чим відрізняється амперметр від гальванометра?
- д. Яку функцію виконує шунт?
- е. Назвіть правила, яких необхідно дотримуватись при користуванні амперметром.

¹Є ймовірність, що доведеться калібрувати вольтметр В7-16. Налаштувати його можна за допомогою ручки підстроювання межі вимірювань (шкала Ом/В) та двох ручок, що знаходяться праворуч від неї (в зоні налаштування роду робіт).

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 «ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ МОСТОВИМ МЕТОДОМ»

Мета роботи:

- ознайомитись з одним з основних методів вимірювання електричного опору по постійному струму;
- засвоїти принцип вимірювання опору за допомогою мостової схеми;
- отримати практичні навички організації та проведення процедури вимірювання електричного опору.

Прилади та обладнання: реостат ($R_1' + R_2' = 10$ кОм), змінний опір ($R_3' + R_4' = 4.7$ кОм), вольтметр-амперметр М24 класу точності 1.5, джерело живлення ВС-24.

2.1 Основні теоретичні відомості

Для вимірювання електричного опору застосовуються такі методи.

– Визначення опору за результатами безпосереднього вимірювання струму і падіння напруги на вимірюваному опорі (метод амперметра-вольтметра). Величину опору знаходять із закону Ома для ділянки кола як частку від ділення напруги (покази вольтметра) на струм (покази амперметра).

– Визначення опору за результатами вимірювання струму в ньому при фіксованій напрузі на ділянці кола, що містить вимірюваний опір (метод омметра). Шкала вимірювача струму (зазвичай мікроамперметра) градується попередньо в омах, а величина вимірюваного опору відраховується за шкалою вимірювального приладу безпосередньо.

– Метод прямого або непрямого порівняння вимірюваного опору із зразковим. Різновидом його є метод вимірювання опору одинарним мостом постійного струму. Висока чутливість і точність вимірювань, що досягає 0,01%, обумовили широке застосування мостового методу.

Мостова схема – схема з'єднання елементів електричного ланцюга (опорів, випрямляючих діодів і т.д.), що характеризується наявністю мостової гілки між двома точками схеми, не з'єднаними

безпосередньо з джерелом електричної енергії. В основу мостової схеми покладено схему моста Уїтстона (рис. 2.1).

Основною частиною електричного кола одинарного моста постійного струму (моста Уїтстона) є так званий чотириполюсник – ділянка кола, яка має чотири вузли ("полюса") – А, В, С, D. Такий пристрій широко поширений у вимірювальній техніці (вимір опорів, ємностей, індуктивностей та ін.) і засобах автоматики.

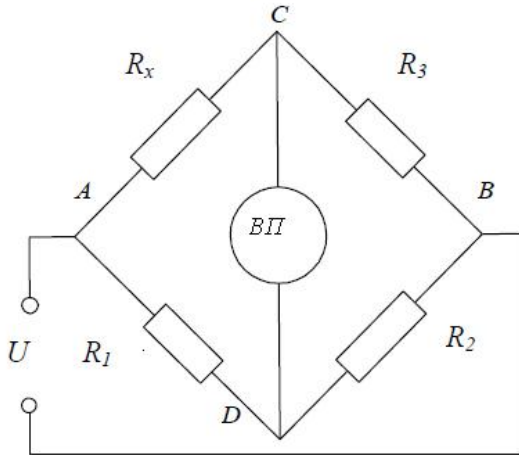


Рисунок 2.1 – Міст Уїтстона

Один з резисторів в мосту Уїтстона є вимірюваним – R_x . Такий чотириполюсник має наступну властивість. Якщо до вузлів А і В (до діагоналі АВ мосту) підвести напругу U від будь-якого джерела постійного струму, а між вузлами С і D (в діагональ моста CD) включити високочутливий вимірювальний прилад ВП (гальванометр/вольтметр/мікроамперметр), то для будь-якого невідомого опору R_x можна підібрати такі величини опорів резисторів R_1 , R_2 , R_3 , при яких напруга (або струм) в приладі ВП матиме певне значення, в тому числі і нуль.

2.2 Описання експериментальної установки

Реостат ($R_1' + R_2' = 10$ кОм), змінний опір ($R_3' + R_4' = 4.7$ кОм), вольтметр-амперметр М24 зібрано за мостовою схемою (рис. 2.2), та підключено до джерела живлення ВС-24.

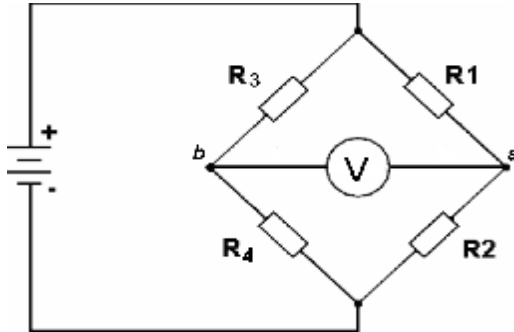


Рисунок 2.2 – Мостова схема (схема мосту Уїгстона)

Міст збалансовано, якщо потенціали точок a та b – рівні.

$\varphi_a = \varphi_b$, тобто різниця потенціалів між ними дорівнює нулю ($U = 0$), при цьому вольтметр показує значення 0.

В окремому випадку це можливо, якщо $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. У загальному випадку достатньо, щоб

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (2.1)$$

Вимірювання відбувається так: замість плеча R_2' (опори R_1, R_2, R_3, R_4 чи R_1', R_2', R_3', R_4' називаються плечима мосту) підключаємо невідомий опір r_x (рисунок 2.2).

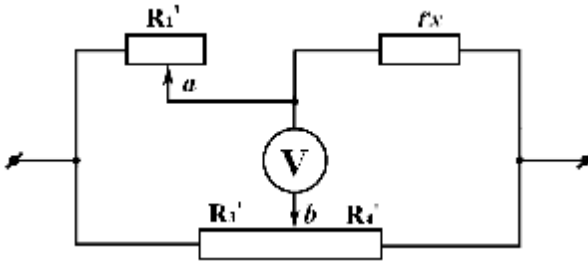


Рисунок 2.3 – Принципова схема підключення вимірюваного опору

Після підключення невідомого опору необхідно встановити повзунки таким чином, щоб урівняти $\varphi_a = \varphi_b$, при цьому стрілка вольтметра повинна переміститися на середину шкали та вказувати на 0. Потім із співвідношення (2.2) розраховується r_x .

$$\frac{R_1'}{r_x} = \frac{R_3'}{R_4'} \rightarrow r_x = \frac{R_1' \cdot R_4'}{R_3'} \quad (2.2)$$

Приклад розрахунків

Міст урівноважено при $R_1 = 1.5$ кОм, $R_3 = 4$ кОм, $R_4 = 6$ кОм .

$$\text{Тоді } r_x = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_3} = \frac{1.5 \cdot 6}{4} = 2.25 \text{ кОм}$$

Відома дійсна величина вимірюваного опору $r_x = 2$ кОм, отже можливо розрахувати абсолютну похибку:

$$\Delta r = |r - r_x| = |2000 - 2500| = 250 \text{ Ом.}$$

Звідси знайдемо відносну похибку:

$$d = \frac{\Delta r}{r} \cdot 100\% = \frac{250 \cdot 100}{2000} = 12.5\%. \quad (2.3)$$

2.3 Порядок виконання роботи

- а. Виставити на блоці живлення ВС-24 напругу 10 В
- б. Установити значення $R_3 = 4$ кОм та значення $R_4 = 6$ кОм.
- в. Підключити невідомий опір r_x .
- г. Змінним резистором R_1 домогтися балансу мосту (показання вольтметра повинні дорівнювати нулю).
- д. Результати вимірювання занести в таблицю 2.1.
- е. Обчислити значення r_x із співвідношення (2.2). Результати обчислень занести до таблиці 2.1.
- ж. Обчислити абсолютну похибку вимірювань, користуючись формулою (2.3) та занести її до Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Результати вимірювань

№	R_1 , кОм	r_x , кОм	Абсолютна похибка Δr , Ом
1	0,85		
2	1,15		
3	1,5		
4	1,55		
5	1,75		
6	1,9		
7	2,05		
8	2,15		
9	2,3		
10	2,6		

Звіт повинен містити:

- стислі теоретичні відомості про методи вимірювання електричного опору;
- схему проведення вимірювань;
- таблицю експериментальних даних;
- результати розрахунку похибки вимірювань;
- висновки з проведеної роботи.

2.4 Контрольні питання

а. Яке електричне коло називається одинарним мостом постійного струму (мостом Уїтстона)? Намалюйте схему моста.

б. Що таке врівноважений і неврівноважений міст? Як вимірюється невідомий опір в обох випадках?

в. Що таке реохордний міст? Які переваги у реохордного моста в порівнянні з іншими?

г. Яка роль гальванометра у колі врівноваженого моста і які вимоги до нього?

д. Яка методика вимірювання опору врівноваженим мостом? В чому полягає процедура врівноваження? Що є критерієм рівноваги?

е. Які способи вимірювання електричного опору існують? Які переваги і недоліки вони мають?

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 «ВИМІРЮВАННЯ ЄМНОСТІ РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ З ІНДИКАЦІЄЮ РЕЗОНАНСУ ЗА НУЛЬОВИМИ БИТТЯМИ»

Мета лабораторної роботи:

- ознайомитись з резонансним методом вимірювань ємностей конденсаторів;
- отримати практичні навички у вимірюванні ємності конденсатора;
- навчитись розраховувати ємність плоского конденсатора.

Прилади та обладнання: вимірювач індуктивностей та ємностей височастотний типу Е7-5А, штангенциркуль.

3.1 Основні теоретичні відомості

3.1.1 Резонансний метод вимірювання параметрів елементів

Резонансні методи широко застосовуються для вимірювання малих ємностей та індуктивностей, добротності, власної або резонансної частоти налаштування та інших параметрів радіодеталей та коливальних систем.

Резонансний метод вимірювання оснований на налаштуванні в резонанс коливального контуру, що включає зразковий та вимірюваний елементи (індуктивності або ємності), та визначення його резонансної частоти. Метод застосовують для вимірювання індуктивностей та ємностей на високих частотах, так як в області низьких частот резонансні явища виявляються недостатньо різко, що не дозволяє отримати високу точність виміру. Резонансні схеми зручні при точних вимірах малих значень індуктивностей та взаємної індуктивності, ємностей тощо.

За допомогою резонансних схем здійснюють вимірювання шляхом заміщення, при якому один і той же ефект (наприклад, резонанс на фіксованій частоті) повторюють двічі: перший раз – з елементом, що вимірюється, другий – з мірою тієї ж фізичної природи. За результат вимірювання приймають значення, що дорівнює величині міри при резонансі.

Резонансна схема вимірювання ємностей (рис. 3.1) зазвичай включає генератор високої частоти, з контуром якого LC слабо зв'язується індуктивно (або через ємність) вимірювальний контур, що

складається з опорної котушки індуктивності L_0 і випробуваного конденсатора C_x .

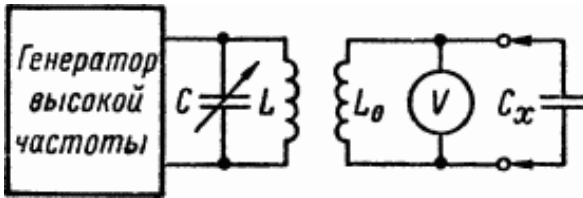


Рисунок 3.1 – Схема вимірювання ємностей резонансним методом

Зміною ємності конденсатора C генератор налаштовують в резонанс з власною частотою f_0 вимірювального контуру за екстремальними показаннями індикатора резонансу, наприклад електронного вольтметра V . При відомій частоті налаштування генератора f_0 вимірювана ємність визначається формулою

$$C_x = \frac{1}{((2\pi f_0)^2 L_0)} \approx \frac{0.0253}{(f_0^2 L_0)} \quad (3.1)$$

При фіксованому значенні L_0 конденсатор можна забезпечити шкалою з відліком у значеннях ємностей C_x .

Межі вимірювань ємностей визначаються значенням індуктивності L і діапазоном частот генератора. Наприклад, при $L_0 = 100$ мкГ та діапазоні генератора 160-3500 кГц прилад буде вимірювати ємності від десятків пікофарад до сотих часток мікрофарад. Для розширення меж вимірювань ємностей при обмеженому частотному діапазоні генератора застосовують кілька змінних котушок L_0 різної індуктивності, а також включають випробувані конденсатори вимірювальний контур послідовно з конденсаторами відомої ємності. Ємності більше 0,01-0,05 мкФ резонансним методом зазвичай не вимірюються, так як на низьких частотах резонансні криві коливальних контурів стають тупими, що ускладнює фіксацію резонансу.

В якості індикаторів резонансу використовуються чутливі високочастотні прилади, що реагують на струм або напругу, що діють у вимірювальному контурі.

Похибка вимірювання ємностей резонансним методом досягає 5–10% через вплив паразитних зв'язків, деякого впливу контуру генератора на параметри вимірювального контуру, труднощі точної

фіксації стану резонансу; вона також залежить від стійкості частоти генератора та похибки її вимірювання.

При поєднанні резонансного методу з методом заміщення усувається залежність результату вимірювання ємностей від точності вимірювання частоти генератора та паразитних зв'язків, завдяки чому похибку вимірювань можна знизити до 1% і менше. Для цього до вимірювального контуру (рис. 3.1) підключають опорний конденсатор змінної ємності і при максимальній ємності його налаштовують генератор на резонансну частоту контуру. Потім паралельно конденсатору приєднують конденсатор C_x ; порушений резонанс відновлюють при постійному налаштуванні генератора за допомогою зменшення ємності C_0 до деякого значення C_{02} . Вимірювана ємність визначається формулою $C_x = C_{01} - C_{02}$.

Верхня межа вимірюваних таким методом ємностей дорівнює різниці між максимальною C_M і початковою C_H ємностями конденсатора C_0 . Конденсатори, ємність яких перевищує значення $C_M - C_H$, можна підключати до контуру послідовно із постійним конденсатором відомої ємності C_x . При цьому порядок вимірювань залишається незмінним, але вимірювана ємність підраховується за формулою

$$C_x = \frac{C_1(C_{01} - C_{02})}{(C_1 - C_{01} + C_{02})}. \quad (3.2)$$

3.1.2 Розрахунок ємності плоского конденсатора

Плоский конденсатор – це дві заряджені пластини, які розділені тонким шаром діелектрика.

Місткість плоского конденсатора залежить від площі пластин, відстані між ними та матеріалу (діелектрика), що заповнює простір між пластинами.

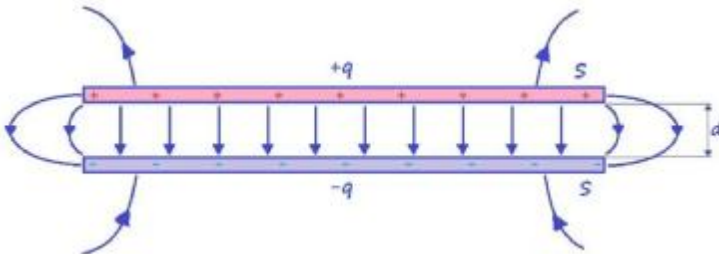


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення плоского конденсатора

Тоді відповідно до формули ємності, а також формул поверхневої щільності заряду та напруженості однорідного електричного поля маємо

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\sigma S}{Ed} = \frac{\epsilon_0 \epsilon ES}{Ed}.$$

Звідси для плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d}, \quad (3.3)$$

де

C – ємність плоского конденсатора, Ф;

S – площа пластин конденсатора, м²;

d – відстань між пластинами, м;

ϵ_0 – електрична постійна, $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ϵ – відносна діелектрична проникність ($\epsilon = 5,5..6$ для склотекстоліту).

3.1.3 Розрахунок ємності циліндричного конденсатора

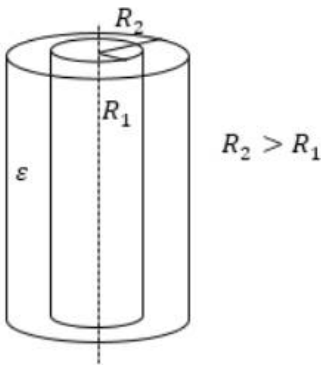


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення циліндричного конденсатора

Даний вид конденсатора має дві співвісні поверхні, що проводять циліндричні поверхні, як показано на рисунку 3.3.

Ємність циліндричного конденсатора обчислюється за такою формулою:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (3.4)$$

де l – висота циліндра, R_1 і R_2 – радіуси обкладок.

3.2 Описання експериментальної установки

3.2.1 Опис та призначення Е7-5А

Вимірювач індуктивностей та ємностей високочастотний типу Е7-5А (рисунок 3.4) призначений для вимірювання малих величин ефективних індуктивностей та ємностей (конденсатори повинні бути з малими втратами: повітряні, слюдяні, керамічні тощо).

Технічні характеристики приладу як вимірювача ємностей:

- межі виміру ємностей від 1 до 5000 пф;
- похибка вимірювання ємностей у діапазоні від 1 до 2,5 пф не перевищує $\pm (0,05 C_x + 0,1)$ пф, у діапазоні від 2,5 до 10 пф не перевищує $\pm (0,05 C_x + 0,05)$ пф, в іншому діапазоні - $\pm (0,005 C_x + 0,4)$ пф, де C_x - виміряна ємність у пф;
- вимірювання ємностей проводиться на частотах 700 - 300 кГц.

Основні похибки приладу визначено за умов:

- температура навколишнього повітря $20 \pm 5^\circ\text{C}$,
- відносна вологість $65 \pm 15\%$,
- атмосферний тиск 750 ± 30 мм рт. ст.,
- напруга джерела живлення $220 \pm 2\%$.



Рисунок 3.4 – Органи управління вимірювального приладу Е7-5А

3.2.2 Принцип дії та електрична схема приладу

Вимірювання індуктивності та ємності проводиться резонансним методом з індикацією резонансу та нульовим биттям. У приладі є два високочастотні генератори, зібрані за однаковою схемою. У коливальний контур одного генератора включений зразковий конденсатор змінної ємності (Зібр). У контур другого генератора послідовно з контурною індуктивністю (L_0) включається вимірювана індуктивність (L_x).

Схема контурів генераторів показана на рисунку 1, де:

C_0 – сумарна ємність 1-го контуру (початкова ємність зразкових конденсаторів; ємність підстроєного конденсатора, ємність постійної конденсатора, ємність монтажу);

C_0'' – сумарна ємність 2-го контуру (ємність постійного конденсатора, ємність підстроєного конденсатора, ємність конденсатора «НАЧАЛЬНАЯ УСТАНОВКА», ємність монтажу).

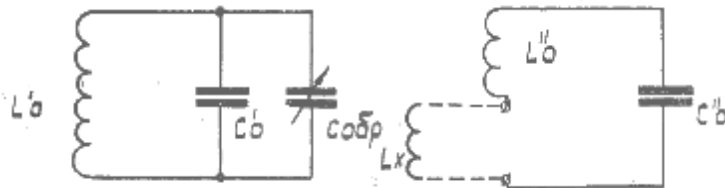


Рисунок 3.5 – Схеми контурів генераторів

Коливання високої частоти обох генераторів через буферні каскади подаються на змішувач. Зі змішувача коливання різницевої частоти подаються через фільтр нижніх частот на підсилювач низької частоти, паралельно анодному навантаженню якого включений індикатор налаштування на нульові биття.

За відсутності вимірюваної індуктивності L_x (клеми « L_x » закорочені) генератори по нульовим биттям налаштовуються на однакову частоту при ємності першого контуру C_0 (відповідає нулю за шкалою конденсаторів « C_I », « C_{II} », « C_{III} »).

При цьому виконується рівність:

$$C_0' L_0' = C_0'' L_0''.$$

При вимірі ємностей клеми « L_x » у контурі 2-го генератора укорочені за допомогою перемикача. Після налаштування приладу на

нульові биття вимірювана ємність підключається паралельно контуру до клем «С_x». Відносна розладка частот, що виникає при цьому, компенсується відліковими конденсаторами 1-го контуру до відновлення рівності частот (по нульовим биттям на виході приладу).

За умови рівності контурних індуктивностей вимірювана ємність дорівнює відліковій ємності.

Для вимірювання ємностей в діапазоні від 1 до 10 пф призначений конденсатор С10, ємність якого може змінюватися в межах не менше 10 пф.

Вимірювання ємності в діапазоні від 10 до 5000 пф.

3.3 Порядок виконання роботи

Підготовка до роботи:

- корпусну клему приладу з'єднати із шиною заземлення;
- кабель живлення приладу включити до мережі;
- тумблером «МЕРЕЖА» увімкнути прилад;
- дати приладу прогрітись протягом 30 хвилин.

Проведення вимірювань:

- встановити перемикач «МНОЖИТЕЛЬ К» у положення «С»;
- встановити на нуль шкали всіх відлікових конденсаторів та перемикач «СІ» у положення «0»;
- ручкою «НАЧАЛЬНАЯ УСТАНОВКА» налаштувати обидва генератори на нульові биття по оптичному індикатору (при розімкнених клемах «С_x»);
- увімкнути вимірювану ємність і зробити вторинну настройку на нульові биття, користуючись перемикачем «СІ» та ручкою «СІІ» або ручкою «СІІІ» при вимірі малих ємностей.

Вимірювана ємність залежно від її величини визначається за такою формулою: $C_{xp} F = C_I + C_{II} + C_{III}$.

3.4 Контрольні питання

- а. На чому базується резонансний метод?
- б. Намалюйте схему вимірювання ємностей резонансним методом. Опишіть принцип її роботи.
- в. Які прилади можна використовувати в якості індикаторів резонансу? Наведіть приклади.
- г. Яка похибка виникає при вимірювання ємностей резонансним методом? Яким чином можна збільшити точність вимірювань?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 «ВИМІРЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ»

Мета роботи:

- набути практичних навичок в проведенні вимірювань в колах змінного струму;
- перевірити справедливність закону Ома для кола змінного струму.

Прилади й обладнання: змінний резистор, котушка індуктивності, конденсатор, амперметр і вольтметр змінного струму.

4.1 Основні теоретичні відомості

Змінним називається струм, який змінюється з часом $i = i(t)$. *Миттєвим значенням* змінного струму називається його значення в фіксований момент часу.

Періодичним називають такий змінний струм, миттєві значення якого повторюються через рівні проміжки часу: $i = i(t + nT)$, де $n = 0, 1, 2, \dots$.

T – *період* змінного струму, тобто найменший проміжок часу, після закінчення якого миттєві значення струму повторюються в тій же послідовності.

Найпростішим типом періодичного струму є *гармонічний струм*:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.1)$$

або

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (4.2)$$

де I_m – амплітуда струму; $\omega t + \varphi$ – повна фаза коливання; φ – початкова фаза коливання (при $t = 0$); ω – кругова частота.

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi n, \quad (4.3)$$

де n – *частота* змінного періодичного струму, чисельно рівна числу періодів за 1 секунду.

Діючим або ефективним значенням гармонічного струму називається значення такого постійного струму, який протікаючи через один і той же незмінний опір R за період часу T виділяє таку ж кількість тепла, що і даний гармонічний струм.

Між амплітудним і діючим значенням гармонійного струму існує простий зв'язок:

$$I_{eff} = I_m / \sqrt{2}. \quad (4.4)$$

Аналогічно для напруги і ЕРС:

$$U_{eff} = U_m / \sqrt{2}, \quad e_{eff} = e_m / \sqrt{2}. \quad (4.5)$$

Для миттєвих значень змінних ЕРС і струмів (коли зміна достатньо повільна) справедливі основні закони постійного струму в їх найбільш загальній формі. При цьому слід мати на увазі, що опори одного і того ж електричного кола для постійного і змінного струмів не збігаються. Так один і той же резистор для постійного і змінного струмів має різний електричний опір.

Основними елементами електричного кола змінного струму є активний опір, індуктивність і ємність.

Активний опір є елементом електричного кола, в якому при проходженні струму відбувається незворотний процес перетворення електричної енергії в теплову. Чисельне значення активного опору визначається відношенням потужності, що витрачається на тепло, до квадрату діючого значення змінного струму:

$$R = P / I_{eff}^2 \text{ [Ом]}. \quad (4.6)$$

Необхідно пам'ятати, що $R \neq r l / S$.

У колі змінного струму з активним опором струм і напруга співпадають по фазі (рис. 4.1).

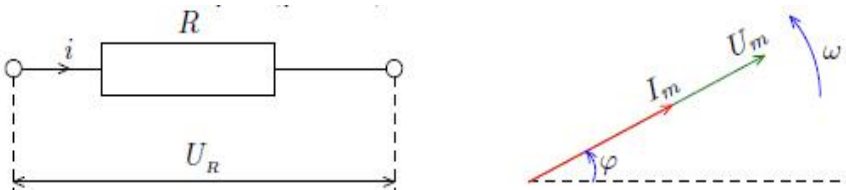


Рисунок 4.1 – Активний опір у колі змінного струму

Покажемо це.

Нехай струм у колі змінюється за законом (4.1). Тоді на підставі закону Ома для ділянки кола без ЕРС

$$iR = U_R. \quad (4.7)$$

Підставляючи (4.1) в (4.7), отримуємо:

$$U_R = U_{Rm} \sin(\omega t + f). \quad (4.8)$$

Початкова фаза струму $j_i = j$. Початкова фаза напруги $j_u = j$. Різниця фаз між напругою і струмом $j_u - j_i = 0$.

У колі з активним опором миттєві, амплітудні і діючі значення напруги і струму пов'язані законом Ома:

$$U_R = iR, U_{Rm} = I_m R, U_{R\text{eff}} = I_{\text{eff}} R. \quad (4.9)$$

Індуктивність L – це елемент електричного кола, здатний накопичувати енергію магнітного поля. У колі змінного струму з індуктивністю напруга випереджає по фазі струм на $p/2$ (рисунок 4.2). Покажемо це.

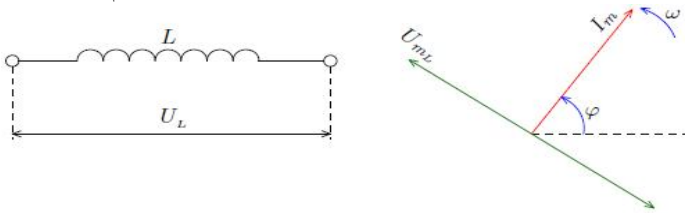


Рисунок 4.2 – Індуктивність у колі змінного струму

Нехай $i = I_m \sin(\omega t + j)$. При проходженні змінного струму в індуктивності виникає ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L \cdot di / dt. \quad (4.10)$$

На підставі закону Ома для ділянки кола з ЕРС можна записати:

$$iR = U_L + e_L. \quad (4.11)$$

Але $R = 0$, отже, $U_L + e_L = 0$, і

$$U_L = L \cdot di / dt, \quad (4.12)$$

де U_L – миттєва напруга на індуктивності, що врівноважує ЕРС самоіндукції.

$$U_L = \omega L I_m \cos(\omega t + f) = U_{Lm} \sin(\omega t + f + p/2). \quad (4.13)$$

Початкова фаза струму $j_i = j$. Початкова фаза напруги $j_u = j + p/2$. Різниця фаз між напругою і струмом $j_u - j_i = p/2$.

ЕРС самоіндукції відстає за фазою від струму на кут $p/2$, тому що $e_L = -U_L$. Таким чином, в колі змінного струму з індуктивністю амплітудні і діючі значення напруги і струму формально пов'язані законом Ома:

$$U_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m, U_{Leff} = X_L I_{eff}, \quad (4.14)$$

де $X_L = \omega L$ – індуктивний опір, що вимірюється в [Ом]. Це розрахункова величина, яка не має фізичного змісту.

Ємність C – це елемент електричного кола, здатний накопичувати енергію електричного поля.

У колі змінного струму з ємністю напруга відстає по фазі від струму на кут $p/2$ (рис. 4.3). Доведемо це.

Нехай

$$U_C = U_{Cm} \sin(\omega t + f). \quad (4.15)$$

Цю напругу докладено до конденсатора від зовнішнього джерела. Вона врівноважує ЕРС ємності (аналогічну ЕРС самоіндукції в котушці індуктивності), яка виникає за наявності зарядів на обкладинках конденсатора.

$$e_C = q / C. \quad (4.16)$$

На підставі закону Ома для ділянки кола з ЕРС можна записати:

$$iR = U_C + e_C. \quad (4.17)$$

Але $R = 0$. Отже, $U_C + e_C = 0$, $e_C = -U_C$.

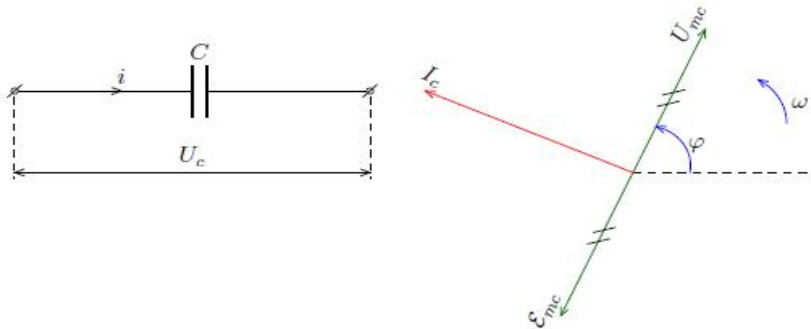


Рисунок 4.3 – Ємність у колі змінного струму

За позитивний напрямок струму відповідно до закону збереження електричного заряду приймається напрямок, при якому заряди залишають обкладинки конденсатора: $i = -dq / dt$. Разом з тим $q = C \cdot e_c = -C \cdot U_c$. Отже,

$$i = C \cdot dU_c / dt. \quad (4.18)$$

Підставляючи значення U_c , отримуємо:

$$i = \omega C U_{c_m} \cos(\omega t + f) = I_m \sin(\omega t + f + p/2). \quad (4.19)$$

Початкова фаза напруги $j_u = j$. Початкова фаза струму $j_i = j + p/2$. Різниця фаз між напругою і струмом $j_u - j_i = -p/2$. При цьому ЕРС ємності випереджає по фазі струм на кут $p/2$.

Таким чином, в колі змінного струму з ємністю амплітудні і діючі значення напруги і струму формально пов'язані законом Ома:

$$I_m = \omega C U_{c_m} = U_{c_m} / X_c, I_{eff} = U_{c_{eff}} / X_c, \quad (4.20)$$

де $X_c = 1/\omega C$ – ємнісний опір, що вимірюється в [Ом]. Це розрахункова величина, яка не має фізичного змісту.

У загальному випадку до складу кола змінного струму можуть входити і активний опір, і ємність, і індуктивність. Всі ці елементи можуть бути з'єднані між собою як послідовно, так і паралельно. На рисунку 4.4 показана схема послідовного з'єднання зазначених елементів і відповідна їм векторна діаграма для струму і напруг.

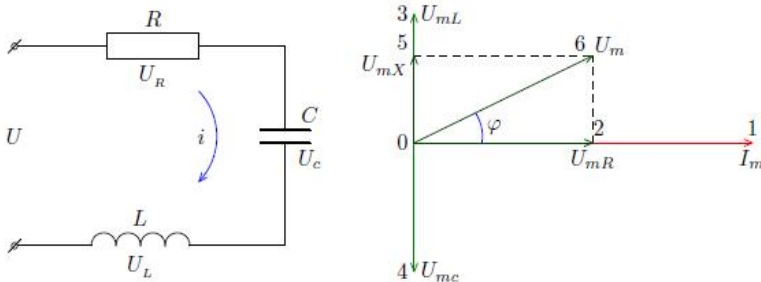


Рисунок 4.4 – Схема послідовного з'єднання активного опору, ємності та індуктивності та відповідна векторна діаграма

У колі, що складається з послідовно з'єднаних R , L і C , через всі елементи протікає один і той же струм $i = I_m \sin \omega t$. Падіння напруги на елементах кола:

$$U_R = U_{Rm} \sin \omega t, \quad (4.21)$$

де $U_{Rm} = I_m R$;

$$U_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \mathbf{p}/2), \quad (4.22)$$

де $U_{Cm} = I_m X_C$;

$$U_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \mathbf{p}/2), \quad (4.23)$$

де $U_{Lm} = I_m X_L$.

Прикладене миттєве значення напруги дорівнює сумі миттєвих падінь напруги на окремих елементах кола:

$$U = U_R + U_C + U_L = U_m \sin(\omega t + \mathbf{f}). \quad (4.24)$$

Додавання цих гармонічних напруг виконано в векторній формі (рис. 4.4). Порядок побудови векторної діаграми позначений цифрами. U_{Rm} – активна складова напруги, $U_{Xm} = U_{Lm} - U_{Cm}$ – реактивна складова напруги.

З векторної діаграми випливає, що $U_m^2 = U_{Rm}^2 + U_{Xm}^2 = I_m^2 R^2 + I_m^2 (X_L - X_C)^2$, звідки

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I_m Z, \quad (4.25)$$

де $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ – повний опір кола; R – активна складова опору кола; $X = \omega L - 1/\omega C$ – реактивна складова опору кола. Фаза напруги визначається за формулою

$$\mathbf{f} = \arctg(X/R). \quad (4.26)$$

Домовилися індуктивний опір вважати позитивним, а ємнісний – негативним. Тому реактивний опір кола X в залежності від знака може мати або індуктивний характер $X_L > X_C$, або ємнісний характер $X_L < X_C$.

Реактивні опору X_L , X_C і X залежать від частоти. Відповідні графіки наведені на рисунку 4.5.

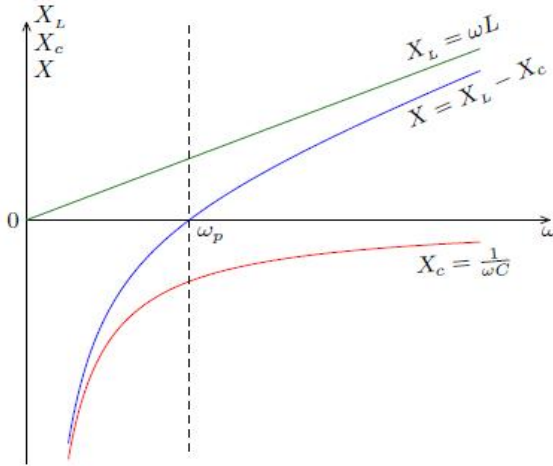


Рисунок 4.5 – Залежність від частоти реактивних опорів X_L , X_C і X

На частоті $w = w_p$ повний реактивний опір кола стає рівним нулю і коло з R , L і C поводить себе як чисто активний опір

$$R = R_L + R_C + R_0, \quad (4.27)$$

де R_L – активний опір котушки індуктивності; R_C – активний опір конденсатора; R_0 – активний опір резистора.

Стан електричного кола на частоті $w = w_p$ зветься *резонансом напруг*.

Середня за період потужність, що виділяється у колі, дорівнює

$$p = UI \cos f = I^2 Z \cos f = I^2 R. \quad (4.28)$$

Вона витрачається в активному опорі кола.

Поряд з вже викладеним необхідно мати на увазі, що будь-яка реальна котушка індуктивності, як і будь-який реальний конденсатор при роботі в колі змінного струму мають не тільки реактивні, а й активні опори. На рисунку 4.6 показані реальні котушка індуктивності і конденсатор і їх еквівалентні схеми.

е. Обчисліть повний опір котушки Z_L за формулою

$$Z_L = U_L / I. \quad (4.29)$$

ж. Із формули (4.30) визначте індуктивність L для кожного вимірювання.

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2}. \quad (4.30)$$

з. Розрахуйте падіння напруги на індуктивному опорі $I\omega L$.

и. Обчисліть повний опір всього кола $Z = U / I$. Порівняйте між собою Z, Z_L, X_L .

к. Побудуйте векторну діаграму напруг для одного із значень I .

л. Обчисліть різницю фаз φ між струмом I і напругою U , наприклад, за формулою

$$\varphi = \arcsin(\omega L / Z). \quad (4.31)$$

м. Знайдіть середнє значення \bar{L} і оцініть похибку ΔL . Результат запишіть у вигляді

$$L = \bar{L} \pm \Delta L.$$

4.2.2 Визначення ємності конденсатора й кута зсуву фаз між струмом і напругою в RC-колі

а. Зберіть електричне коло за схемою, наведеною на рисунку 4.8. Межа вимірювання вольтметра – найбільша.

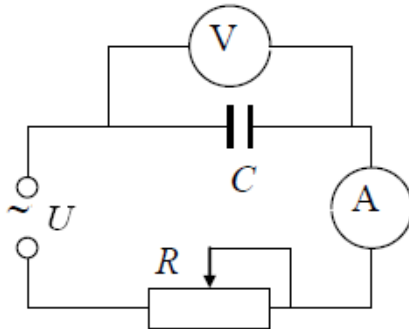


Рисунок 4.8 – Схема установки для вимірювань в RC-колі

б. Установіть по черзі струм в колі 25; 30; 35; 40 мА і запишіть відповідні йому покази вольтметра U_C у таблицю 4.2.

в. Виміряйте вхідну напругу U .

Таблиця 4.2 – Результати вимірювань в RC-колі

I	U_C	U	Z_C	Z	R	IR	φ	C

г. Визначте опір конденсатора змінному струму Z_C за формулою

$$Z_C = U_C / I. \quad (4.32)$$

Можна вважати, що повний опір конденсатора є ємнісний опір, так як його активний опір R_C , як правило, значно менше ємнісного і їм можна знехтувати.

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + 1/w^2C^2} \approx 1/wC. \quad (4.33)$$

д. Знайдіть повний опір кола Z для всіх вимірювань за формулою

$$Z = U / I. \quad (4.34)$$

е. З формули (4.35) знайдіть опір резистора R .

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + Z_C^2}. \quad (4.35)$$

ж. Обчисліть падіння напруги на резисторі IR .

з. Побудуйте векторну діаграму напруг для одного із значень I , використовуючи для цього U_C і IR .

и. Знайдіть різницю фаз j між струмом і напругою за формулою

$$f = \arcsin(U_C / U). \quad (4.36)$$

к. Обчисліть ємність конденсатора для всіх вимірювань за формулою

$$C = 1/wZ_C. \quad (4.37)$$

л. Знайдіть середнє значення \bar{C} і оцініть похибку ΔC . Результат запишіть у вигляді

$$C = \bar{C} \pm \Delta C.$$

4.2.3 Перевірка закону Ома

а. Складіть електричне коло за схемою (рис.4.9). Межа вимірювання вольтметра – найбільша. Конденсатор і котушка повинні бути тими ж, що і у пунктах 4.2.1, 4.2.2.

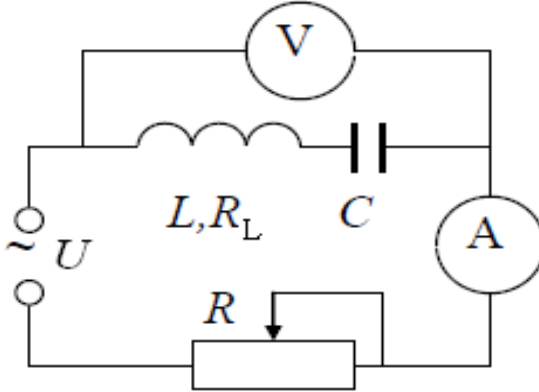


Рисунок 4.9 – Схема установки для перевірки закону Ома

б. Виміряйте напругу на вказаній ділянці кола U_{LC} при 5-6 значеннях струму I . Результати запишіть в Таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювань і обчислень

I	U_{LC}	Z_{LC} виміряне	Z_{LC} обчислене

в. Знайдіть повний опір Z_{LC} ділянки кола, яка включає L і C , для кожного вимірювання за формулою

$$Z_{LC} = U_{LC} / I . \quad (4.38)$$

Назвемо його *вимірним опором* навантаження L, C .

г. Знайдіть середнє значення $\overline{Z_{LC}}$ (виміряне) і оцініть похибку ΔZ_{LC} .

д. Використовуючи значення \overline{L} і \overline{C} , знайдені раніше у вправах 1, 2, обчисліть опір даної ділянки кола за формулою

$$Z_{LC} = \sqrt{R_L^2 + \left(\omega L - 1/\omega C\right)^2}. \quad (4.39)$$

Будемо називати знайдене значення опору *обчисленим*. Оцініть його похибку ΔZ_{LC} .

е. Порівняйте між собою вимірне і обчислене значення опору. Їх збіг з точністю до похибок вимірювання свідчить про Ваші правильні і безпомилкові дії.

ж. Побудуйте графіки залежності струму від напруги на котушці, конденсаторі і на ділянці кола $L-C$, тобто за результатами всіх вправ, в одних осях координат. Подовжить лінії графіків до перетину з осями. Зробіть висновки з отриманих результатів.

4.3 Контрольні питання

а. Дайте визначення гармонічного змінного струму і наведіть його параметри.

б. Що таке активний опір? Які елементи кола змінного струму мають активний опір? Чи будуть вони його мати в колі постійного струму?

в. Що таке індуктивний опір? Від чого він залежить? Чи володіє коло індуктивністю, якщо в ньому немає котушки?

г. Доведіть, що напруга на індуктивності випереджає струм за фазою. Зобразіть векторну діаграму для даного випадку.

д. Доведіть, що коливання напруги на ємності відстають по фазі від струму. Намалюйте векторну діаграму для цього випадку.

е. Що таке ємнісний опір? Від чого він залежить? Чи володіє електричне коло ємністю при відсутності в ньому конденсатора?

ж. Сформулюйте закон Ома для кола змінного струму. Як проводиться перевірка виконання цього закону?

з. Наведіть формули для роботи і потужності, що виділяється в колі змінного струму.

и. В чому полягає явище резонансу напруг в колі змінного струму?

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 «ДОСЛІДЖЕННЯ НАМАГНИЧУВАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ФЕРОМАГНЕТИКІВ»

Мета роботи: експериментально вивчити залежність індукції магнітного поля у феромагнетиках і його магнітної проникності від напруженості поля.

Прилади і обладнання: тороїдний трансформатор, генератор низькочастотний ГЗ-109, мультиметр МЗ900, магазин опорів Р33.

5.1 Основні теоретичні відомості

Речовина, поміщена в зовнішнє магнітне поле, намагнічується. Ступінь намагнічування речовини прийнято характеризувати вектором намагнічення (намагніченістью) \mathbf{J} .

Вектором намагнічення (намагніченістью) називається фізична величина, чисельно рівна сумарному магнітному моменту одиниці об'єму речовини

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_{mi} / V, \quad (5.1)$$

де \mathbf{p}_{mi} – магнітні моменти частинок, що знаходяться в об'ємі V .

В слабких магнетиках (діамагнетиках, парамагнетиках) вектор намагнічення пропорційний напруженості магнітного поля \mathbf{H} , що викликає намагнічення:

$$\mathbf{J} = c \mathbf{H}, \quad (5.2)$$

де χ – *магнітна сприйнятливість* речовини. У *діамагнетиках* намагніченість протилежна зовнішньому полю ($\chi < 0$), в *парамагнетиках* орієнтована в одному з ним напрямку ($\chi > 0$).

Магнітне поле, створюване в магнетиках, складається із зовнішнім магнітним полем, і сумарне поле характеризується індукцією магнітного поля

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J} = \mu_0 m \mathbf{H}, \quad (5.3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, $m = 1 + c$ – *магнітна проникність* середовища.

Кожен магнетик характеризується магнітною проникністю, яка показує, у скільки разів індукція поля B в середовищі більше індукції

B_0 магнітного поля в вакуумі: $m = B / B_0$. Діамагнетики і парамагнетики слабо змінюють зовнішнє магнітне поле, і магнітна проникність для них мало відрізняється від одиниці.

Виділяють особливу групу сильних магнетиків, які називають *феромагнетиками*.

До особливих властивостей феромагнетиків відносяться:

- магнітна проникність, як і раніше, визначається співвідношенням (5.3), але тепер вона складним чином залежить від напруженості магнітного поля $\mu = \mu(H)$ і за величиною $\mu \approx \chi \gg 1$;
- наявність *залишкової намагніченості* після зняття зовнішнього магнітного поля і пов'язана з нею наявність гістерезису в залежностях $J = J(H)$ і $B = B(H)$;
- існування температури, званої *точкою Кюрі*, при нагріванні вище якої феромагнетик втрачає свої властивості і стає парамагнетиком.
- явище *магніотрикуції*, що полягає в деформації феромагнетика при намагнічуванні.

Типова залежність $\mu(H)$ приведена на рисунок 5.1. У довідкових таблицях зазвичай наводяться значення максимальної магнітної проникності.

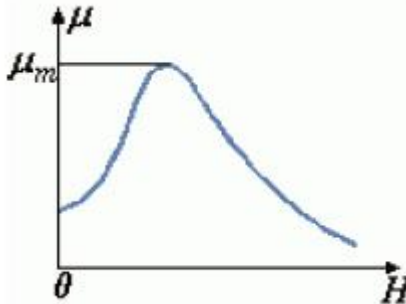


Рисунок 5.1 – Залежність $\mu(H)$ для феромагнетиків

Непостійність магнітної проникності призводить до складної нелінійної залежності індукції від напруженості зовнішнього магнітного поля.

Характерною особливістю процесу намагнічування феромагнетиків є так званий *гістерезис*, тобто залежність намагнічування від передісторії зразка. Крива намагнічування $B(H)$

феромагнітного зразка являє собою петлю складної форми, яка називається *петлею гістерезису* феромагнетика (рис. 5.2).

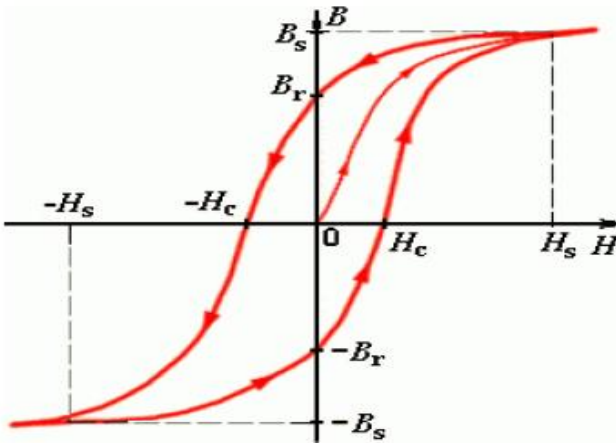


Рисунок 5.2 – Крива намагнічення феромагнітного зразка

З рисунка видно, що при $|H| > H_s$ настає магнітне насичення – намагніченість зразка досягає максимального значення.

Якщо потім зменшувати напруженість зовнішнього поля і довести її знову до нульового значення, то феромагнетик збереже залишкову намагніченість – поле всередині зразка дорівнюватиме B_r . Залишкова намагніченість дозволяє створювати постійні магніти.

Якщо змінити напрямок напруженості зовнішнього поля і довести H до значення H_c , яке прийнято називати *коерцитивною силою*, індукція магнітного поля стане рівною нулю, але при виключенні зовнішнього магнітного поля ($H = 0$) намагніченість залишиться. Для того щоб повністю розмагнітити зразок, необхідно багаторазово зробити обхід вздовж петлі гістерезису, як це зазначено стрілками на рисунку 5.2, і поступово зменшувати амплітуду напруженості намагнічуючого поля до нуля.

У зв'язку з неоднозначністю залежності $B(H)$ поняття магнітної проникності і магнітної сприйнятливості феромагнетиків застосовуються лише до *основної кривої намагнічування*, відповідної намагнічуванню феромагнетика, що не піддавався раніше намагнічуванню.

Природа феромагнетизму може бути до кінця зрозуміла тільки на основі квантових уявлень.

Якісно феромагнетизм пояснюється наявністю власних (спінових) магнітних полів у електронів. У кристалах феромагнітних матеріалів виникають умови, при яких внаслідок сильної взаємодії спінових магнітних полів сусідніх електронів енергетично вигідною стає їх паралельна орієнтація. В результаті такої взаємодії всередині кристала феромагнетика виникають спонтанно намагнічені області розміром порядку $10^{-2} \div 10^{-4}$ см. Ці області називаються *доменами*. Кожен домен являє собою невеликий постійний магніт.

У відсутності зовнішнього магнітного поля напрями векторів індукції магнітних полів в різних доменах у великому кристалі орієнтовані хаотично. Такий матеріал в середньому виявиться ненамагніченим. При накладенні зовнішнього магнітного поля відбувається зміщення границь доменів так, що об'єм доменів, орієнтованих по зовнішньому полю, збільшується. Зі збільшенням напруженості зовнішнього поля зростає магнітна індукція намагніченої речовини. У дуже сильному зовнішньому полі домени, в яких власне магнітне поле збігається за напрямком із зовнішнім полем, поглинають всі інші домени, і настає магнітне насичення. Рис. 5.3 може служити якісною ілюстрацією процесу намагнічування феромагнітного зразка.

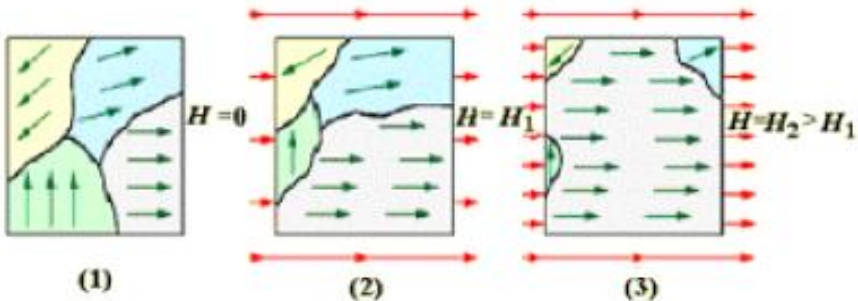


Рисунок 5.3 – Зміна доменної структури в процесі намагнічування

Залежність магнітної сприйнятливості і магнітної проникності від температури для різних класів магнетиків відрізняється. Для діамагнетиків χ від температури не залежить. Для парамагнетиків має місце залежність, яка визначається законом Кюрі.

Для феромагнетиків в досить великому інтервалі температур χ майже не залежить від температури, однак при температурах вище точки Кюрі T_C тепловий рух разупорядковує паралельну орієнтацію спінових магнітних моментів. Домени перестають існувати, і феромагнетик стає звичайним парамагнетиком, магнітна сприйнятливість якого в парамагнітній області підкоряється закону Кюрі-Вейсса

$$c = C / (T - T_C), \quad (5.4)$$

де C – стала, що залежить від роду речовини.

5.2 Описання експериментальної установки

Для вивчення залежностей $B = B(H)$ і $\mu = \mu(H)$ феромагнетиків використовується електрична схема, показана на рис. 5.4, де T_p – тороїдний трансформатор; V_1 , V_2 – вольтметри; r – магазин опорів. Первинна намагнічуюча обмотка L_1 живиться змінним струмом від генератора сигналів низькочастотного ГЗ-109.

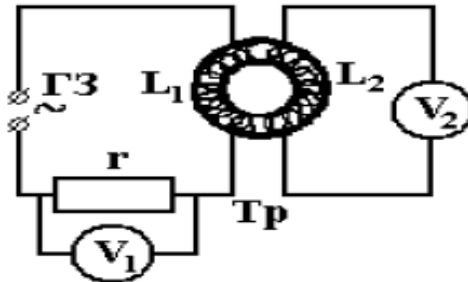


Рисунок 5.4 – Схема установки для вивчення намагнічення феромагнетиків

Струм в намагнічуючій котушці з N_1 витків, намотаних на замкнене осердя досліджуваного феромагнетика, створює в осерді магнітне поле, напруженість якого

$$H_1(t) = N_1 I(t) / l, \quad (5.5)$$

де l – довжина осердя по середній лінії. Оскільки вольтметр V_1 вимірює діюче значення напруги U_1 на опорі r , то

$$I_m = U_m / r = U_1 \sqrt{2} / r, \quad (5.6)$$

і максимальне значення напруженості магнітного поля в осерді

$$H_m = N_1 I_m / l = N_1 U_1 \sqrt{2} / r l . \quad (5.7)$$

ЕРС індукції у вимірювальній котушці з N_2 витків по закону Фарадея-Максвелла дорівнює швидкості зміни магнітного потоку в ній:

$$e(t) = -N_2 d\Phi / dt = -N_2 S dB(t) / dt , \quad (5.8)$$

де $B(t) = B_m \cos \omega t$ – індукція магнітного поля в осерді досліджуваного феромагнетика, S – площа перерізу осердя. Підставляючи $B(t)$ в (5.8), отримуємо $e(t) = N_2 S B_m \omega \sin \omega t$. Максимальне значення ЕРС індукції

$$e_m = N_2 S B_m \omega = N_2 S B_m \cdot 2\pi n . \quad (5.9)$$

З останнього виразу отримуємо, враховуючи, що вольтметр V_2 вимірює діюче значення ЕРС індукції U_2 ,

$$B_m = U_2 / \sqrt{2} \pi n N_2 S . \quad (5.10)$$

Магнітна проникність для кожного значення струму в намагнічуючій котушці дорівнює

$$\mathbf{m} = B_m / \mathbf{m}_0 H_m . \quad (5.11)$$

Параметри установки:

- $l = 7,54 \cdot 10^{-2}$ м – довжина осердя за середньою лінією;
- $S = 6,4 \cdot 10^{-5}$ м² – площа поперечного перерізу осердя;
- $N_1 = 105$, $N_2 = 120$ – число витків в первинній та вторинній обмотках тороїдного трансформатора, відповідно.

5.3 Порядок виконання роботи

- а. Зберіть коло за схемою (рис. 5.4).
- б. На магазині опорів встановіть опір $r = 30$ Ом.
- в. Встановіть на генераторі частоту $n = 100$ Гц (діапазон робочих частот мультиметрів $40 \div 1000$ Гц). Ручка «Підсилення» повинна бути повернена проти годинникової стрілки до упору в мінімальне положення.

г. Мультиметр V_1 встановіть на межу «змінний струм – 20 В», мультиметр V_2 встановіть на межу «змінний струм – 2 В». Увімкніть генератор, включіть мультиметри.

д. Дуже плавно змінюючи напругу, що подається генератором, ручкою «Підсилення», приблизно через 0,1 В виміряйте відповідні напруги U_1 , U_2 і занесіть їх значення в табл. 5.1. Необхідно отримати не менше 15 експериментальних точок, особливо на початковому етапі вимірювань.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань і обчислень

№	U_1 , В	U_2 , В	H , А/м	B , Тл	m

е. Для кожного вимірювання розрахуйте H , B , m за формулами (4.7), (4.9), (4.10). Результати занесіть у таблицю.

ж. Побудуйте за експериментальними даними графіки залежності $B(H)$, $\mu(H)$.

з. Зробіть висновки.

Для довідок: в роботі використовується осердя з початковою магнітною проникністю $m = 1000 \pm 200$, $m_{\max} = 1800$.

5.4 Контрольні питання

- Що таке магнітні властивості речовини?
- На які групи можна поділити речовини за їх магнітними властивостями?
- Чим характерна будова феромагнетиків?
- Які в теорії графіки залежностей $B = B(H)$ і $\mu = \mu(H)$ для феромагнетиків?
- Що таке явище гістерезису і чим воно обумовлено?
- Що називається залишковою індукцією і коерцитивною силою?
- Що таке точка Кюрі і що вона характеризує?

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 «ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАННЯ ЕРС ХОЛЛА»

Мета роботи: ознайомитися з гальваномагнітним ефектом Холла як методом вимірювання ряду параметрів напівпровідникових матеріалів; ознайомитися з методами вимірювання ЕРС Холла.

Прилади та обладнання: стенд СФП-5М

6.1 Основні теоретичні відомості

6.1.1 Ефект Холла

При одночасному впливі на носії заряду електричного і магнітного полів виникають кінетичні ефекти, які називають гальваномагнітними ефектами. Ефект Холла є одним із гальваномагнітних ефектів. Крім ефекту Холла до гальваномагнітних явищ відносять ефект магнітного гістерезису, поперечний гальванотермомагнітний ефект (Еттінгсгаузена) та подовжній гальванотермомагнітний ефект (ефект Нернста).

Фізична суть ефекту Холла полягає в наступному (рис. 6.1).

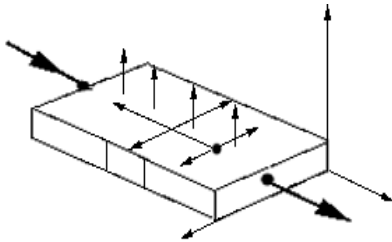


Рисунок 6.1 – Ефект Холла

Через зразок, що має форму паралелепіпеда, пропускають струм у напрямку осі X . Якщо уздовж осі Z , перпендикулярній осі X , створити магнітне поле B_z , то носії заряду, що рухаються уздовж осі X із швидкістю V_x , будуть відхилятися під дією сили Лоренца:

$$F = eV_x B_z \quad (6.1)$$

у напрямку осі Y . Отже, у напрямку Y з'являється поперечний струм I_y .

Зразок має кінцеві розміри в напрямку осі Y , тому на бічних гранях зразка накопичується заряд, внаслідок чого виникає поперечне електричне поле E_y , яке зростає до тих пір, поки не зкомпенсує силу Лоренца, і поперечний струм I_y не стане рівним нулю. Отже, у зразку виникає сумарне поле $E = E_y + E_x$, яке буде нахилено на деякий кут Q щодо E_x , пропорційно магнітній індукції B :

$$\operatorname{tg} Q = \frac{E_y}{E_x} = \mu_n B_z \quad (6.2)$$

Як бачимо, розмірність коефіцієнта пропорційності μ_n збігається з розмірністю рухливості і має назву холлівської рухливості.

Холл експериментально встановив, що поле E_y задовольняє емпіричному співвідношенню (для слабких магнітних полів):

$$E_y = R_n j_x B_z \quad (6.3)$$

де j_x – густина струму; R_n – стала Холла, яка залежить від властивостей матеріалу. З (5.2) і (5.3) випливає:

$$\mu_n E_x B_z = R_n j_x B_z \quad (6.4)$$

Використовуючи відомі вирази для густини струму й електричної провідності δ :

$$j_x = \delta E_x \quad (6.5)$$

$$\delta = en\mu_n \quad (6.6)$$

де n – концентрація електронів; μ_n – дрейфова рухливість, одержуємо:

$$R_n = \frac{\mu_{nx}}{\mu_n ne} = A \cdot \frac{1}{ne} \quad (6.7)$$

Для діркового типу провідності аналогічно:

$$R_{np} = \frac{\mu_{np}}{\mu_p pe} \quad (6.8)$$

де p – концентрація дірок.

При змішаній провідності, коли існує два типи носіїв заряду:

$$R_n = A \frac{1}{e} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} \quad (6.9)$$

Відношення рухливостей A залежить від механізму розсіювання носіїв заряду в зразку і має назву холл-чинника. При розсіюванні на іонах домішки $A=1,9$; на теплових коливаннях атомної ґратки $A=1,17$;

на нейтральних центрах $A=1$. У сильних магнітних полях і вироджених напівпровідниках $A=1$.

Як виходить з наведених вище формул, вимірявши значення U_H , B , Y , I і d , можна розрахувати сталу Холла. Знаючи питому електропровідність зразка, можна визначити рухливість носіїв заряду і концентрацію. Знак сталої Холла визначається знаком носіїв заряду, рухливість яких превалює. З (6.9) видно, що у випадку, коли напівпровідник має два типи носіїв, окремо визначити їх концентрацію і рухливість за допомогою вимірювання лише ефекту Холла неможливо.

6.2 Методи вимірювання ЕРС Холла

6.2.1 Класичний метод

Для вимірювання ефекту Холла використовують різні методи: вимірювання при постійних магнітному полі і струмі, при змінному магнітному полі і постійному або змінному вимірювальному струмі, методом Ван-дер-Пау та ін.

У найпростішому випадку (постійні магнітне поле і вимірювальний струм) схема вимірювання показана на рис. 6.2. Через зразок у формі прямокутного паралелепіпеда, який знаходиться у постійному магнітному полі B , протікає вимірювальний струм I , який визначається за падінням напруги на еталонному опорі $R_{ет}$. За допомогою зондів 1 і 2, розташованих на верхній грані зразка, вимірюють його провідність за описаним в лабораторній роботі №1 двозондовим методом. Зонд 2 і зустрічний йому зонд 3 призначені для вимірювання ЕРС Холла.

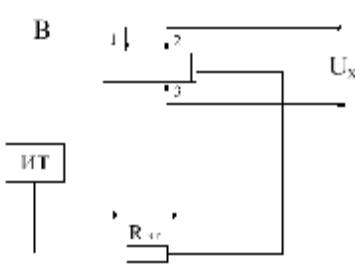


Рисунок 6.2 – Схема вимірювання ефекту Холла

Для напівпровідника n -типу ЕРС Холла:

$$U_x = R_{ин} I_x B_z \frac{1}{d}, \quad (6.10)$$

де d – товщина зразка в напрямку магнітного поля.

Звідси визначається стала Холла:

$$R_{nn} = \frac{dU_x}{I_x B_z}. \quad (6.11)$$

За виміряним значенням сталої Холла R_{nn} визначається концентрація електронів:

$$n = \frac{A}{eR_{nn}} \quad (6.12)$$

і холлівська рухливість електронів:

$$\mu_{nn} = R_{nn} \delta \quad (6.13)$$

Вимірювання ефекту Холла супроводжується деякими фізичними явищами, а напруга на холлівських електродах складається з п'яти компонентів:

- ЕРС Холла, U_x ;
- ЕРС, викликана ефектом Еттінгсгаузена, U_e ;
- ЕРС, викликана ефектом Нернста, U_n ;
- ЕРС, викликана ефектом Рігі-Ледюка, U_p ;
- напруга U_0 , пов'язана з нееквіпотенціальним розташуванням холлівських електродів.

Для усунення сторонніх ефектів вимірювання проводять при різних сполученнях напрямків струмів і магнітного поля:

$$\text{При } +I, +BU_1 = U_x + U_e + U_n + U_p + U_0,$$

$$\text{При } +I, -BU_2 = -U_x - U_e - U_n - U_p + U_0,$$

$$\text{При } -I, +BU_3 = -U_x - U_e + U_n + U_p - U_0,$$

$$\text{При } -I, -BU_4 = U_x + U_e - U_n - U_p - U_0.$$

Звідси:

$$U_x + U_e = \frac{U_1 - U_2 + U_3 - U_4}{4}. \quad (6.14)$$

Зміна напрямку магнітного поля і вимірювального струму однаково впливають на знак ЕРС Холла і ЕРС, пов'язаної з ефектом Еттінгсгаузена, тому так позбутися ефекту Еттінгсгаузена неможливо. Але термомагнітний ефект Еттінгсгаузена за своєю природою інерційний, тому його вплив можна обмежити при переході до вимірювань ефекту Холла при змінному струмі.

6.2.2 Вимірювання ефекту Холла методом Ван-дер-Пау

Для вимірювання ефекту Холла наведеним вище класичним методом необхідно, щоб зразок мав форму прямокутного паралелепіпеда, що ускладнює процедуру вимірювань.

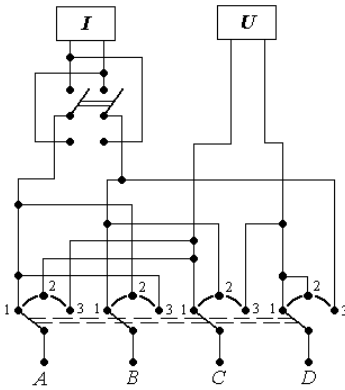
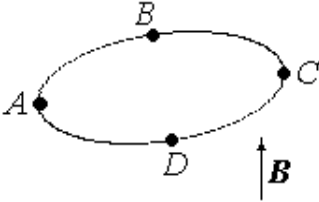


Рисунок 6.3 – Вимірювання за методом Ван-дер-Пау

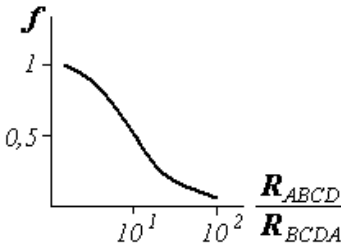


Рисунок 6.4 – Поправочна функція

Для контролю зразків у вигляді пластин довільної форми Ван-дер-Пау запропонував зручний метод, який полягає в наступному. По периферії плоского зразка довільної форми підключають чотири контакти А, В, С, D (рис. 6.3) і вимірюють два значення опору:

$$R_{abcd} = \frac{U_{cd}}{I_{ab}}, R_{bcda} = \frac{U_{da}}{I_{bc}}. \quad (6.15)$$

Ван-дер-Пау довів, що питомий опір зразка товщиною d виражається співвідношенням:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_{abcd} + R_{bcda}}{2} f\left(\frac{R_{abcd}}{R_{bcda}}\right), \quad (6.16)$$

де $f\left(\frac{R_{abcd}}{R_{bcda}}\right)$ – поправочна функція.

Графік цієї функції зображено на рис. 6.4.

Для визначення холлівської рухливості носіїв заряду вимірюють ΔR_{bdac} – зміну опору ($R_{bdac} = U_{ac}/I_{bd}$), викликану магнітним полем B :

$$\Delta R_{bdac} = R_{bdac} - R'_{bdac}, \quad (6.17)$$

де R'_{bdac} – опір зразка при накладенні магнітного поля B .

Холлівська рухливість носіїв заряду визначається співвідношенням:

$$\mu_n = \frac{d \Delta R_{bdac}}{B \rho}, \quad (6.18)$$

після чого можна визначити концентрацію вільних носіїв:

$$N = \frac{\mu_n}{\mu} \frac{1}{e \mu_n \rho} = \frac{A}{e \mu_n \rho}. \quad (6.19)$$

При виведенні співвідношень (6.18) і (6.19) передбачалося, що контакти розташовуються точно по периферії і мають точкові розміри. При відхиленні контактів від ідеальності в результат вимірювання вноситься певна похибка, яку можна врахувати коефіцієнтами або усунути, надавши зразку спеціальну форму «конюшиного листа».

6.2.3 Чотиризондовий холлівський метод

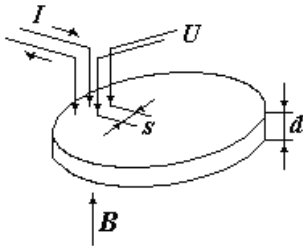


Рисунок 6.5 – Чотиризондовий холлівський метод

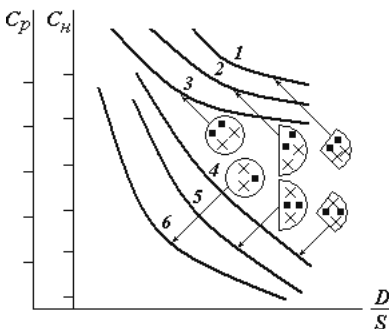


Рисунок 6.6 – Поправочні функції C_n і C_p

Підготовча робота з виготовлення омичних контактів є досить трудомісткою, отже, використання холлівських методів на практиці є проблематичним. Тому для контролю не дуже високоомних пластин і епітаксійних шарів напівпровідникових матеріалів, коли вплив перехідних контактних опорів на похибку вимірювань незначний, запропоновано застосувати для оперативних вимірювань сталюї Холла чотиризондовий метод із розташуванням зондів у вершинах квадрата (рис. 6.5).

Можна показати, що різниця потенціалів на потенціальних зондах, розташованих на зразках із товщиною, набагато меншою

відстані між зондами, підкоряється співвідношенню:

$$U = U_p + U_m + U_n = \frac{\rho I \ln 2}{\pi d} C_p + \frac{\rho I \ln 2}{\pi d} C_p b^2 + \frac{R_n I B}{d} C_n, \quad (6.20)$$

де C_p і C_n – поправочні коефіцієнти; $b = \frac{R_i B}{\rho}$.

Перший доданок U_p є робочою формулою чотиризондового методу з поправкою на крайові ефекти.

Другий доданок U_m відображає дію магнітного поля на холлівські струми, що виникають при замиканні ЕРС Холла периферійною областю зразка.

Третій доданок U_n – ЕРС Холла.

При слабких магнітних полях, коли виконується співвідношення $\mu_x \ll 1$, другим доданком U_m можна знехтувати. Вибором симетрії розташування і схеми вмикання зондів можна досягти того, що повна різниця потенціалів у (6.20) дорівнюватиме тільки одній з складових – U_p чи U_n .

Для зразків круглої і півкруглої форми окреме визначення U_p і U_n проводять, розташовуючи зонди у центрі зразка при орієнтуванні діагоналі зондового квадрата уздовж радіальної лінії симетрії.

При вимірюванні U_n в якості потенціальних використовують зонди, що лежать по діагоналі, перпендикулярній радіальній лінії симетрії.

Поправочні функції C_n показані на рис. 6.6 (криві 4, 5, 6). Схема вмикання зондів при вимірюванні U_p і поправочні функції C_p подані кривими 1, 2, 3.

Отже, вимірюючи незалежно U_n і U_p , можна обчислити питомий опір:

$$\rho = \frac{\pi d U_p}{C_p I \ln 2} \quad (6.21)$$

і сталу Холла:

$$R_n = \frac{d U_n}{C_n B I}. \quad (6.22)$$

6.2.4 Порядок виконання роботи

а. Ознайомитися з основними теоретичними положеннями і методами вимірювання ефекту Холла.

б. Одержати зразки і підготувати їх до проведення вимірювань.

в. Вимірювання провести на лабораторному стенді СФП-5М.

Для цього необхідно:

- зразкотримач №1 із зразком під'єднати до роз'єму «Образец 1» стенда і розмістити між полюсними наконечниками електромагніту;
- до пари клем «V» стенда під'єднати мілівольтметр;
- перемикач стенда «П2 Род работы» встановити у положення «Вykl.», а перемикач «П3» – «Vхол»;
- показати вимірювальну схему для перевірки викладачу або лаборанту;
- змінюючи струм через зразок за допомогою регуляторів «Ток образца» «Грубо» і «Плавно» і перемикача «П1» від мінімального значення до максимально можливого, зняти показання з мілівольтметра паразитної ЕРС Холла за різних полярностей струму і напруги (тумблери «Полярность тока» і «Полярность напряжения»);
- увімкнути електромагніт тумблером «Магнит». Встановити значення струму через магніт за допомогою регулятора «Ток магнита». Провести вимірювання за п. Д) додатково змінюючи напрям магнітного поля. Провести вимірювання для трьох-чотирьох значень струму через магніт.

г. Визначити ЕРС Холла за (6.14). Магнітну індукцію B визначити за калібрувальним графіком залежно від значень струму через електромагніт.

д. Розрахувати сталу Холла за (6.11). ($d = 4$ мм).

е. Побудувати графіки залежності $U_x = f(B_z)$ для різних значень I_x . З графіків за тангенсом кута нахилу прямолінійної ділянки знайти сталу Холла.

ж. Визначити знак носіїв заряду та їх концентрацію за (6.12).

Звіт повинен містити:

– стислі теоретичні положення щодо ефекту Холла і методів його вимірювання;

- схему проведення вимірювань;
- таблицю експериментальних даних;
- результати розрахунку сталої Холла і концентрації носіїв заряду;
- висновки з проведеної роботи.

6.3 Контрольні питання

- а. Фізична суть ефекту Холла.
- б. Супутні гальванотермомагнітні ефекти Еттінгсхаузена, Нернста, Рігі-Ледюка.
- в. Метод чотирьох вимірювань для усунення побічних ефектів при вимірюванні ефекту Холла.
- г. Класичний метод вимірювання ефекту Холла.
- д. Метод Ван-дер-Пау при вимірюванні ефекту Холла.
- е. Чотиризондовий метод вимірювання ефекту Холла.
- ж. Зв'язок сталої Холла з концентрацією носіїв заряду.
- з. Джерела похибок при вимірюванні ефекту Холла.

7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 ВИЗНАЧЕННЯ П'ЄЗОМОДУЛЯ ПОЛЯРИЗОВАНОЇ КЕРАМІКИ

Мета роботи: вивчити прямий і зворотний п'єзо ефекти, а також резонансний метод визначення п'єзомодулів та експериментально визначити п'єзомодуль поляризованої кераміки.

Прилади та обладнання: генератор, частотомір, цифровий вольтметр.

7.1 Основні теоретичні відомості

Існує цілий ряд твердих кристалічних діелектриків, у яких при розтягуванні і стискуванні в певних напрямках виникає електрична поляризація. Саме виникнення електричних зарядів на поверхнях кристала при дії механічної напруги називається *прямим п'єзоелектричним ефектом*. Це явище було виявлено в 1880 р. П'єром і Жаком Кюрі. Такий ефект спостерігається у всіх сегнетоелектриків та в ряді інших (за кристалографічними ознаками) діелектриків (кристали кварцу, турмаліну, цинкової обманки, хлорату натрію, винної кислоти, тростинного цукру, сегнетової солі, титанату барію). П'єзоелектричні властивості можуть мати тільки іонні кристали. Якщо кристалічні ґратки позитивних і негативних іонів, з яких побудовані такі кристали, під дією зовнішніх сил деформуються по-різному, то в протилежних місцях на поверхні кристала виступають електричні заряди різних знаків.

В 1881 р. було теоретично передбачено, а потім і експериментально виявлено братами Кюрі наявність у тих же речовин зворотного явища – появи механічної деформації при дії на кристал електричного поля. Це явище носить назву *зворотного п'єзо ефекту*.

Природа п'єзоелектричного ефекту пов'язана із структурою кристала і його виникнення є наслідком появи чи зміни дипольних моментів. При однорідній деформації п'єзоелектричний ефект спостерігається за наявності в кристалі однієї або декількох полярних осей (напрямів). Під *полярною віссю* кристала розуміють будь-яку пряму, проведену через кристал, обидва кінці якої нерівноцінні, тобто невзаємозамінні. Іншими словами, при повороті кристала на 180° навколо будь-якої осі, перпендикулярної до полярної, він не

суміщається сам з собою.

Взагалі, для існування п'єзоелектричного ефекту при однорідній деформації потрібна відсутність у кристала центру симетрії. Дійсно, якби недеформований кристал мав центр симетрії, то останній зберігся б і при однорідній деформації кристала. З іншого боку, в електрично поляризованому кристалі є особливий напрям, а саме напрям вектору поляризації. За наявності такого кристал не може мати центру симетрії. Таке протиріччя і доводить твердження про необхідність відсутності центру симетрії.

З 32 кристалічних класів не має центру симетрії 21 клас. У одного з них, проте, поєднання інших елементів симетрії робить п'єзоелектричний ефект також неможливим. Отже, п'єзоелектричні властивості спостерігаються у 20 кристалічних класів.

Розглянемо п'єзоелектричний ефект на прикладі кристала кварцу – найважливішого п'єзоелектричного кристала, що знайшов широке науково-технічне застосування завдяки своїм чудовим механічним і електричним властивостям. При звичайних температурах і тисках кварц зустрічається в так званій α -модифікації. Кристал α -кварцу (рис. 7.1, рис. 7.2, рис. 7.3, а) відноситься до тригональної системи і має три осі симетрії другого порядку, які направлені під кутом 120° одна до одної і є *полярними* (кожна з них з'єднує протилежні, але нерівнозначні ребра шестигранної призми) та позначені через: X – *електрична ось* (певний напрям у кристалі, вздовж якого виникає постійна поляризація), Y – *механічна ось*, Z – *оптична ось* (поворот кристала навколо цієї осі на будь-який кут ніяк не впливає на поширення світла в кристалі).

Появу п'єзоефекта можна пояснити, розглядаючи модель кристала кварцу. В деякому наближенні можна уявити, що іони кремнію та кисню в кристалічній ґратці кварцу розміщені так, як це зображено на рис. 7.3, а, де великими кружками позначені позитивні іони кремнію Si^{4+} , а маленькими – негативні іони кисню O^{2-} .

У початковому стані без додавання механічної напруги (рис. 7.3, а) центри ваги позитивних і негативних іонів співпадають, тому в цілому комірка електрично нейтральна і не має дипольного моменту. Якщо уздовж осі X прикладена зовнішня сила F_x , кристалічна ґратка деформується (рис. 7.3, б), відбувається перерозподіл зарядів і на поверхнях A і B кристала з'являються

поляризаційні заряди. Це явище називається *поздовжнім* п'єзо ефектом.

При прикладанні сили F_Y уздовж осі Y (рис. 7.3, в) на поверхнях A і B кристала з'являються поляризаційні заряди протилежних знаків. Це явище називається *поперечним* п'єзо ефектом.

При прикладанні сили уздовж осі Z або гідростатичному стискуванню кристала поляризаційні заряди не утворюються.

Поляризаційний заряд пропорційний силі, прикладеній, наприклад, уздовж осі X :

$$Q = d \cdot F_X, \quad (7.1)$$

де d – коефіцієнт пропорційності, п'єзодуль, $[Кл/Н]$.

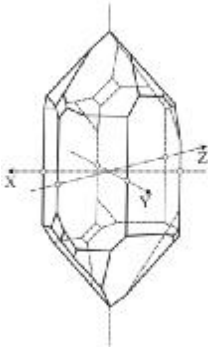


Рисунок 7.1 – Кристал кварцу SiO_2



Рисунок 7.2 – Зовнішній вигляд кварцових кристалів

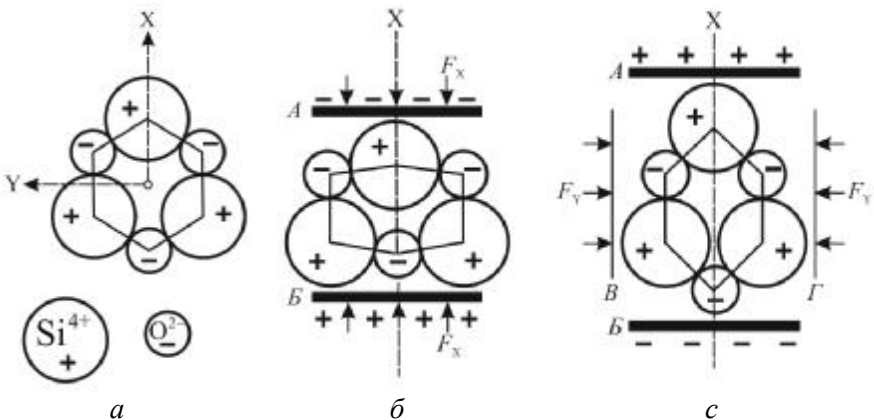


Рисунок 7.3 – Модель кристалічної ґратки кварцу

При прямому п'єзоєфекті величина густини заряду, що виникає на поверхні кристала (і пропорційного їй вектора поляризації), лінійно залежить від величини механічної деформації (а в області пружних деформацій і від величини механічної напруги):

$$P = \frac{Q}{S} = d \cdot \sigma, \quad (7.2)$$

де P – вектор поляризації;

σ – механічна напруга;

d – п'єзомодуль – коефіцієнт пропорційності між виникаючою поляризацією і прикладеною механічною напругою.

При зворотному п'єзоєфекті можна записати:

$$x = d \cdot E, \quad (7.3)$$

де x – п'єзодеформація;

E – напруженість електричного поля.

Величини п'єзомодулів однотипних прямого і зворотного п'єзоєфектів, як витікає з термодинамічного розгляду, співпадають. Оскільки поляризація є вектор (3 компоненти), а механічна напруга є тензор другого рангу (9 компонент), то п'єзомодуль як коефіцієнт пропорційності між вектором і тензором другого рангу мусить бути тензором третього рангу і складатися в самому загальному випадку з 18 незалежних компонент. Врахування симетрії кристалів призводить до того, що число незалежних компонент тензора п'єзомодуля зменшується. Так, у сегнетоелектриків типу титанату барію налічується 3 п'єзомодулі (d_{11} , d_{13} , d_{33}).

Найбільш сильно п'єзоєфекти виражені в сегнетоелектриках.

Виміряти п'єзомодуль можна, використовуючи як прямий, так і зворотний п'єзоєфект. При використанні прямого п'єзоєфекту до зразка прикладають одноосну механічну напругу і за допомогою балістичного гальванометра (чи електронного вольтметра) вимірюють п'єзозаряд. П'єзомодуль d визначається з формули для прямого поздовжнього п'єзоєфекту.

Для вимірювання п'єзомодуля з використанням зворотного п'єзоєфекту найчастіше застосовують динамічний метод резонансу – антирезонансу. Цей метод використовується і в даній роботі.

Принципова схема для визначення модулів у динамічному режимі наведена на рис. 7.4.

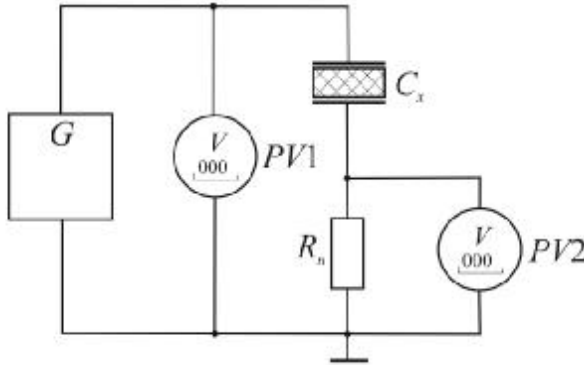


Рисунок 7.4 – Схема установки для визначення п'єзомодуля

До п'єзозразка прикладається змінна електрична напруга від генератора з регульованою частотою G , внаслідок чого у зразку збуджуються механічні коливання.

В електричному ланцюгу п'єзоелектричний зразок можна представити у вигляді еквівалентної схеми, представленій на рис. 7.5.

Коли частота зовнішньої напруги наближається до власної частоти коливань зразка, в ланцюгу мають місце резонансні явища. Оскільки в еквівалентній схемі є послідовна C і паралельна C_0 ємності, то можна спостерігати як послідовний, так і паралельний резонанс.

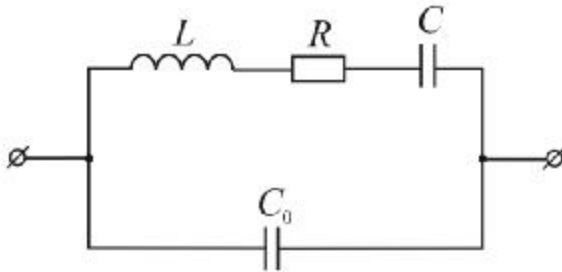


Рисунок 7.5 – Еквівалентна схема зразка

При послідовному резонансі сила струму в ланцюгу зростає і досягає максимального значення при частоті f_r (рис. 7.6). При подальшому збільшенні частоти струм падає і при частоті f_a (паралельний резонанс) досягає мінімального значення. Струм

визначають за величиною падіння напруги на невеличкому опорі R_i , що включений послідовно зі зразком п'єзоелектрика. Точне значення частоти вимірюють за допомогою частотоміра.

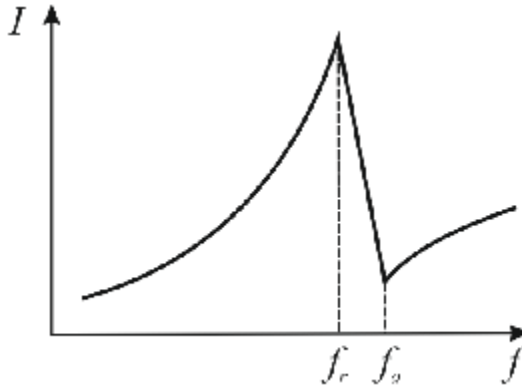


Рисунок 7.6 – Залежність сили струму в п'єзоелектрику від частоти

Якщо резонансні частоти п'єзозразка лежать за межами робочого діапазону частот вольтметрів, то замість останніх може бути використаний двопробеневий осцилограф.

Як зразок для вимірювання динамічного п'єзомодуля d_{31} в роботі використовують брусок чи диск сегнетоелектричної кераміки, попередньо поляризованої. Поляризація здійснюється витримуванням зразка під високою напругою (декілька кіловольт) на протязі 1÷2 годин. Формула для розрахунку п'єзомодуля в цьому випадку має вигляд:

$$d_{31} = 3,33 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{\pi \cdot \Delta f \cdot \epsilon}{64 \cdot \rho \cdot l^2 \cdot f_r^3}}, \quad \left[\frac{\text{м}}{\text{В/м}} \right] \quad (7.4)$$

де l – довжина зразка;

ρ – питома вага кераміки, прийняти $\rho = 7\,000 \text{ кг/м}^3$;

f_r – частота резонансу;

Δf – різниця між частотами резонансу і антирезонансу;

ϵ – діелектрична проникність кераміки (визначається експериментально).

7.2 Порядок виконання роботи

- а. Зібрати схему для вимірювання (рис.7.4).
- б. Включити генератор, частотомір, цифровий вольтметр (або осцилограф).
- в. Встановити на виході генератора потрібну напругу (за вказівкою викладача) і підтримувати її незмінною при вимірюванні.
- г. Змінюючи частоту генератора, зняти залежність напруги на опорі навантаження від частоти (особливо ретельно в області резонансу – антирезонансу). Частоту визначити за шкалою генератора або за допомогою зовнішнього частотоміра.
- д. Побудувати графік залежності струму зразка від частоти.
- е. За допомогою формули (7.4) визначити п'єзомодуль зразка досліджуваної кераміки.

7.3 Контрольні питання

- а. Що таке прямий і зворотний п'єзоєфект? В яких речовинах має місце п'єзоєфект?
- б. Написати рівняння прямого і зворотного п'єзоєфекту.
- в. Що таке п'єзомодуль?
- г. Яка ось називається полярною?
- д. Який п'єзоєфект називаються поздовжнім та поперечним?
- е. Які існують методи вимірювання п'єзомодуля?
- ж. Як практично можуть бути використані прямий та зворотній п'єзоєфекти?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» / Відомості Верховної Ради (ВВР), 2014, № 30, ст.1008. (Із змінами, внесеними згідно із Законом № 124-VIII від 15.01.2015, ВВР, 2015, № 14, ст.96).
2. Точність (правильність) і прецизійність методів і результатів вимірювання. Частина 1. Основні положення та визначення: ДСТУ ГОСТ ІСО 5725-1:2005 (ГОСТ ІСО 5725-1:2003, IDT). - [Чинний від 2005-30-12]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 29 с. - (Національний стандарт України).
3. Величко О. М. Основи стандартизації та сертифікації : підручник / О. М. Величко, В. Ю. Кучерук, Т. Б. Гордієнко, В. М. Севастьянов. – Київ, 2012. – 362 с.
4. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник: підручник. / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 522 с.
5. Поліщук Є. С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г.Бойко: Львів: Вид-во “Бескид Біт”, 2003. – 544 с.
6. Петльованій Є. О. Методи та засоби інформаційно-вимірювальної техніки, випробувань і контролю: підручник. Дніпро: Свідлер А.Л., 2018. – 191 с.
7. Чорноіваненко К. О. Метрологія, забезпечення єдності вимірювань та еталони одиниць фізичних величин : підручник. / К. О. Чорноіваненко, А.М. Должанський, Є.О. Петльованій, О.А. Бондаренко, І.М. Ломов Дніпро: Свідлер А.Л., 2018. – 164 с.
8. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология: учеб. для вузов. Ч. 1: Общая теория измерений. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
9. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 2002. – 348 с.
10. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология: учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2002. – 407 с.
11. Павлов. Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. - М.: Высш. школа, 1985, С. 4-35.
12. Шалимова К.В. Физика полупроводников. - М.: Энергия, 1976.

13. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых структур. - М.: Радио и связь, 1985, С. 62-76.

14. Попов В.С. Электротехнические измерения. М.: Энергия. 1974. Гл.6.

15. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 2. Электричество и магнетизм. М.: Наука. 1998.

16. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1983. Т.3.

17. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977.

18. Метрологія та вимірювальна техніка / Є.С. Поліщук та інш. – Львів: Бескид Бід, 2003. – 544 с.

19. Снежной Г. В. Автоматизированная установка для исследования релаксационных процессов и ВАХ в диэлектриках и полупроводниках / Г. В. Снежной, А. В. Кондратьев // Радиоэлектроника, информатика, управление.-1999. – №2. – С.44-46.

20. Сніжною Г. В. Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стопів / Г. В. Сніжною, Є. Л. Жавжаров // збірник наукових праць "Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування". – 2012. – № 49. – С. 136-141.

21. Работа з осцилографом [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.electroclub.info/article/oscillograf.htm>

22. Вимір опору по постійному струму [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://electricalschool.info/main/naladka/370-kak-izmerit-jelektricheskoe.html>

23. Вимірювальний міст Уітстона та його застосування [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://electricalschool.info/spravochnik/izmeren/2041-izmeritelnyy-most-uitstona-i-ego-ispolzovanie.html>

24. Вимірювання параметрів конденсаторів [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.html