

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

«ФІЗИКА»

ЧАСТИНА 2

(Електрика та магнетизм)

для студентів усіх форм навчання

напрямів 6.040301 «Прикладна математика», 6.040302 «Інформатика», 6.040303 «Системний аналіз», 6.050101 «Комп'ютерні науки», 6.050102 «Комп'ютерна інженерія», 6.050103 «Програмна інженерія», 6.050201 «Системна інженерія», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 «Електронні пристрої та системи», 6.050803 «Акустотехніка», 6.050901 «Радіотехніка», 6.050902 «Радіоелектронні апарати», 6.050903 «Телекомунікації», 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології», 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація», 6.051004 «Опtotехніка», 6.051402 «Біомедична інженерія», 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа», 6.170101 «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», 6.170102 «Системи технічного захисту інформації», 6.170103 «Управління інформаційною безпекою»

Електронне видання

ЗАТВЕРДЖЕНО

кафедрою фізики.

Протокол № 6 від 30.12.2013 р.

ХАРКІВ 2014

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика» (Частина 2, «Механіка та молекулярна фізика») для студентів усіх форм навчання напрямів 6.040301 «Прикладна математика», 6.040302 «Інформатика», 6.040303 «Системний аналіз», 6.050101 «Комп'ютерні науки», 6.050102 «Комп'ютерна інженерія», 6.050103 «Програмна інженерія», 6.050201 «Системна інженерія», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 «Електронні пристрої та системи», 6.050803 «Акустотехніка», 6.050901 «Радіотехніка», 6.050902 «Радіоелектронні апарати», 6.050903 «Телекомунікації», 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології», 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація», 6.051004 «Опtotехніка», 6.051402 «Біомедична інженерія», 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа», 6.170101 «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», 6.170102 «Системи технічного захисту інформації», 6.170103 «Управління інформаційною безпекою» [Електронне видання] / Упоряд.: Коваленко О. М., Лазоренко О. В., Орел Р. П., Мешков С. М. – Харків: ХНУРЕ, 2014. – 96 с.

Упорядники: О. М. Коваленко,
О. В. Лазоренко,
Р. П. Орел,
С. М. Мешков.

Рецензент: В. О. Стороженко, докт. техн. наук, проф. каф. фізики.

ЗМІСТ

Загальні положення	4
1 Ознайомлення з приладами для вимірювання електричних величин	6
2 Осцилографування фізичних процесів	13
3 Дослідження електричного поля	19
4 Визначення ємності конденсатора	23
5 Визначення електричних властивостей сегнетоелектриків.....	27
6 Вимірювання опорів методом мостової схеми	32
7 Дослідження процесів зарядження та розрядження конденсаторів	35
8 Вивчення магнітного поля короткого соленоїда та системи двох соленоїдів	40
9 Вивчення електромагнітних явищ на основі довгого соленоїда.....	44
10 Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона	49
11 Визначення відношення заряду електрона до його маси методом фокусування пучка електронів подовжнім магнітним полем	54
12 Дослідження явища самоіндукції.....	57
13 Дослідження явища взаємоіндукції	62
14 Визначення магнітних властивостей феромагнетиків	68
15 Дослідження повного послідовного кола змінного струму.....	75
16 Дослідження струму зміщення	79
Додаток А. Осцилограф універсальний двоканальний С1-77.....	84
Додаток Б. Зразок оформлення звіту	91
Рекомендована література	95

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Дане видання містить методичні вказівки до виконання робіт фізичного практикуму, створеного на кафедрі фізики університету. Воно призначене для студентів, що виконують лабораторні роботи з електромагнетизму (друга частина курсу фізики).

Мета лабораторного практикуму:

- наочне підтвердження фізичних законів;
- набуття елементарних навичок наукового дослідження;
- ознайомлення студентів із сучасною вимірювальною апаратурою;
- освоєння студентами методів обробки і оцінки достовірності експериментальних результатів;
- забезпечення зв'язку практикуму з лекційним курсом і практичними заняттями з фізики.

Виконання лабораторного завдання складається із попередньої підготовки, проведення лабораторного експерименту і складання звіту про результати роботи.

Лабораторні роботи виконуються відповідно до семестрового графіка, який знаходиться на стенді в лабораторії, тому кожен студент має можливість підготуватися до них заздалегідь.

Підготовка до роботи має проводитися в наступній послідовності. Перш за все, потрібно ознайомитися з описом роботи і вивчити її теоретичний вступ, звернувши особливу увагу на виведення розрахункових формул. Для більш повного з'ясування деяких питань теорії слід звернутися до рекомендованої літератури, а також до конспекту лекцій.

Готовність кожного студента до виконання роботи перевіряється викладачем перед початком роботи опитуванням (письмово чи усно). Питання для опитування вибираються викладачем з такого переліку:

- назва та мета роботи;
- порядок виконання роботи;
- прилади і обладнання, що використовуються в лабораторній роботі;
- схема досліду;
- фізичні величини, що вивчаються та досліджуються в даній лабораторній роботі, їх розмірність;
- загальний вигляд законів та залежностей, що планується використати в ході виконання лабораторної роботи;
- прямі вимірювання, які проводяться в даній лабораторній роботі;
- непрямі вимірювання, які проводяться в даній лабораторній роботі;
- формули для розрахунків похибок прямих та непрямих вимірювань.

Під час роботи в лабораторії мають точно виконуватися правила внутрішнього розпорядку та техніки безпеки, основні з яких полягають в наступному:

- складання і розбирання схем, під'єднання додаткових приладів, їх часткове від'єднання і заміну робити лише при вимкненому джерелі живлення;

- під'єднувати схему до джерела електричного струму лише після перевірки схеми викладачем;
- у випадку будь-яких перез'єднань перед підключенням до джерела струму схему перевіряє викладач;
- забороняється залишати без нагляду схеми і прилади під напругою;
- у випадку виходу із ладу приладу відразу відключити схему і повідомити про це викладача.

Перед початком роботи необхідно ознайомитися з короткими інструкціями до приладів, які використовуються, наведеними в дод. А.

Проведення лабораторного експерименту виконується відповідно до вказівок розділу „Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання”. Для отримання правильних результатів дослідження рекомендується всі вимірювання проводити не менше трьох разів. Отримані результати заносять до таблиці.

Звіт з кожної лабораторної роботи має містити назву та мету роботи, схему (рисунок) лабораторної установки, результати вимірювань (у вигляді таблиць), робочу формулу та результати розрахунків у вигляді графіків (або таблиць), формулу для розрахунку похибок та результат цього розрахунку, висновки з результатів, що одержані в роботі. Зразок оформлення звіту наведений у додатку Б.

Захист оформлених звітів проводять у вигляді здачі циклу лабораторних робіт (3–4 роботи) на підсумковому занятті згідно з графіком.

Для здачі циклу допускають студентів, які виконали лабораторні роботи і оформили звіт. Захист робіт проводиться у формі опитування по змісту виконаних лабораторних робіт. Перелік контрольних запитань та завдань наведений у кінці опису кожної роботи і у методичних вказівках [1].

1 ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ПРИЛАДАМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

1.1 Мета роботи: вивчити найважливіші елементи електричного кола і деяких вимірювальних приладів (стрілочних і цифрових). Метою експериментальної частини роботи є опанування способів вимірювання сили струму і напруги, градуювання амперметра та вольтметра і знаходження похибок вимірювання.

1.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

1.2.1 Джерела струму

Джерела струму – це перетворювачі різних видів енергії неелектричної природи (хімічної, фізичної) в електричну. Джерела струму розрізняються за природою сторонніх сил. Головні параметри джерел струму – електрорушійна сила (ЕРС), внутрішній опір, максимальна сила струму, яка забезпечується джерелом. Існують джерела постійного і змінного струмів. У лабораторних роботах з електромагнетизму використовуються спеціальні блоки живлення, які базуються на перетворенні змінної напруги в постійну або в змінну низьковольтну напругу. Клеми цих джерел розташовані ліворуч та праворуч панелі столу та позначаються: $-U$ для постійного струму, $\sim U$ – для змінного струму. Вмикаються джерела живлення тумблером, що розташований в нижній частині краю панелі.

1.2.2 Реостати та потенціометри

Для зміни режиму роботи електричного кола широко використовуються змінні резистори. Змінний резистор – це реостат з контактом, що ковзає, який дозволяє вмикати до кола частину резистора RP (рис.1.1). Основні характеристики такого резистора – повний опір та максимальна розсіювана потужність (або максимально припустимий струм – для дротяних реостатів) вказуються на корпусі резистора.

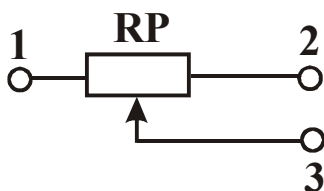


Рисунок 1.1

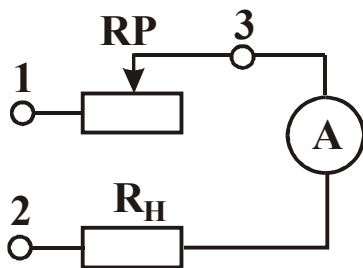


Рисунок 1.2

Існують два способи вмикання змінного резистора в електричне коло.

Для регулювання струму в колі резистор RP вмикається реостатом (рис.1.2).

При цьому використовуються тільки дві клеми реостата (1 та 3). Перед вмиканням схеми з реостатом, розташування рухомого контакту має відповідати повному максимальному значенню опору ($R_{13}=R$).

Для регулювання напруги в електричному колі резистор RP вмикається потенціометром (рис.1.3). При цьому використовуються всі три клеми реостата.

Напруга U_2 , яка знімається з частини резистора 1-3, пов'язана з прикладеною напругою U_1 співвідношенням

$$U_2 = \frac{R_{13}}{R} U_1, \quad (1.1)$$

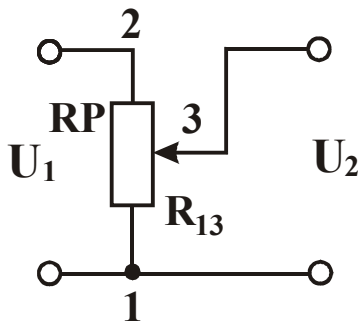


Рисунок 1.3

де R – повний опір резистора RP .

Резистор може бути використаний як потенціометр, якщо виконується умова: $R_H \gg R \gg r$, де R_H – опір навантаження, r – внутрішній опір джерела струму.

Перед підключенням схеми, яка містить потенціометри, до джерела струму повзунок потенціометра має знаходитися в нульовому положенні ($R_{13}=0$).

1.2.3 Електровимірювальні прилади

Вимірювання полягає в порівнянні вимірюваної фізичної величини з певним її значенням, прийнятим за одиницю. Електричні вимірювання проводяться двома способами:

- використовуючи прилади порівняння (компенсаційні та мостові прилади), в яких відбувається порівняння електричної величини з її еталоном;
- використовуючи прилади безпосередньої оцінки, показання яких дає чисельне значення вимірюваної величини.

У даній роботі використовуються прилади першого типу. Їх можна розділити на електромеханічні та електронні. За способом надання кінцевого результату електровимірювальні прилади розподіляються на аналогові та цифрові.

Показання аналогових приладів є безперервними функціями змін вимірюваної величини. В аналогових (наприклад, стрілочних) приладах безперервна вимірювана величина викликає безперервне відхилення стрілки по шкалі, тобто величина відхилення стрілки є відповідною вимірюваній величині.

У цифрових приладах безперервна вимірювана величина автоматично перетворюється в дискретну і результат вимірювання видається в цифровому вигляді. Слід враховувати, що електромеханічні прилади поступово замінюються електронними, а аналогові – цифровими.

Будь-який вимірювальний механізм електровимірювального приладу є перетворювачем вхідної електричної величини в інформаційний сигнал (наприклад, кількість поділок відхилення стрілки по градуйованій шкалі в електромеханічних приладах тощо).

Для здійснення перетворення використовуються різноманітні фізичні явища. Так, в електровимірювальних приладах магнітоелектричної системи використовується взаємодія магнітного поля постійного магніту з котушкою, по якій протікає вимірюваний струм. При цьому виникає обертальний момент, прикладений до котушки, пропорційний силі струму, що проходить по ній: $M_I \sim I$. Стрілка, яка тісно зв'язана з рухомою котушкою, повертається разом з нею. Але

перетворення не обмежується лише цією взаємодією, бо при будь-якому струмі при відсутності сил опору поворот котушки здійснювався б на максимально можливий кут. Для усунення цього вісь котушки зв'язана з спіральними пружинами, які створюють протидіючий момент сил M_2 , пропорційний куту закручування $\alpha \sim M_2$. Рух стрілки по шкалі відбувається до того положення, поки момент сил M_2 не врівноважить M_1

$$M_2 = M_1. \quad (1.2)$$

Завдяки цьому досягається однозначність відповідності показань приладу і вхідної величини. Рівновага стрілки визначається умовою (1.2).

Електровимірвальні прилади інших систем базуються на інших явищах. Дія приладів електромагнітної системи, наприклад, ґрунтується на взаємодії магнітного поля котушки, по якій протікає вимірюваний струм, з рухомим залізним осердям.

До головних характеристик електровимірвальних приладів належать: рівняння перетворення (градувальна характеристика, відображена шкалою приладу), чутливість, межа чутливості (ціна поділки), похибка показань приладу (клас точності). Рівняння перетворення $y = F(x)$ – функціональна залежність між вихідним сигналом y і вхідною величиною x . У стрілочних приладах – це залежність поділки шкали n від значення вимірюваної величини I :

$$n = f(I). \quad (1.3)$$

Рівняння (1.3), яке поєднує n та I , залежить від принципу дії і конструктивних особливостей приладу. Ідеальною функцією перетворення є лінійна.

Чутливість S характеризує здатність приладу реагувати на зміни вхідного сигналу, знаходиться із рівняння перетворення і є у випадку з стрілочними приладами відношенням числа поділок шкали Δn до зміни вимірюваної величини ΔI , що викликала це переміщення:

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta I}. \quad (1.4)$$

Фізичний смисл чутливості – це кількість поділок шкали, що приходиться на одиницю вимірюваної величини.

При лінійному перетворенні: $S = \frac{n}{I}$.

Межа чутливості – така зміна вхідної величини, що викликає найменшу зміну вихідного сигналу, яку можна визначити за допомогою даного приладу. В стрілочних приладах мірою межі чутливості є ціна поділки, що дорівнює значенню вимірюваної величини, яке викликає відхилення покажчика на одну поділку шкали. В приладах з лінійним рівнянням перетворення ціна поділки складає

$$C = \frac{x}{y} = \frac{I}{n} = \frac{1}{S}. \quad (1.5)$$

Фізичний зміст ціни поділки – це кількість одиниць вимірюваної величини, яка приходиться на одну поділку шкали вимірювального приладу.

Будь-яке вимірювання проводиться з деякою помилкою. Для стрілочних приладів існують помилки двох типів:

– помилки, пов'язані з конструкцією приладу, що визначаються класом точності приладу ε_n . Клас точності приладу визначається як відносна похибка,

виражена у відсотках: $\varepsilon = \frac{\Delta a_1}{a_{np}} 100\%$, звідки і знаходиться абсолютна похибка:

$$\Delta a_1 = \frac{\varepsilon_n}{100} \cdot a_{np},$$

де a_{np} – верхня межа вибраного діапазону (шкали приладу).

– помилки, пов'язані з точністю відліку положення стрілки на шкалі, яке визначають з точністю до половини ціни поділки шкали Δa_2 .

Таким чином, абсолютна похибка вимірювань при врахуванні двох типів помилок складає величину

$$\Delta a = \Delta a_1 + \Delta a_2.$$

Для того, щоб правильно зробити відлік вимірюваної величини за допомогою стрілочного приладу, необхідно:

- 1) перевірити нульову позицію стрілки приладу і, якщо це не обхідно, за допомогою регулювального гвинта встановити стрілку на нуль;
- 2) для багатомезжних приладів вибрати потрібну для відліку межу виміру і режим постійного чи змінного струму;
- 3) зробити відлік, розміщуючи око по нормалі до шкали, а у випадку дзеркальної шкали – суміщуючи стрілку приладу з її зображенням на дзеркалі.

Основні характеристики та інструкції з використання цифрових приладів наведено в дод.А.

1.2.4 Шунти, додаткові опори та їх застосування

Шунтом називається опір, приєднаний паралельно амперметру (рис. 1.4),

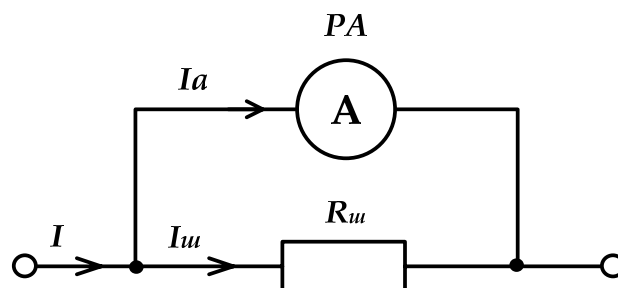


Рисунок 1.4

внаслідок чого через амперметр проходить лише частина вимірюваного струму. Шунти використовуються для розширення меж вимірювання амперметрів. Якщо необхідно виміряти амперметром струм у k разів більший максимально можливого для цього приладу, то необхідно увімкнути шунт з опором $R_{ш}$, який задовольняє рівності

$$R_{ш} = \frac{R_a}{k-1}, \quad (1.7)$$

де $k = I/I_a$ – коефіцієнт шунтування;

I – сила струму в колі;

I_a – сила струму, що проходить через амперметр;

R_a – опір амперметра.

Додатковими опорами називаються пристрої, які використовуються для розширення меж вимірювання вольтметрів. Вони являють собою визначені опори R_∂ , які вмикаються послідовно з вольтметром (рис. 1.5). Таке вмикання R_∂ перетворює напругу U в силу струму (відповідно до закону Ома), а силу струму – в поділці стрілочного приладу $U \rightarrow I \rightarrow n$.

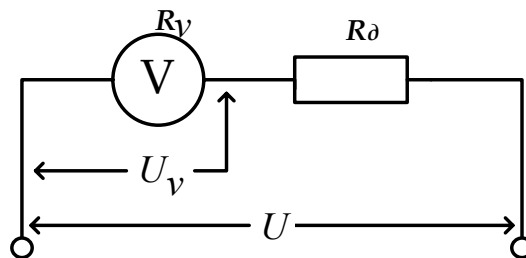


Рисунок 1.5

Для розширення меж вимірювання в k' раз додатковий резистор R_∂ повинен мати опір

$$R_\partial = R_v(k' - 1),$$

де $k' = \frac{U}{U_v} = \frac{R}{R_v}$;

R_v – опір вольтметра;

U_v – падіння напруги на вольтметрі;

R – спільний опір. $R = R_v + R_\partial$.

1.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з мікроамперметра, цифрового вольтметра, подільника напруги $R_1 + R'$, набору опорів $R_2, R_{ш}$, діода Д-226.

1.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1.4.1 Ознайомлення з електровимірювальними приладами та іншими елементами електричних кіл

Вивчити прилади, які знаходяться на робочому місці, і записати головні характеристики приладів та інших елементів електричних кіл.

1.4.2 Шунтування і градування амперметра на постійному струмі

Скласти схему (рис. 1.6). Послідовно з навантаженням R_2 увімкнути досліджуванний прилад P і зразковий PA . Схему підключають до джерела, клема якого позначені на панелі $=U$.

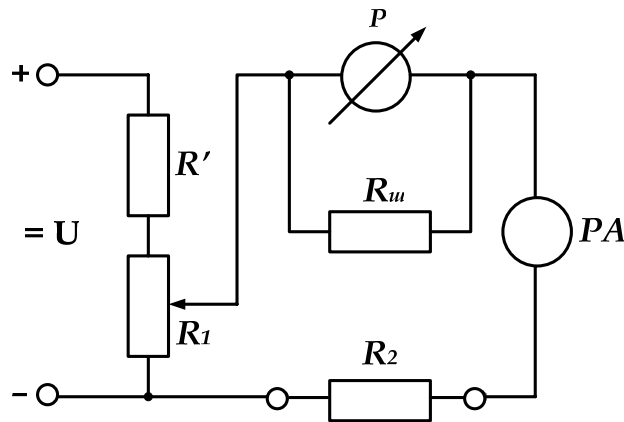


Рисунок 1.6

Зняти залежність кількості поділок шкали від сили струму $n = f(I)$. Побудувати графік $n(I)$. Нанести на графіку похибки вимірювань. Визначити ціну поділки і чутливість приладу. Виміряти за допомогою приладу В7-21А опори R_{sh} , R_2 і $R_1 + R'$.

Визначити коефіцієнт шунтування k і, знаючи опір шунта, обчислити внутрішній опір амперметра R_a .

1.4.3 Градування вольтметра за постійною напругою

Як вольтметр використовується той самий стрілочний прилад, що й при виконанні попереднього завдання. До нього підключається додатковий резистор $R_\partial = R_2$.

Скласти схему, рис 1.7.

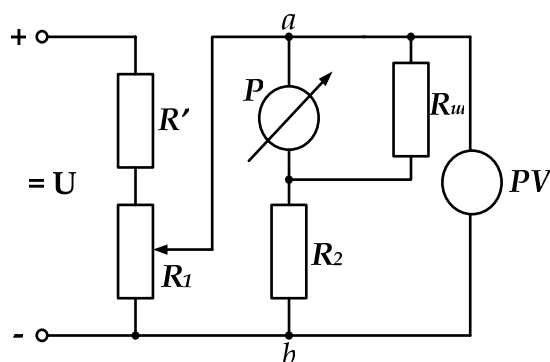


Рисунок 1.7

Зняти залежність кількості поділок приладу n від напруги $n=f(U)$ між точками a та b . Побудувати градувальний графік. Визначити ціну поділки і чутливість приладу.

1.4.4 Градування вольтметра за змінною напругою

Для використання приладу постійного струму в колах змінного струму послідовно зі стрілочним приладом P на ділянці кола ab (рис. 1.7) вмикається діод VD , який перетворює змінний струм в постійний. Величина струму, що протікає через прилад в цьому випадку, пропорційна прикладеній змінній напрузі.

Для градування скласти схему (рис. 1.8). Прилад PV – зразковий.

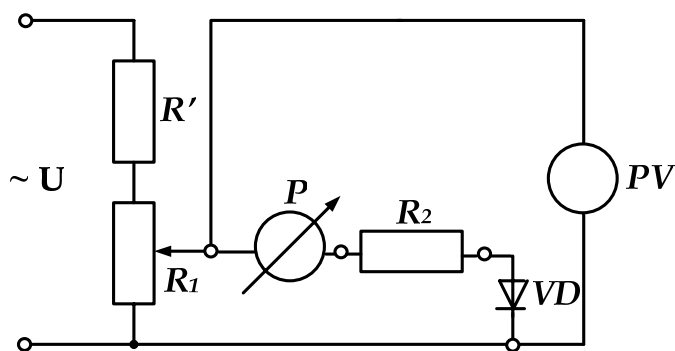


Рисунок 1.8

Зняти залежність $n(U)$ і побудувати градувальний графік. Визначити ціну поділки і чутливість приладу.

1.4.5 Визначення сили змінного струму

За допомогою зразкового приладу PA визначити силу змінного струму, що протікає через подільник $R' + R_1$. Для цього ввімкнути прилад PA (В7-21А) послідовно з $R' + R_1$ і джерелом живлення $\sim U$. Визначити похибку вимірюваної величини.

1.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірів у вигляді таблиць, графіки залежностей графік $n(I)$, $n(U)$, стислі висновки.

1.6 Контрольні запитання і завдання

1. В чому полягає процес вимірювання фізичної величини?
2. Які призначення і способи вмикання змінного опору в електричне коло?

3. Чи є можливість виміряти силу струму в 2А за допомогою використаного в роботі стрілочного приладу? Якщо є, то які?
4. Що означає клас точності електровимірювального приладу?
5. Як визначити абсолютну похибку вимірювання стрілочного приладу? Цифрового приладу ?
6. Які фізичні явища використовуються для перетворення сили струму в момент сили, моменту сили в переміщення стрілки, напруги в силу струму?
7. Що таке чутливість і ціна поділки приладу?
8. Які головні характеристики електровимірювальних приладів?
9. Які принципи дії приладів магнітоелектричної і електромагнітної систем?
10. Поясніть зміст умовних позначень на стрілочному приладі, що використовується для вимірювань?

2 ОСЦИЛОГРАФУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1 Мета роботи: з'ясувати принцип дії електронного осцилографа, навчитися використовувати осцилограф для спостереження форми сигналу, вимірювання напруги, частоти, різниці фаз, дослідити явища, які виникають при складанні коливань однакового напрямку та взаємно перпендикулярних коливань.

2.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

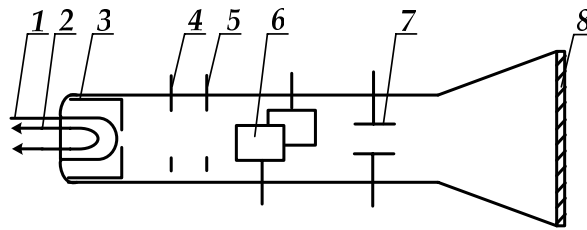
Електронний осцилограф (ЕО) використовується у науковій та інженерній практиці для дослідження характеристик форми напруг або струмів швидкозмінних коливальних процесів, вимірювання їх амплітуд, частот, фаз і визначення тривалості періодичних процесів. Особливо широко використовуються електронні осцилографи для дослідження характеру часових залежностей параметрів різних процесів за їх осцилограмами.

2.2.1 Будова та принцип дії електронного осцилографа

Осцилограф складається з осцилографічного індикатора – електронно-променевої трубки (ЕПТ), підсилювачів, каналів вертикального Y та горизонтального X відхилень, генератора розгортки, блока живлення та органів керування.

Електронно-променева трубка (рис. 2.1) складається з скляної колби, в якій створений високий вакуум. В середині колби розташовано джерело електронів – катод 1, який безпосередньо нагрівається волоском розжарення 2. Катод знаходиться всередині циліндричного електрода 3. Зміною негативного потенціалу на електроді 3 регулюється кількість електронів, які проходять крізь його отвір, внаслідок чого змінюється яскравість плями на екрані ЕПТ. Перший анод 4 служить для фокусування, а другий 5 – для прискорення електронів. Катод, волосок розжарення, керуючий електрод та обидва аноди складають **електронну гармату**.

Виходячи з електронної гармати, сформований електронний промінь проходить між двома парами металевих пластин 6,7, які служать для його відхилення.



- 1 – катод;
- 2 – волосок розжарення;
- 3 – циліндричний електрод;
- 4 – перший анод;
- 5 – другий анод;
- 6 – вертикально розташовані пластини;
- 7 – горизонтально розташовані пластини;
- 8 – екран

Рисунок 2.1

Вертикально розташовані пластини 6 служать для відхилення електронного променя у горизонтальній площині (пластини X), а горизонтально розташовані пластини 7 – у вертикальній площині (пластини Y). Якщо електричне поле між пластинами відсутнє, то електронний промінь не відхиляється і при відповідному юстуванні електронно-оптичної системи потрапляє у центр екрана ЕПТ, що викликає його світіння. Якщо прикласти до вертикально відхиляючих пластин напругу U , промінь зміщується на відстань y , яка визначається співвідношенням:

$$y = \frac{lL}{2U_k d} \cdot U, \quad (2.1)$$

де l – довжина відхиляючої пластини;

d – відстань між відхиляючими пластинами;

L – відстань від пластин до екрану;

U_k – різниця потенціалів між другим анодом та катодом (прискорююча різниця потенціалів).

2.2.2 Підсилювачі та послаблювачі вхідних сигналів

Електронно-променева трубка сама по собі має малу чутливість. Підсилення чутливості ЕО забезпечується підсилювачами напруги. Кожна пара відхиляючих пластин має свій підсилювач. Підсилювач для X -пластин звичайно має невеликий коефіцієнт підсилення, так як він призначений головним чином для підсилення достатньо великого сигналу. Підсилювач Y -пластин, навпаки, має достатньо великий коефіцієнт підсилення. У обох підсилювачів широка смуга пропускання і дуже рівномірна частотна характеристика, тобто коефіцієнт підсилення майже не залежить від частоти.

Якщо на вхід осцилографа подається достатньо великий сигнал, його можна подавати безпосередньо на відхиляючі пластини або скористатися послаблювачем сигналів (потенціометром).

Електронно-променева трубка, наділена підсилювачами та послаблювачами, може використовуватися як чутливий безінерційний вольтметр, що дозволяє вимірювати напругу, силу струму, активний опір і т.ін. Можливості такого приладу можна значно розширити, якщо забезпечити його генератором розгортки.

2.2.3 Генератор розгортки

Для спостереження часових змін процесів потрібно подавати на горизонтально відхиляючі пластини ЕО напругу, що лінійно зростає з часом – напругу розгортки. Тому вісь X на екрані трубки називається іноді віссю часу. Якщо при цьому одночасно подати на вертикально відхиляючі пластини досліджувану напругу, то на екрані осцилографа промінь опише графік зміни досліджуваної напруги з часом. Для спостереження періодичних процесів необхідна і періодична напруга розгортки.

Період розгортки має бути кратним періоду досліджуваного сигналу, щоб промінь на екрані з кожним повторенням циклу прокреслював одну й ту ж саму траєкторію. Після проходження екрана по горизонталі до відповідної точки промінь має швидко повернутися у початкове положення (зворотний хід).

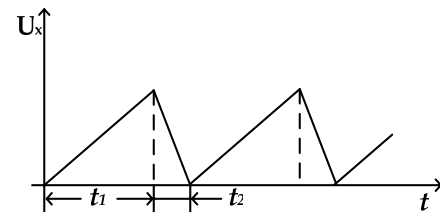


Рисунок 2.2

Викладені вище вимоги виконуються, якщо напруга розгортки змінюється за законом, який графічно зображений на рис. 2.2, де t_1 – час прямого ходу; t_2 – час зворотного ходу променя.

Така напруга називається пилоподібною. Для отримання нерухомого зображення при спостереженні періодичних процесів необхідно, щоб період пилоподібної напруги $T = t_1 + t_2$ ($t_2 \ll t_1$) дорівнював або був кратним періоду досліджуваного процесу T_0 . Це означає, що обидва сигнали мають бути синхронізованими. Для узгодження процесів використовують «синхронізацію», від якої генератор розгортки автоматично вмикається досліджуваною напругою через ціле число періодів.

Органи керування осцилографом описані у додатку А.

2.2.4 Додавання коливань однакового напрямку з близькими частотами ω і $\omega + \Delta\omega$ ($\Delta\omega \ll \omega$).

При додаванні коливань одного напрямку з близькими частотами

$$x_1 = a \cos \omega t,$$

$$x_2 = a \cos(\omega + \Delta\omega)t.$$

Результуюче коливання описується рівнянням

$$x = x_1 + x_2 = \left(2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t\right) \cos \omega t. \quad (2.2)$$

Множник в дужках змінюється значно повільніше, ніж другий множник. Це дає змогу розглядати процес як коливання частоти ω , амплітуда якого змінюється за періодичним законом $2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t$.

Періодична зміна амплітуди результуючого коливання називається **биттям**. Період биття

$$T = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \quad (2.3)$$

2.2.5 Додавання взаємно перпендикулярних коливань

Нехай коливання вздовж осей X та Y описуються рівняннями

$$\begin{aligned} x &= a \cos \omega t, \\ y &= b \cos(\omega t + \delta). \end{aligned}$$

Тоді результуюче коливання, яке отримано внаслідок додавання зазначених вище взаємно перпендикулярних, описується рівнянням кривої другого порядку

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (2.4)$$

Замкнуті траєкторії, які спостерігаються на екрані внаслідок додавання взаємно перпендикулярних коливань з кратними частотами, називають фігурами Ліссажу. Форма цих кривих залежить від співвідношення амплітуд, частот і різниці фаз складових коливань (рис.2.3).

	$\varphi = 0$	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
1:1					
1:2					
1:3					
2:3					
3:4					

Рисунок 2.3

2.2.6 Визначення різниці фаз між двома сигналами однієї частоти

Для визначення різниці фаз можна дослідити фігури Ліссажу у випадку додавання взаємно перпендикулярних коливань однакової частоти. Якщо зо-

зображення є прямою діагонально спрямованою лінією, то різниця фаз $\delta=0$ (рис. 2.4а) або $\delta=180^\circ$ (рис. 2.4б). Якщо зображення – еліпс (рис. 2.5), тоді зсув фаз δ можна обчислити за формулою

$$\delta = \arcsin \frac{A}{B}, \quad (2.5)$$

де A – відстань між точками перетину кривої з вертикальною лінією;
 B – максимальне відхилення по вертикалі.

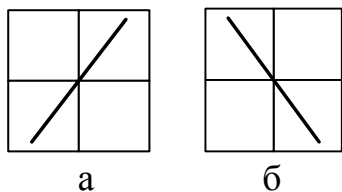


Рисунок 2.4

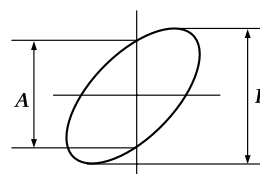


Рисунок 2.5

2.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з електронного осцилографа, звукових генераторів – 2 шт., трансформатора, що використовується для додавання коливань, з'єднувальних провідників.

2.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

2.4.1 Вимірювання частоти

Скласти схему (рис.2.6). Подати на вхід Y осцилографа синусоїдальний сигнал від генератора. Змінюючи сталу розгортки (τ), одержати стійке зображення синусоїди. Визначити частоту ν сигналу за допомогою формули

$$\nu = \frac{n}{l\tau}, \quad (2.6)$$

де n – число періодів сигналу на екрані ЕПТ,

l – кількість поділок, які займають n періодів на горизонтальній шкалі екрана ЕПТ,

τ – стала розгортки.

2.4.2 Додавання коливань однакового напрямку з близькими частотами

Скласти схему (рис. 2.6). Для додавання коливань використати трансформатор, змонтований на панелі.

Подати на обмотку III трансформатора сигнал частотою 1500-5000Гц від звукового генератора (ЗГ-1). Одержати на екрані осцилографа стійке зображення синусоїди. Виміряти амплітуду та частоту сигналу.

Від'єднати обмотку III та подати сигнал приблизно тієї ж частоти від другого звукового генератора (ЗГ-2) на обмотку II. Встановити амплітуду сигналу на екрані, яка б дорівнювала попередній. Після цього подати одночасно сигнали на обмотки II та III. Плавню змінюючи частоту одного з генераторів, одержати биття. Визначити період биття, а потім, використовуючи (2.3), різницю частот $\Delta\omega$.

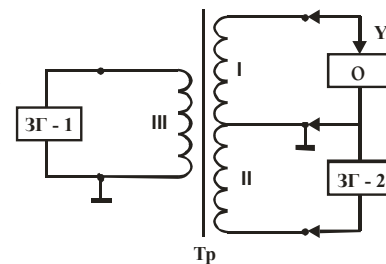


Рисунок 2.6

2.4.3 Додавання коливань з кратними частотами

Подати гармонійний сигнал з частотою $\nu_1 = 500 \text{ Гц}$ на обмотку III, а потім на обмотку II (рис. 2.6) з $\nu_2 = 1000 \text{ Гц}$. Охарактеризувати результуючий сигнал. Повторити спостереження при співвідношенні частот 1:3 та 1:4. Зарисувати результуючий сигнал.

2.4.4 Складання взаємноперпендикулярних коливань.

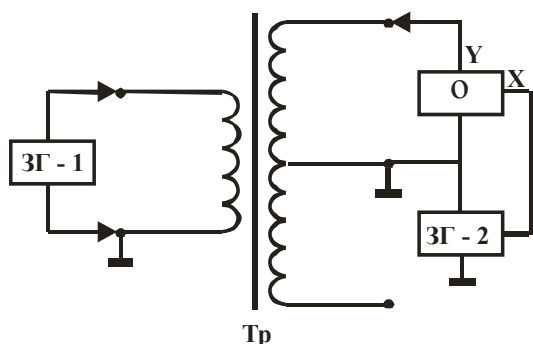


Рисунок 2.7

Скласти схему (рис. 2.7). Встановити частоту генератора $\nu \approx 300 - 500 \text{ Гц}$.

Подати на вхід X сигнал від одного генератора, а на вхід Y від іншого. Відключити розгортку. Одержати фігури Ліссажу при співвідношенні частот

$$\nu_y = \frac{1}{2}\nu_x, \nu_y = \nu_x, \nu_y = \frac{3}{2}\nu_x, \nu_y = \frac{2}{3}\nu_x,$$

$$\nu_y = 2\nu_x, \nu_x = 3\nu_y.$$

Переконалися у тому, що

$$\frac{\nu_x}{\nu_y} = \frac{m}{n},$$

де m та n – кількість точок дотикань фігурою Ліссажу вертикальної та горизонтальної ліній відповідно.

Зарисувати отримані фігури Ліссажу.

2.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірів, результати розрахунку частоти, періоду коливань для двох генераторів, різниці частот $\Delta\omega$, рисунки фігур Ліссажу, стислі висновки.

2.6 Контрольні запитання і завдання

1. Поясніть призначення, устрій та принцип дії ЕПТ?
2. Для чого призначений генератор розгортки осцилографа?

3. Який принцип роботи осцилографа у режимі спостереження напруг, які періодично змінюються?
4. Як визначити частоту генератора розгортки, якщо частота досліджуваного сигналу відома?
5. Яким чином за допомогою осцилографа можна виміряти напругу, силу струму та опір?
6. Пояснити виникнення биття.
7. У чому суть методу фігур Ліссажу, що застосовується для визначення частоти коливань?
8. Які коливання називаються гармонічними?
9. Як за виглядом фігури Ліссажу можна визначити відношення частот коливань, що додаються?
10. Як визначити різницю фаз між двома коливаннями у випадку додавання взаємно перпендикулярних коливань?

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

3.1 Мета роботи: дослідити на електролітичній моделі розподіл потенціалів в електричних полях циліндричних і плоскопаралельних електродів.

3.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Силовою характеристикою електричного поля в кожній його точці є вектор напруженості \vec{E} , а енергетичною – потенціал φ . Графічно електричне поле будь-якої системи зарядів можна відобразити або лініями напруженості, дотичні до яких збігаються з напрямком \vec{E} , або за допомогою екіпотенціальних поверхонь. Лінії напруженості ортогональні екіпотенціальним поверхням у кожній точці електричного поля. Напруженість електричного поля пов'язана з потенціалом [2]:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi(x, y, z).$$

Технічно легше виконати вимірювання скалярної величини φ , ніж векторної \vec{E} . Для дослідження розподілу потенціалів в електричному полі використовується «точковий» електрод – зонд, який вводиться в досліджувану точку поля. За допомогою зонда можна виміряти різницю потенціалів між даною та будь-якою іншою точкою електричного поля. При цьому важливо, щоб зонд не заряджався і набував потенціалу тієї точки поля, в якій він розташований.

Цю умову важко виконати в непровідному середовищі, бо зонд накопичує заряди і вони не стікають з нього. Тому дослідження електричного поля заряджених провідників замінюється дослідженням поля струмів в провідному середовищі між провідниками. Адекватність такої заміни підтверджується законом Ома в диференціальній формі

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho}, \quad (3.1)$$

де \vec{j} – вектор густини струму;
 ρ – питомий опір провідного середовища (електроліту).

Із закону Ома випливає, що в однорідному провідному середовищі лінії напруженості електричного поля збігаються за напрямком з лініями густини струмів. Тому, вимірюючи розподіл потенціалів поля густини струму в провідному середовищі, можна дослідити розподіл потенціалів електричного поля статичних зарядів. В електроліті металевий зонд не заряджається і набуває потенціалу досліджуваної точки поля, бо стікання зарядів з вістря зонду відбувається безперервно за рахунок слабого струму, який виникає між зондом і одним із електродів. Щоб цей струм був малим і не впливав на досліджуване поле, електричне коло зонда повинне мати значно більший опір, ніж опір електроліту.

У даній роботі в коло зонду вмикається підсилювач вертикального відхилення осцилографа з великим входним опором ($R_{ex} = 500 \text{кОм}$), а опір електроліту на 2-3 порядки менший. Між електродами в електроліті протікає змінний синусоїдальний струм невеликої частоти (50 Гц), бо при протіканні постійного струму на електродах осідають продукти розпаду, які поляризують електроди і викривлюють розподіл потенціалів досліджуваного поля.

3.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з ванни з електролітом, циліндричних та плоских електродів, точкового електроду (зонду), джерела змінної напруги, потенціометра, осцилографа, з'єднувальних дротів.

Схема установки для дослідження потенціальної картини електролітичної моделі електричного поля наведена на рис. 3.1.

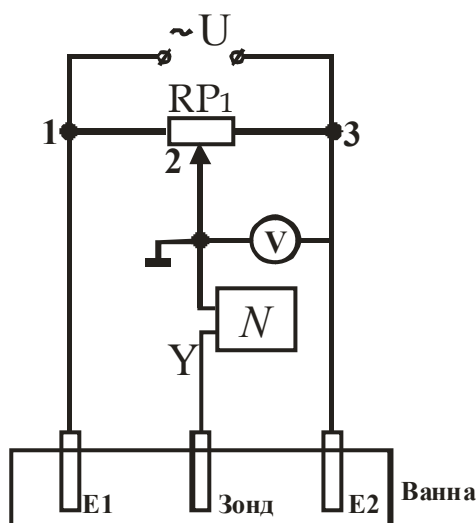


Рисунок 3.1

В електролітичній ванні, заповненій електролітом, розташовані металеві електроди $E1$ і $E2$, електричне поле яких досліджують. На електроди подається змінна напруга ($U_{ef} = 13B$). У вимірювальну частину пристрою входять такі компоненти: зонд, реостат $RP1$ (потенціометр), осцилограф N , який використовують як нуль-індикатор. Для вимірювання різниці потенціалів використовують вольтметр V . Опір реостату між клемми 1,2 і 2,3 разом з опором електроліту між зондом і електродами утворюють електричний місток Уїтстона, діагональ якого (клема 2 та зонд) містить осцилограф як нуль-індикатор. Змінюючи положення зонду по відношенню до електродів, можна знайти в електроліті такі точки поля, потенціал яких дорівнює потенціалу повзунка реостата. Наявність різниці потенціалів у діагоналі містка визначається за амплітудою вертикального відхилення на екрані осцилографа (довжина лінії). Зонд переміщуємо до того часу, доки амплітуда вертикального відхилення променя не буде мінімальною. Геометричне місце точок поля, для яких різниця потенціалів в діагоналі містка дорівнює нулю (при незмінному положенні повзунка реостата), відповідає одній з еквіпотенціальних поверхонь електричного поля. Через малу глибину ванни в досліді отримуємо не поверхню, а її горизонтальний переріз – еквіпотенціальну лінію. Змінюючи потенціал повзунка реостата, визначаємо еквіпотенціальну лінію іншої величини потенціалу. Вимірювання потенціалу повзунка реостата по відношенню до потенціалу електрода $E2$ здійснюється вольтметром V .

Циліндричні і плоскі електроди закріплені на підставках, де є координатна сітка, за допомогою якої знаходять координати зонда, радіуси електродів та відстань між ними.

3.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

3.4.1 Дослідження електричного поля між циліндричними електродами

1. Зібрати електричну схему досліду (рис.3.1).
2. Розмістити у ванні з електролітом циліндричні електроди та зобразити їх на папері у зручному масштабі. Виміряти радіуси електродів R_1 та R_2 .

Увімкнути живлення і виміряти різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ між електродами для розрахунку сталої k . Використати формулу зв'язку між різницею потенціалів та напруженістю електричного поля для даного досліду:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{R_2}^{R_1} E(r)dr = \int_{R_2}^{R_1} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1} = k \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (3.2)$$

де φ_1 та φ_2 – потенціали меншого та більшого електродів радіусами R_1 та R_2 відповідно;

λ – лінійна густина заряду;

ϵ_0 – електрична стала;

ϵ – діелектрична проникність середовища між електродами.

3. Вимкнути розгортку осцилографа, поставити зонд в деяке положення R між електродами і за допомогою потенціометра R/II збалансувати плечі електричного містка, про що свідчить мінімальний розмах коливань на екрані осцилографа. Занести в таблицю даних 3.1 значення потенціалу для цього положення зонда та радіус даної екіпотенціальної лінії. Інші положення зонда на ній знаходяться при мінімальних розмахах коливань на екрані осцилографа.

4. Для отримання даних про інші екіпотенціальні лінії (всього 3–5 ліній) необхідно повторити завдання п.2 для інших значень радіусів ($R_1+1, 2, 3, \dots$ см).

5. Розрахувати значення $\varphi_{теор}(R)$ за формулою (3.2), де $R_2 = R_1 + 1, 2, \dots$ см (за вказівкою викладача), а $\varphi_1 = 0$. Результати теоретичних та експериментальних даних занести в таблицю 3.1 та побудувати на одному рисунку залежності $\varphi_{теор}(R)$ та $\varphi_{експ}(R)$ для порівняння їх між собою.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань та розрахунків

$R, \text{см}$	$\varphi_{експ}, \text{В}$	$\varphi_{теор}, \text{В}$
$R_1 + 1$		
$R_1 + 2$		
$R_1 + 3$		

3.4.2 Дослідження електричного поля між плоскими електродами

1. Розташувати у ванні плоскі електроди і зобразити їх у вибраному масштабі на папері.

2. Виміряти і записати відстань d між електродами. Керуючись вказівками попереднього завдання, визначити та зафіксувати на папері значення x_i екіпотенціальних ліній з відповідними їм потенціалами (3-5 ліній). Значення x_i відлічувати від електроду з нульовим потенціалом. Звернути увагу на форму екіпотенціальних ліній за межами плоских електродів. Провести на рисунку лінії напруженості електричного поля.

3. Використовуючи співвідношення для потенціалу однорідного поля, знайти значення $\varphi_{теор}$ для відповідних значень x за формулою:

$$\varphi = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} x.$$

Дані занести до табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань та розрахунків

$x, \text{см}$	$\varphi_{експ}, \text{В}$	$\varphi_{теор}, \text{В}$
1,0		
2,0		
3,0		

4. Побудувати в одній системі координат дві залежності $\varphi(x)$ – отриману експериментально $\varphi_{експ}$ та знайдену теоретично $\varphi_{теор}$. Вказати абсолютні похибки вимірів на експериментальній залежності. Порівняти отримані графіки.

3.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірювань у вигляді таблиць, рисунок еквіпотенціальних ліній для циліндричних та плоских електродів, графіки залежностей $\varphi_{експ}$ та $\varphi_{теор}$ із зазначеними на них абсолютними похибками вимірювань, стислі висновки.

3.6 Контрольні запитання і завдання

1. Що називається напруженістю і потенціалом електричного поля?
2. Дати визначення лініям напруженості та еквіпотенціальним поверхням.
3. Чому простіше дослідити поле струмів у провідному середовищі, ніж поле статичних зарядів?
4. На основі чого вивчення поля статичних зарядів замінюється вивченням поля струмів в провідному середовищі?
5. Навіщо на електроди експериментального пристрою (рис.3.1) подається змінна напруга?
6. Пояснити принцип дії експериментального пристрою.
7. Вивести формулу для визначення потенціалів циліндричного та плоского конденсаторів.

4 ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА

4.1 Мета роботи: експериментально дослідити характер зв'язку між зарядом конденсатора, його електричною ємністю та різницею потенціалів між його обкладками; теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити можливість вимірювання величини електричної ємності за допомогою магнітоелектричного гальванометра.

4.2 Методичні вказівки до організації самостійної підготовки студентів

Конденсатор – це система з двох провідників, розділених тонким шаром діелектрика. Електричну ємність його C формально можна визначити як коефіцієнт пропорційності між зарядом q та напругою на обкладках U : $q=CU$.

Замикання конденсатора на дротяну рамку магнітоелектричного гальванометра супроводжується її кутовим відхиленням. Фізичні основи роботи гальванометра магнітоелектричної системи описані в лабораторній роботі № 1 даних методичних вказівок. Причиною відхилення магнітної рамки, яка знаходиться у магнітному полі даного приладу, є момент сили Ампера, що виникає в

результаті дії струму під час вмикання зарядженого конденсатора на рамку. Сила цього струму визначається зміною заряду на кінцях провідника рамки від $q_1=0$ до $q_2=CU$ за час Δt замикання на них конденсатора:

$$i_0 = (q_2 - q_1) / \Delta t = CU / \Delta t.$$

Метою дослідження руху рамки в магнітному полі є визначення характеру залежності максимального її кутового відхилення φ_m від величини заряду на конденсаторі $q=CU$ під час замкнення на розрядження.

Метою теоретичного дослідження руху рамки зі стрілкою магнітоелектричного гальванометра є визначення характеру залежності максимального кутового відхилення рамки від величини електричної ємності зарядженого конденсатора під час та після його замикання на зарядження через цей вимірювальний прилад.

Зміну положення рамки зі струмом в магнітному полі можна описати рівнянням динаміки для обертального руху:

$$I\ddot{\varphi} = M - M_0 - M_\partial, \quad (4.1)$$

де I – момент інерції рамки;

$M = NBSi_0e^{-t/\tau}$ – момент сили Ампера, що діє на рамку за час вмикання зарядженого конденсатора на прилад та під час його розрядження;

N – кількість витків рамки;

B – магнітна індукція магніту гальванометра;

S – площа перерізу рамки;

$\tau = RC$ – стала часу розрядження конденсатора;

$M_0 = k_0\phi l$ – момент сили опору середовища, в якому рухається рамка;

$M_\partial = k\phi l$ – момент сил пружної деформації пружин кутової фіксації рамки в приладі.

Рівняння (4.1) після приведення стандартних замін та підстановок має такий вигляд:

$$\ddot{\varphi} + 2\beta\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = f_0e^{-t/\tau}, \quad (4.2)$$

де $\beta = \frac{k_0l}{2I}$ – коефіцієнт згасання коливань;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{kl}{I}}$ – власна циклічна частота вільних коливань рамки;

$f_0 = \frac{NBS}{I}i_0$ – максимальне значення функції від сили Ампера.

Розв'язок рівняння (4.2) для $\beta < \omega_0$ має загальну та часткову складові:

$$\varphi(t) = ce^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0) + \varphi_\partial e^{-t/\tau}, \quad (4.3)$$

де $\varphi_\partial = \frac{f_0\tau^2}{1 - 2\tau\beta - \tau^2\omega_0^2}$ – динамічна складова кута відхилення рамки, яка

визначається результатом часткового розв'язку рівняння (4.2).

Початкове кутове положення стрілки приладу прийнято вважати за точку нульового відліку. Тобто в рівнянні (4.3) $\varphi_0 = 0$. Максимальне відхилення стріл-

ки відбувається за час Δt замикання зарядженого конденсатора на прилад. Тому на початку розрядження при $t = 0$ $\varphi(0) = \varphi_m$. Урахування цих умов у рівнянні (4.3) дозволяє отримати значення сталої інтегрування: $c = \varphi_m - \varphi_\partial$. Після підстановки цього значення в (4.3) маємо такий вираз розв'язку рівняння (4.2):

$$\varphi(t) = (\varphi_m - \varphi_\partial)e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t) + \varphi_\partial e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.4)$$

Величина φ_m залежить від багатьох параметрів системи, зокрема від початкового заряду конденсатора q . Залежність $\varphi_m(q)$ можна отримати з умови $\dot{\varphi}(t) = 0$ для моменту часу $t=0$:

$$\dot{\varphi}(t) = -(\varphi_m - \varphi_\partial)\beta e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t) - (\varphi_m - \varphi_\partial)e^{-\beta t} \omega_0 \sin(\omega_0 t) - \tau^{-1} \varphi_\partial e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.5)$$

Після нескладних перетворень і підстановок отримаємо залежність $\varphi_m(q)$ у такому вигляді:

$$\varphi_m(q) = \varphi_\partial \frac{\beta t - 1}{\beta t} = \frac{NBS\tau(\tau\beta - 1)}{I\beta\Delta t(1 - 2\tau\beta - \tau^2\omega_0^2)} UC = \alpha UC. \quad (4.6)$$

Коефіцієнт α в рівнянні (4.6) залежить від $\tau = RC$. Тому в точному розумінні залежність (4.6) $\varphi_m(CU)$ не є лінійною від ємності конденсатора. Але в першому наближенні нею можна скористатися для експериментальної оцінки величини електричної ємності конденсатора з похибкою, яка не перевищує похибок прямих вимірювань у відповідних експериментальних залежностях $\varphi_m(C)$ для $U = \text{const}$:

$$C_x = \frac{\varphi_{mx}}{\alpha_x U_x}, \quad (4.7)$$

де сталі α_x знаходяться з відповідних до напруги графіків $\varphi_m(CU)$:

$$\alpha = \frac{\Delta\varphi_m}{\Delta C}. \quad (4.8)$$

4.3 Опис лабораторної установки

На панелі змонтована схема (рис. 4.1). Як джерело використовується блок живлення ПС з напругою, що регулюється. Ємності конденсаторів $C_1 - C_5$ наведено на лабораторному макеті. Ємності конденсаторів C_{x1} та C_{x2} невідомі.

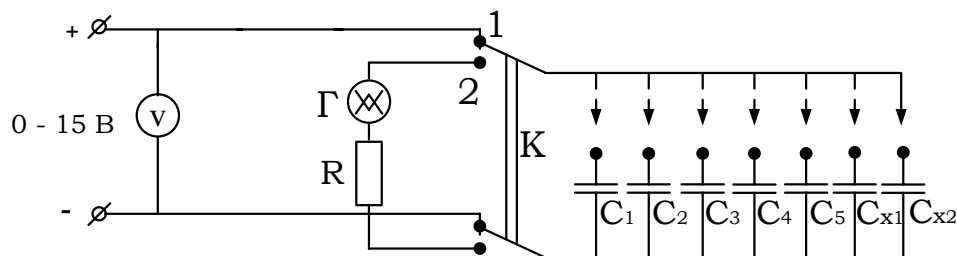


Рисунок 4.1

4.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. За допомогою потенціометра блока живлення виставити напругу $U=7\text{В}$.
2. Приєднати до схеми (рис 4.1) конденсатор C_1 .
3. Поставити перемикач K в положення 1 для зарядження конденсатора.
4. Перевести перемикач K в положення 2 і зафіксувати число поділок, відповідне до максимального кута відхилення стрілки гальванометра.
5. Виконати завдання п.п. 2–4 для кожного з відомих та невідомих конденсаторів. Дані занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань

$C, \text{мкФ}$		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_{x1}	C_{x2}
$U=7\text{ В}$	φ_m							
$U=9\text{ В}$								
$U=11\text{ В}$								
$U=15\text{ В}$								

6. Повторити завдання пп. 1–5 для інших напруг. Результати занести до табл. 4.1.
7. Побудувати графіки експериментальних залежностей $\varphi_m = f(C)$ для кожного значення напруги U окремо.
8. За допомогою кожного графіка визначити за формулою (4.7) значення C_{x1} та C_{x2} .
9. Обчислити похибки вимірювань.

4.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірів у вигляді таблиці, графіки залежностей $\varphi_m(C)$, результат обчислення C_{x1} та C_{x2} , обчислення похибок, стислі висновки.

4.6 Контрольні запитання і завдання

1. Дайте визначення електроємності відокремленого провідника, конденсатора. У яких одиницях вона вимірюється?
2. Від чого залежить ємність відокремленого провідника?
3. Що таке конденсатор?
4. Виведіть формули для ємності плоского та сферичного конденсаторів.
5. Написати рівняння кутового відхилення рамки гальванометра при замиканні на нього зарядженого конденсатора.
6. Дати визначення усіх фізичних величин, які входять до рівняння руху рамки та розкрити їх фізичний зміст.

5 ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКІВ

5.1 Мета роботи: дослідити явище електричного гістерезису для сегнетоелектрика, використовуючи осцилографічний метод спостереження, знайти експериментально залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля.

5.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Сегнетоелектриками називаються кристалічні діелектрики, які можуть мати за відсутністю зовнішнього електричного поля в певному інтервалі температур спонтанну поляризацію, що істотно змінюється під впливом зовнішніх факторів. Звичайно сегнетоелектрики не є однорідно поляризованими, а складаються з доменів – хаотичних областей з різними напрямками поляризації. Тому сумарний електричний дипольний момент зразка практично відсутній.

Основні специфічні властивості сегнетоелектриків – надзвичайно великі значення діелектричної проникності ϵ (сягає 10^4 - 10^5) і нелінійна залежність вектора поляризації \vec{P} від напруженості електричного поля \vec{E} . При внесенні сегнетоелектрика в зовнішнє електричне поле \vec{E} він поляризується. Спочатку збільшення поляризованості пов'язано з тим, що межі між доменами зміщуються так, що об'єми доменів, поляризованих по полю, збільшуються за рахунок доменів, поляризованих проти поля, а потім, зі збільшенням \vec{E} – за рахунок повороту вектора поляризації \vec{P} .

Відомо, що вектор електричного зміщення

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (5.1)$$

де \vec{E} – напруженість електричного поля в діелектрику;

\vec{P} – вектор поляризації діелектрика.

Для ізотропних, однорідних діелектриків зв'язок між \vec{E} і \vec{P} в області не надто сильних полів є лінійним:

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (5.2)$$

де χ — діелектрична сприйнятливість.

Але в сегнетоелектриках залежність \vec{P} від \vec{E} нелінійна (рис. 5.1). В цьому випадку вважається, що в співвідношенні (5.2) величина χ – не постійна, а є функцією від E : $\chi = f(E)$. При розміщенні сегнетоелектриків у зовнішньому змінному електричному полі, завдяки доменній структурі сегнетоелектрика можна спостерігати явище електричного гістерезису. Це явище полягає в тому, що при зменшенні зовнішнього електричного поля зміна поляризації P відбувається не по початковій кривій ab (рис. 5.1), а по новій bc , розміщеній вище (рис. 5.2).

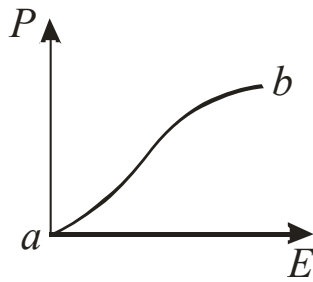


Рисунок 5.1

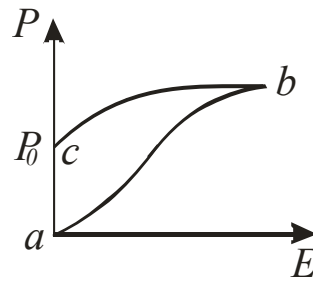


Рисунок 5.2

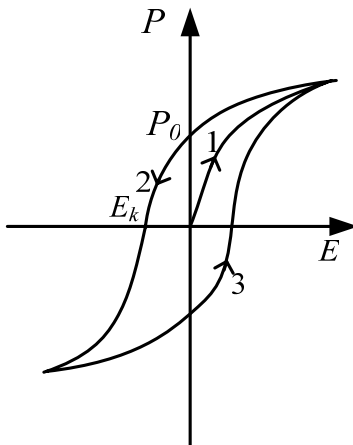


Рисунок 5.3

Це пов'язано з тим, що поляризований стан в сегнетоелектриках зберігається навіть після зниження напруженості поля E до нуля (залишкова поляризація P_0). Тобто, поляризація сегнетоелектрика P не визначається однозначно значенням напруженості поля E , а залежить від попереднього стану сегнетоелектрика. Щоб зняти залишкову поляризацію, необхідно змінити напрямок зовнішнього електричного поля на протилежний. Величина напруженості зовнішнього електричного поля, при якій поляризація перетворюється в нуль, називається коерцитивною силою E_k (рис. 5.3).

Якщо сегнетоелектрики розмістити в електричному полі, що змінюється за величиною і напрямком, внаслідок гістерезису залежність $P(E)$ матиме вигляд замкненої кривої (рис. 5.3), яка називається петлею гістерезису. Аналогічний вигляд має і залежність $D(E)$. Це впливає з того, що при $\chi \gg 1$ вектор поляризації

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \gg \epsilon_0 \vec{E}.$$

Тоді у співвідношенні (5.1) отримаємо, що $D \approx P$.

У лабораторній роботі досліджується залежність $D(E)$ для титанату барію ($BaTiO_3$), який є сегнетоелектриком в області температур від 5 до 120°C .

5.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з осцилографа (N), джерела регульованої змінної напруги (U), досліджуваного сегнетоелектрика (титанат барію) (C), вольтметрів змінної напруги (V_1, V_2), набору з'єднувальних провідників.

Дослідження гістерезису (відставання) залежності заряду на обкладках конденсатора від прикладеної напруги проводять схемою, зображеною на рис. 5.4.

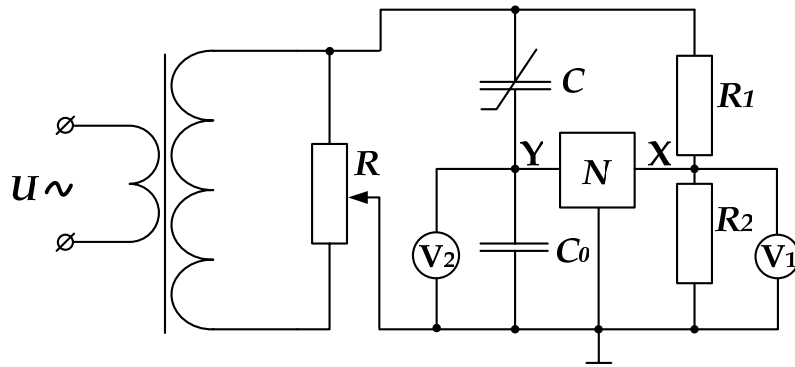


Рисунок 5.4

Змінна регульована напруга, яка знімається з потенціометра R , подається на подільник напруги, який складається з опорів $R_1 = 470$ кОм і $R_2 = 100$ кОм.

Паралельно подільнику ввімкнені дві послідовно з'єднані ємності: сегнетоконденсатор (вариконд) C і еталонний конденсатор $C_0 = 1$ мкФ, причому $C_0 \gg C$. Із схеми видно, що на пластини горизонтального відхилення подається напруга U_x з резистора R_2 .

$$U_x(t) = \frac{U(t)}{R_1 + R_2} R_2. \quad (5.3)$$

Тоді горизонтальне відхилення променя пропорційне миттєвому значенню прикладеної напруги $U(t)$. Змінна напруга $U(t)$, яка знімається з потенціометра R , прикладена, в основному, до вариконду C (бо $C \ll C_0$) і створює в ньому електричне поле напруженістю

$$E(t) = \frac{U(t)}{d}, \quad (5.4)$$

де d – товщина пластини сегнетоелектрика.

Якщо підставити $U(t)$ із формули (5.3) в (5.4), отримаємо

$$E(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} U_x(t). \quad (5.5)$$

Вертикальні відхилення променя на екрані осцилографа пропорційні напрузі U_y на еталонному конденсаторі C_0 .

$$U_y = \frac{q_0(t)}{C_0},$$

де $q_0(t)$ – заряд на обкладках конденсатора C_0 .

Так як конденсатори C і C_0 увімкнені послідовно, то заряди на обкладках обох конденсаторів однакові: $q(t) = q_0(t)$. Тоді

$$U_y(t) = \frac{q(t)}{C_0} = \frac{\sigma(t)S}{C_0}, \quad (5.6)$$

де $\sigma(t)$ – поверхнева густина вільних зарядів на обкладках сегнетоконденсатора, S – площа пластин вариконда.

Внаслідок того, що поверхнева густина вільних зарядів σ чисельно дорів-

нює електричному зміщенню D ($D=\sigma$), із співвідношення (5.6) знайдемо

$$D(t) = \frac{C_0}{S} U_y. \quad (5.7)$$

Отже, електричне зміщення D пропорційне вертикальним відхиленням променя на екрані осцилографа (5.7), а напруженість електричного поля в сегнетоелектрику пропорційна зміщенню променя по горизонталі (5.5).

Вимкнувши розгортку осцилографа на екрані, можна спостерігати залежність $D=f(E)$, яка є петлею гістерезису. В зв'язку з тим, що $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$, крива, яка спостерігається, відображає також залежність поляризації $P(E)$ в іншому масштабі.

Зміщення променя за осями X та Y залежить від чутливості осцилографа за відповідними каналами. Якщо ціну поділки масштабної сітки осцилографа по осі X позначимо a_x (у вольтах на поділку), а по осі Y – через a_y , то за зміщенням променя x та y можна обчислити напруги

$$U_x = a_x x, \quad U_y = a_y y. \quad (5.8)$$

З урахуванням співвідношення (5.8), формули (5.5) і (5.7) набирають вигляду

$$E = \frac{1}{d} \frac{R_1 + R_2}{R_2} a_x x, \quad (5.9)$$

$$D = \frac{C_0}{S} a_y y. \quad (5.10)$$

5.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис.5.4). Увімкнути вимірювальні прилади і підготувати їх до роботи.

2. Вимкнувши розгортку осцилографа, встановити світну точку в центрі екрана, подати напругу на вариконд і отримати на екрані чітке зображення петлі гістерезису. У випадку скривленої петлі необхідно зачекати декілька хвилин для прогріву сегнетоелектрика.

3. Отримати максимальний розмір петлі і зарисувати її.

4. За допомогою вольтметра провести калібровку каналів X і Y . Для цього визначити координати верхньої точки петлі гістерезису x_0 і y_0 (при максимальному розмірі петлі) в поділках масштабної сітки, виміряти за допомогою вольтметра значення U_x і U_y . При цьому слід звернути увагу на те, що вольтметр показує ефективне значення напруги, а зміщення променя на екрані осцилографа визначається амплітудним значенням напруги. Тому значення a_x і a_y

визначають за формулами $a_x = \frac{U_x \sqrt{2}}{x_0}$; $a_y = \frac{U_y \sqrt{2}}{y_0}$. Після цього рівень підсилення по осях X і Y не змінювати.

5. Поступово зменшуючи за допомогою потенціометра R напругу живлення, зробити 8 вимірювань значень координат x і y верхнього кінця петлі при різних напругах. Записати отримані величини до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань та розрахунків

$x, \text{мм}$	$y, \text{мм}$	$U_x, \text{В}$	$U_y, \text{В}$	$E, \text{В/м}$	$D, \text{Кл/м}^2$	ε

6. За формулами (5.9) і (5.10) визначити E і D та занести їх до таблиці.

7. Побудувати графік $D=f(E)$.

8. Обчислити відносну діелектричну проникність $\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E}$, її абсолютну

похибку і побудувати графік $\varepsilon(E)$.

5.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірювань, зведені в таблиці; графіки залежностей $D(E)$; $\varepsilon(E)$ з зазначеними на них похибками; стислі висновки.

5.6 Контрольні запитання і завдання

1. Які речовини називають діелектриками?
2. Що таке поляризація діелектрика? Типи поляризації.
3. Що являє собою вектор поляризації? Який його фізичний зміст?
4. Записати зв'язок вектора електричного зміщення з вектором поляризації.
5. Що таке діелектрична проникність речовини?
6. Що таке спонтанна поляризація діелектриків?
7. Який клас діелектриків відноситься до сегнетоелектриків? Як поведуть себе сегнетоелектрики у зовнішньому електричному полі?
8. Що являє собою явище гістерезису для сегнетоелектриків?
9. Що таке коерцитивна сила та залишкова поляризованість?

6 ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ МЕТОДОМ МОСТОВОЇ СХЕМИ

6.1 Мета роботи: навчитися використовувати правила Кірхгофа для розгалужених кіл, опанувати метод мостової схеми та визначити невідомі опори за допомогою цього методу .

6.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Одним з найбільш точних методів вимірювання опорів є метод моста Уїтстона. Міст Уїтстона зображений на рис. 6.1.

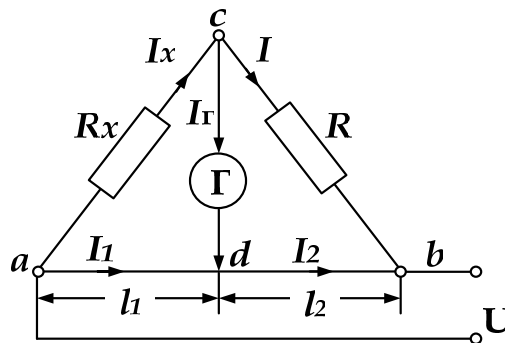


Рисунок 6.1

На схемі між клемми a і b встановлений калібрований дріт-реохорд, який має повзунковий контакт d , U – постійна напруга, створювана джерелом живлення, R – відомий опір, R_x – невідомий опір, Γ – гальванометр, l_1 і l_2 – «плечі» реохорду (довжина дроту).

Метод вимірювання опорів за допомогою мосту Уїтстона оснований на порівнянні невідомого опору R_x з відомим опором R . Найбільш просто ця задача розв'язується за допомогою двох правил Кірхгофа для розгалужених ланцюгів. Будь-яка точка розгалуженого ланцюга, у якій сходиться не менш трьох провідників зі струмом, називається вузлом ланцюга. При цьому струм, що входить у вузол, вважається позитивним, а той, що виходить з вузла – негативним.

При протіканні струму кожен вузол має залишатися нейтральним. Наслідком цього є перше правило Кірхгофа [2–5]: алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum I_k = 0,$$

Друге правило Кірхгофа ґрунтується на законах Ома для повного кола й для ділянки кола [2-5] і має наступне формулювання: у будь-якому замкнутому колі, довільно обраному в розгалуженому електричному ланцюзі, алгебраїчна сума добутків сил струмів I_i на опори R_i відповідних ділянок цього контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС \mathcal{E}_k , які діють у даному колі:

$$\sum I_i R_i = \sum \mathcal{E}_k .$$

Нехай струми в плечах моста та в діагоналі cd протікають так, як позначено на рис. 6.1. Тоді за правилами Кірхгофа для розгалужених кіл можна скласти наступні п'ять рівнянь з п'ятьма невідомими (на рис.6.1 як джерело ЕРС ε використане джерело живлення U):

$$\text{для вузла } c: I_x - I - I_\Gamma = 0, \quad (6.1)$$

$$\text{для вузла } d: I_1 - I_2 + I_\Gamma = 0, \quad (6.2)$$

$$\text{для контуру } acda: I_x R_x + I_\Gamma R_\Gamma - I_1 R_1 = 0, \quad (6.3)$$

$$\text{для контуру } abUa: I_1 R_1 + I_2 R_2 = U, \quad (6.4)$$

$$\text{для контуру } cbdc: IR - I_2 R_2 - I_\Gamma R_\Gamma = 0, \quad (6.5)$$

де R_Γ – опір гальванометра;

R_1 і R_2 опори «плечей» реохорда l_1 і l_2 .

Змінюючи положення повзункового контакту d реохорда (і тим самим змінюючи співвідношення між l_1 і l_2), можна добитися того, щоб потенціал точки d був рівний потенціалу точки c ($\varphi_d = \varphi_c$). У цьому випадку струм через гальванометр не протікає $I_\Gamma = 0$ (міст збалансований). Враховуючи це, рівняння (6.1), (6.2), (6.3), (6.5) слід спростити:

$$I_x = I, \quad (6.6)$$

$$I_1 = I_2, \quad (6.7)$$

$$I_x R_x = I_1 R_1, \quad (6.8)$$

$$IR = I_2 R_2. \quad (6.9)$$

Поділивши останні два рівняння одне на друге почленно, отримаємо

$$\frac{I_x R_x}{IR} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2}. \quad (6.10)$$

Враховуючи співвідношення (6.6), (6.7) рівняння (6.10) можна спростити

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.11)$$

Опір «плечей» реохорда визначається за формулами:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S}. \quad (6.12)$$

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S}, \quad (6.13)$$

де ρ – питомий опір дроту реохорда; S – площа його поперечного перерізу.

Підставивши значення R_1 і R_2 (6.12), (6.13) у співвідношення (6.11), отримаємо формулу для визначення невідомого опору

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}. \quad (6.14)$$

Таким чином, підбравши відповідну довжину «плечей» реохорда l_1 і l_2

і знаючи еталонний опір R , можна визначити і R_x .

6.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з еталонного опору R ; невідомих опорів (R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}), реохорда, гальванометра, джерела постійної напруги (1–1,5 В).

Схема (рис. 6.1) відповідає схемі лабораторної установки. В лабораторній установці невідомими опорами є три резистори R_{x1}, R_{x2}, R_{x3} . Дослідним шляхом визначаються опори кожного з них та опори при їх комбінованому послідовному і паралельному вмиканнях.

6.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис. 6.1) з резистором R_{x1} .
2. Увімкнути джерело живлення. Переміщуючи повзунок реохорда, встановити силу струму, що дорівнює нулю. Виміряти за шкалою реохорда довжину плечей l_1 і l_2 та занести результати до таблиці вимірювань (табл.6.1). Вимкнути джерело живлення.

Таблиця 6.1 – Результати вимірювань та розрахунків

Опір / з'єднання опорів	l_1 , мм	l_2 , мм	R , Ом	Перевірка R , Ом
R_{x1}				–
R_{x1}				–
R_{x3}				–
$R_{x1} + R_{x2}$				
$R_{x1} \parallel R_{x2}$				
$R_{x1} + R_{x2} + R_{x3}$				
$R_{x1} \parallel R_{x2} \parallel R_{x3}$				

3. За формулою (6.14) знайти невідомий опір. Результати занести до таблиці 6.1.

4. Від'єднати R_{x1} і під'єднати замість нього R_{x2} , а потім R_{x3} .

Виконати завдання пп. 2 та 3.

5. Під'єднати до клем a і c як невідомий опір R_x два резистори, що з'єднані паралельно, а потім послідовно. Виконати завдання пп.2 та 3.

6. Під'єднати до клем a і c як невідомий опір R_x три резистори R_{x1}, R_{x2}, R_{x3} , що з'єднані паралельно, а потім послідовно. Виконати завдання п. 2 та 3.

7. Знаючи значення опорів R_{x1}, R_{x2}, R_{x3} , визначити за теоретичними формулами опори при їх паралельному і послідовному вмиканнях. Результати занести до таблиці 6.1.

8. Знайти похибки методу вимірювань.

6.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірювань, розрахунок невідомих опорів R_{x1} , R_{x2} , R_{x3} , розрахунки опору при послідовному та паралельному з'єднанні резисторів, виконані за допомогою мостової схеми і за допомогою теоретичних формул, статистичну обробку результатів вимірювань, стислі висновки.

6.6 Контрольні запитання і завдання

1. Сформулювати і записати правила Кірхгофа.
2. Використовуючи правила Кірхгофа, вивести формулу невідомого опору.
3. Від чого залежить опір провідників?
4. Як визначається опір при послідовному та паралельному з'єднанні резисторів? Вивести відповідні формули.
5. При якому співвідношенні довжини «плечей» реохорда l_1 і l_2 похибка вимірювання R_x буде найменшою?
6. Які переваги має мостовий метод визначення опорів у порівнянні з використанням для цього амперметра та вольтметра?

7 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖАННЯ ТА РОЗРЯДЖАННЯ КОНДЕНСАТОРА

7.1 Мета роботи: дослідження закономірностей квазістаціонарних струмів на прикладі процесів заряджання та розряджання конденсатора.

7.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Конденсатор – система з двох чи більше провідників (обкладинок), розділених діелектриком, яка має здатність накопичувати електричні заряди. Зв'язок між електричним зарядом на одній із обкладок конденсатора q та різницею потенціалів між обкладками U визначається співвідношенням

$$q = UC.$$

Розглянемо процес заряджання конденсатора за схемою, наведеною на рис. 7.1.

Після замикання ключа K по колу піде струм заряджання I , на обкладках конденсатора з'являться та почнуть зростати із часом електричні заряди, які будуть однаковими за величиною та протилежними за знаком. Одночасно почне зростати і різниця потенціалів (напруга) між обкладками конденсатора U_C доки не сягне значення, яке дорівнює ЕРС джерела напруги \mathcal{E} . Знайдемо

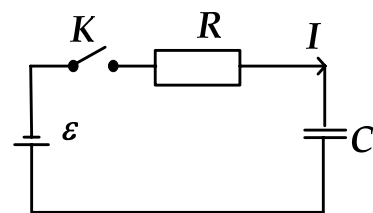


Рисунок 7.1

закон, за яким змінюються струм заряджання I із часом. Згідно з другим законом Кірхгофа [2–5] миттєві значення суми падіння напруги на резисторі U_R та на ємності U_C – дорівнюють миттєвому значенні ЕРС \mathcal{E} .

$$U_R + U_C = \mathcal{E}. \quad (7.1)$$

Але $U_R = IR$, $U_C = \frac{q}{C}$ тоді

$$IR + \frac{q}{C} = \mathcal{E}. \quad (7.2)$$

У рівняння (7.2) входять дві змінні величини: струм I та заряд q ; вони пов'язані між собою співвідношенням [2]:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (7.3)$$

Продиференціюємо (7.2) за часом, враховуючи те, що \mathcal{E} , R та C – сталі величини, отримуємо:

$$R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = 0. \quad (7.4)$$

Розділяючи змінні в (7.4) і враховуючи (7.3), знайдемо:

$$\frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC} dt. \quad (7.5)$$

Проінтегруємо праву частину рівняння (7.6) за часом від початку заряджання $t = 0$ до якогось моменту t , а ліву частину – за струмом від початкового струму I_0 до якогось значення I , отримуємо:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{t}{RC},$$

звідки

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.6)$$

У графічному вигляді залежність (7.5) зображена на рис. 7.2.

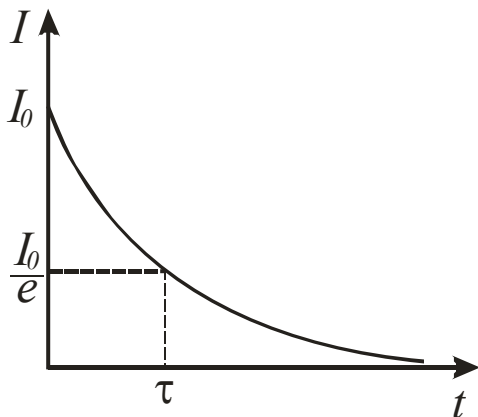


Рисунок 7.2

В момент часу $t = RC$ струм заряджання зменшується в e раз по відношенню до початкового струму. Цей час позначають τ та називають сталою часу або часом релаксації:

$$\tau = RC.$$

Напруга на конденсаторі U_C змінюватиметься із часом за законом:

$$U_C = \mathcal{E} - U_R = \mathcal{E} - I_R = \mathcal{E} - RI_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.7)$$

У початковий момент часу $t = 0$, напруга на конденсаторі $U_C = 0$. З цієї умови знайдемо струм I_0 :

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}.$$

Початковий струм I_0 тече такий, який протікав би по опорі R на схемі (рис. 7.1), коли б конденсатор C був короткозамкнений.

Підставляючи значення I_0 в (7.7), отримаємо:

$$U_C = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (7.8)$$

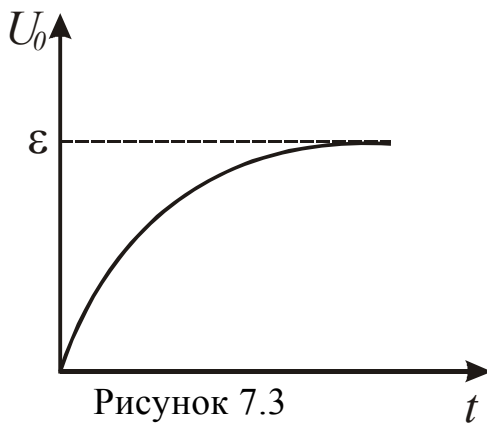


Рисунок 7.3

Залежність $U_C(t)$ зображена на рис. 7.3. За час $t = \tau = RC$ напруга на конденсаторі сягне $U_C = 0.63\varepsilon$.

Розглянемо розрядження конденсатора через опір R за схемою, яка зображена на рис. 7.4. Після замикання ключа K позитивний заряд з верхньої пластини переміщується на нижню. Знайдемо залежність струму розрядження від часу.

Сума падінь напруг на конденсаторі та резисторі дорівнює нулю тому, що в колі нема сторонніх сил.

$$U_C + U_R = 0, \quad (7.9)$$

$$\text{де } U_C = \frac{q}{C}, \quad U_R = IR.$$

Тоді

$$\frac{q}{C} + IR = 0.$$

Якщо про диференціювати останнє рівняння за часом та врахувати, що $\frac{dq}{dt} = I$ отримаємо

$$\frac{1}{C}I + \frac{dI}{dt}R = 0.$$

Розділяючи змінні, прийдемо до диференціального рівняння

$$\frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC}dt. \quad (7.10)$$

Інтегруючи це рівняння аналогічно рівнянню (7.5) визначимо

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.11)$$

Напруга на конденсаторі згідно з (7.9):

$$U_C = -IR = -RI_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.12)$$

I_0 знайдемо з умови, що в момент часу $I = 0$ напруга на конденсаторі $U_{0C} = -I_0 R$. Підставляючи це значення в (7.12), отримаємо:

$$U_C = U_{0C} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (7.13)$$

На рис. 7.5 зображена залежність струму розрядження та напруги на конденсаторі від часу.

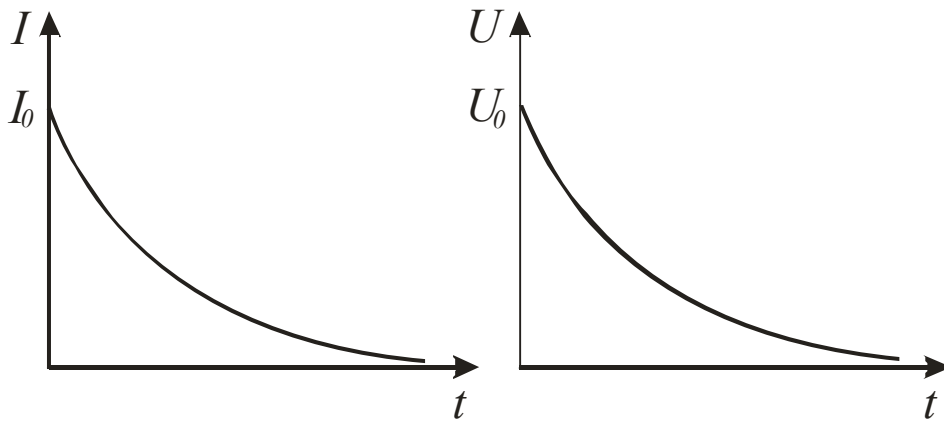


Рисунок 7.5

7.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з набору опорів: R_1, R_2, R_3, R_4, R , набору ємностей: C_1, C_2, C_3, C_4 , джерела регульованої постійної напруги 0–10 В; цифрового вольтметра В7–21А.

Електрична схема установки наведена на рис. 7.7.

Як вимірювальний прилад використовується універсальний вольтметр В7-21А. Час установлення показань приладу складає приблизно 0,6 с. При виконанні роботи ця величина вважається малою.

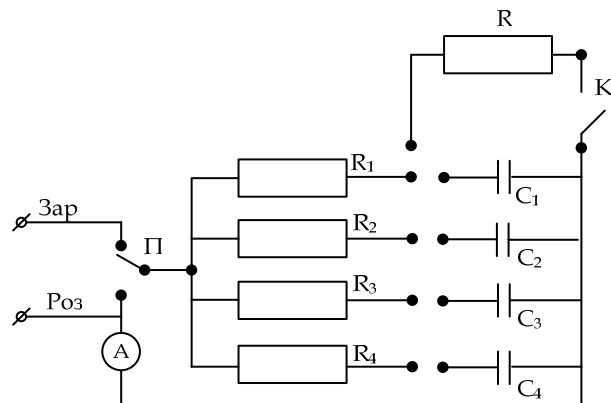


Рисунок 7.7

Джерелом живлення служить джерело з регульованою напругою від 0 до 10В. Ключ K_1 дає змогу швидко розрядити конденсатор.

7.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис. 7.8), підключивши R_1 , та C_1 . Зарядити конденсатор. Перемикач Π при цьому знаходиться у положенні «заряд».

2. Ввімкнути перемикач Π на розрядження. Одночасно почати відлік часу через кожні 5 або 10 секунд, записуючи значення струму, визначене приладом В7-21А. Провести 8 – 10 вимірів.

3. Повторити виміри $I(t)$, послідовно замінюючи ємність C_1 у схемі (рис. 7.8) на C_2, C_3, C_4 при незмінних опорі R_1 , та напрузі U .

Побудувати графіки $I(t)$.

4. Скласти схему (рис. 7.8), підключивши R_2 та C_2 .

Зняти залежність $I(t)$. Повторити вимірювання $I(t)$, послідовно замінюючи опори R_2 на, R_1, R_3, R_4 . Побудувати графіки $I(t)$.

Таблиця 7.1 – Результати вимірювань

t, c		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220
$I, \text{мкА}$	$R_1 C_1$																	
	$R_1 C_2$																	
	$R_1 C_3$																	
	$R_1 C_4$																	
	$R_2 C_3$																	
	$R_3 C_3$																	
	$R_4 C_3$																	

7.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірювань, зведені в таблицю; графіки залежностей $I(t)$; стислі висновки.

7.6 Контрольні запитання і завдання

1. Що називається ємністю відокремленого провідника?

2. Сформулювати закони Кірхгофа.

3. Запишіть формули залежності $I(t)$ і $U_C(t)$ при заряджанні конденсатора. Побудуйте графіки.

4. Запишіть формули залежності $I(t)$ і $U_C(t)$ при розряджанні конденсатора. Побудуйте графіки.

5. Що таке стала часу? Як її визначають із графіка $I(t)$?

8 ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА ТА СИСТЕМИ ДВОХ СОЛЕНОЇДІВ

8.1 Мета роботи: ознайомитися із законом Біо-Савара-Лапласа, дослідити магнітне поле контуру зі струмом і перевірити принцип суперпозиції магнітних полів на прикладі двох коротких соленоїдів.

8.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Індукцію магнітного поля B на осі кругового струму визначають на основі використання закону Біо-Савара-Лапласа і принципу суперпозиції магнітних полів [2–5]. Результат такого розрахунку для кругового струму призводить до співвідношення [2]:

$$B(x) = \mu_0 \frac{IR^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (8.1)$$

де R – радіус кругового струму;

μ_0 – магнітна стала;

I – сила струму;

x – відстань від центра кругового струму до точки M , яка знаходиться на осі кругового струму (рис. 8.1).

Індукція в центрі кругового струму ($x = 0$):

$$B(0) = B_0 = \mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (8.2)$$

З рис. 8.1 випливає

$$\sin \theta = \frac{R}{(R^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}}$$

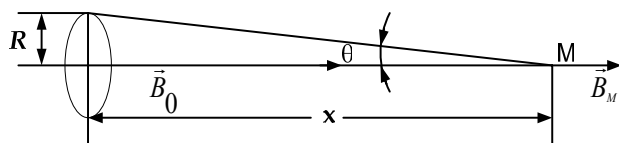


Рисунок 8.1

Тоді індукція магнітного поля в точці M має вигляд:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R} \sin^3 \theta = B_0 \sin^3 \theta. \quad (8.3)$$

Якщо соленоїд має довжину l і кількість витків N , індукція магнітного поля на осі соленоїда визначається алгебраїчною сумою індукцій магнітних полів, які створюються в точці M кожним круговим витком (принцип суперпозиції). Для обчислення індукції в точці M вважатимемо, що на ділянку довжини соленоїда dx приходить ndx витків, де n – число витків на одиницю до-

вжини соленоїда $n = \frac{N}{l}$. Тоді індукція магнітного поля в точці М, створена ділянкою соленоїда довжини dl , дорівнює

$$dB = B_0 \sin^3 \theta ndx. \quad (8.4)$$

Виразимо змінну x через кут θ . Із рис. 8.2 випливає, що

$$x = \frac{R}{\operatorname{tg} \theta}, \text{ звідки } dx = -\frac{R}{\sin^2 \theta} d\theta.$$

Тоді $dB = -nB_0 R \sin \theta d\theta$.

Інтегруючи це рівняння, отримаємо

$$B = -\int_{\theta_1}^{\theta} nB_0 R \sin \theta \cdot d\theta = nB_0 R (\cos \theta - \cos \theta_1).$$

Звичайно останнє співвідношення виражається через кути θ_1 і $\theta_2 = \pi - \theta_1$ (рис 8.3). Тоді, враховуючи формулу (8.2), модуль магнітного поля у точці М:

$$|B| = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2). \quad (8.5)$$

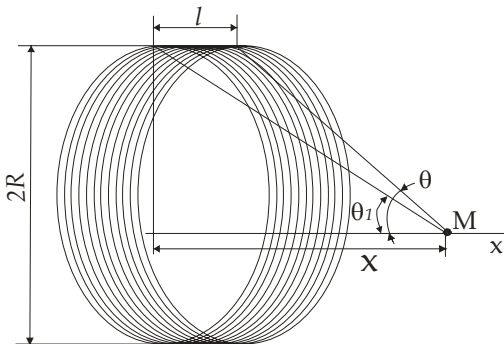


Рисунок 8.2

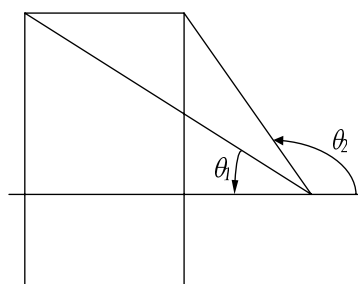


Рисунок 8.3

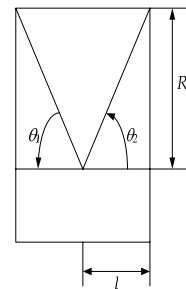


Рисунок 8.4

Індукція в центрі короткого соленоїда (рис.8.4) (коли $\theta_1 = \theta_2$) має вигляд:

$$B = \mu_0 n I \cos \theta_1.$$

Принцип суперпозиції магнітних полів можна перевірити експериментально, використовуючи також два коаксіальних коротких соленоїди (катушки Гельмгольца). Результирує поле в точці М (рис. 8.5) в цьому випадку визначається алгебраїчною сумою індукцій, що створені кожною катушкою окремо, а розподіл поля вздовж осі соленоїдів $B(x)$ визначатиметься сумою кривих $B_1(x)$ і $B_2(x)$, створених кожною катушкою окремо (рис. 8.6).

На рис. 8.6 проілюстрована суперпозиція полів, створених катушками Гельмгольца при протіканні струмів одного напрямку.

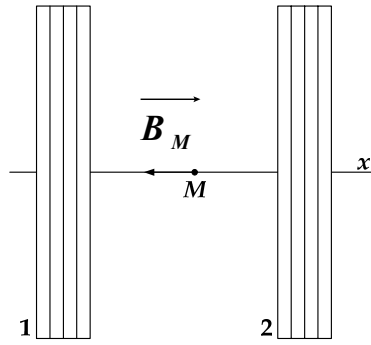


Рисунок 8.5

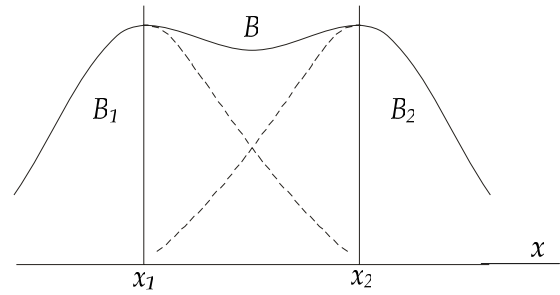


Рисунок 8.6

8.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з двох котушок, одна з яких нерухома, а друга може переміщуватись. Відстань між центрами котушок визначається за шкалою, розташованою на панелі. Вимірювальний датчик може переміщуватися вздовж осі соленоїда. Датчик вимірює індукцію магнітного поля. Принцип дії його заснований на явищі електромагнітної індукції. Змінний струм, що протікає по соленоїду, створює в навколишньому просторі змінне магнітне поле, яке збуджує в котушці датчика ЕРС індукції

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB}{dt}SN, \quad (8.6)$$

де S – площа перерізу котушки датчика; N – кількість витків, що дорівнює 1500;

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt}(B_m \cos \omega t) = -\omega B_m \sin \omega t.$$

Тоді

$$\varepsilon = \omega B_m SN \sin \omega t = 2\pi\nu B_m SN \sin \omega t, \quad (8.7)$$

де $\nu = 50$ Гц – частота мережі.

У зв'язку з тим, що вимірювання проводяться вольтметром, який показує ефективне значення напруги U_{ef} , а вхідний опір вольтметра дуже великий, можна записати, що

$$\varepsilon = U_m \sin \omega t = \sqrt{2}U_{ef} \sin \omega t. \quad (8.8)$$

Тоді із (8.7) з урахуванням (8.8) визначимо амплітудне значення індукції магнітного поля

$$B_m = \frac{U_{ef}}{\sqrt{2}\pi\nu SN} = k_1 U_{ef}, \quad (8.9)$$

де $k_1 = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\nu SN} = 0,513 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/мВ}$.

Під час використання осцилографа, який вимірює одразу U_m , потрібно користуватися наступною формулою:

$$B_m = \frac{U_m}{2\pi vSN} = k_2 U_m, \text{ де } k_2 = 0,363 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/ мВ} .$$

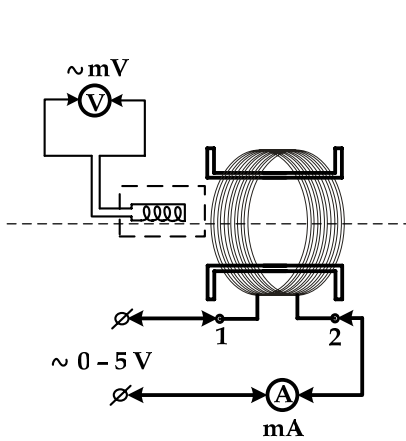


Рисунок 8.7

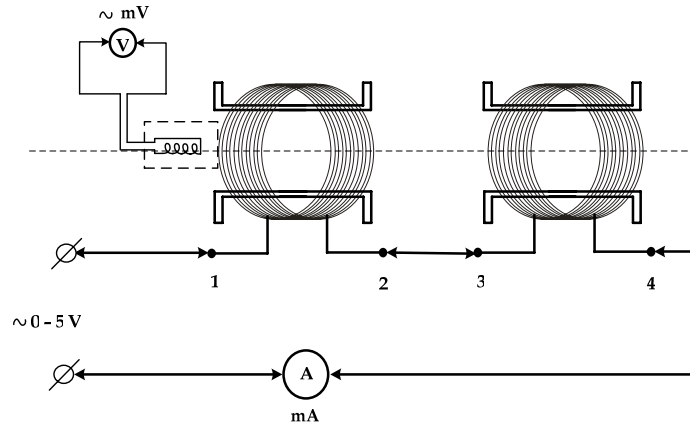


Рисунок 8.8

8.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис 8.7), використовуючи як соленоїд нерухому котушку K_1 . Встановити струм через соленоїд $I=200-250$ мА. За допомогою вимірювального датчика виміряти напругу U_0 , що відповідає індукції в центрі соленоїда B_0 . Переміщуючи зонд вздовж осі соленоїда, виміряти $B(x)$. Відстань x відрахувати за шкалою, розміщеною на стенді.

2. Побудувати графік $B(x)/B_0 = U/U_0 = f(x)$.

3. Перевірити правильність формули (8.3), для цього обчислити

$$\sin^3 \theta = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right)^3 \text{ і нанести на попередній графік. Зробити висновок.}$$

4. Встановити другу котушку на відстані, що дорівнює радіусу котушки K , від першої. Під'єднати другу котушку до джерела і повторити попередні вимірювання. Струм, який проходить через котушку, має бути таким же, як і в попередніх вимірюваннях. Побудувати графік $B/B_0 = f(x)$, на який нанести вимірювання для кожної з двох котушок.

5. З'єднати обидві котушки послідовно і під'єднати їх до джерела струму (рис. 8.8). Встановити струм через котушки такий же, як і раніше. Переміщуючи датчик вздовж осі соленоїдів, зняти розподіл $B(x)$. Визначити $B(x)/B_0$ і нанести результати на попередній графік. Довести, що принцип суперпозиції виконується.

8.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірювань, зведені в таблиці, графіки залежностей $B/B_0 = f(x)$ для першої, другої і двох котушок; стислі висновки.

8.6 Контрольні запитання і завдання

1. Записати і пояснити закон Біо- Савара-Лапласа.
2. В чому суть принципу суперпозиції для індукції магнітного поля?
3. Вивести формули 8.1, 8.5, 8.9.
4. Сформулювати закон електромагнітної індукції.
5. Пояснити спосіб вимірювання електромагнітної індукції.

9 ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЯВИЩ НА ОСНОВІ ДОВГОГО СОЛЕНОЇДА

9.1 Мета роботи: дослідити магнітне поле довгого соленоїда. Перевірити виконання закону повного струму для довгого соленоїда. Визначити магнітну сталу.

9.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Згідно з законом повного струму циркуляція вектора \vec{B} вздовж довільного замкненого контуру дорівнює добутку магнітної сталої μ_0 на алгебраїчну суму струмів, охоплених цим контуром [2-5]:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^{\eta} I_i, \quad (9.1)$$

де η – число провідників зі струмами, охоплених контуром L довільної форми.

Визначимо індукцію магнітного поля довгого соленоїда. Розглянемо соленоїд довжиною l , з кількістю витків N і струмом у витках I .

Нехай довжина соленоїда l є набагато більшою за його діаметр D , тобто можна вважати соленоїд нескінченно довгим. Тоді всередині соленоїда магнітне поле є однорідним, зовні – дуже слабким (рис. 9.1), яким можна знехтувати.

Для знаходження модуля вектора магнітної індукції B розглянемо контур $ABCD$ (рис.9.1). За формулою (9.1) маємо

$$\oint_{ABCD} B_l dl = \mu_0 NI,$$

де $B_l = (\vec{B}, \vec{\tau})$, $\vec{\tau}$ – орт вектора $d\vec{l}$.

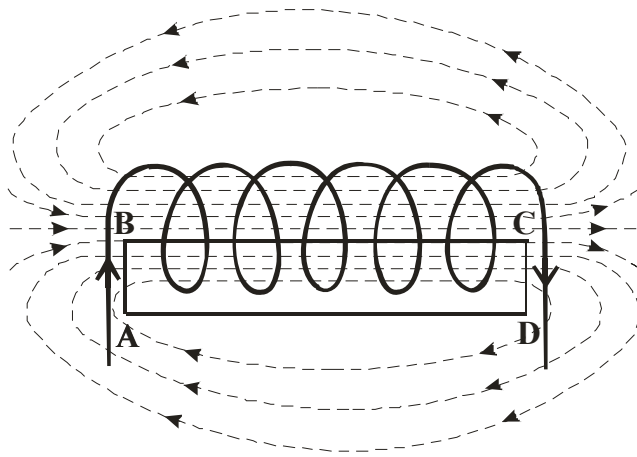


Рисунок 9.1

Інтеграл по замкненому контуру можна розглядати як суму чотирьох інтегралів

$$\oint_{ABCD} B_l dl = \int_{AB} B_l dl + \int_{BC} B_l dl + \int_{CD} B_l dl + \int_{DA} B_l dl .$$

На ділянках AB і CD $B_l = 0$ ($\vec{B} \perp d\vec{l}$), на ділянці DA (зовні соленоїда) $B \approx 0$, а на ділянці BC :

$$\int_{BC} B_l dl = B_0 l ,$$

де B_0 – магнітна індукція всередині соленоїда.

Звідси маємо

$$\oint_{ABCD} B_l dl = B_0 l = \mu_0 NI .$$

Отже, величина магнітної індукції поля всередині нескінченно довгого соленоїда дорівнює

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I , \quad (9.2)$$

де $n = \frac{N}{l}$ – лінійна густина витків соленоїда.

Реальні соленоїди завжди мають скінчену довжину. Відомо, що індукція магнітного поля на осі короткого соленоїда визначається за допомогою закону Біо-Савара-Лапласа [2–5]. Результат такого розрахунку має вигляд

$$B(x) = \frac{1}{2} B_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{(l+2x)^2}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{(l-2x)^2}}} \right) . \quad (9.3)$$

Зрозуміло, що при $D \ll l$ маємо $B(x) \approx B_0$, що відповідає довгому соленоїду.

9.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з довгого соленоїда з вимірювачем магнітної індукції, регульованого джерела змінної напруги, амперметра змінного струму, мілівольтметра змінного струму або осцилографа.

9.3.1 Соленоїд

Соленоїд складається із двох обмоток, навитих одночасно двома дротами діаметром $d = 1$ мм на циліндричний каркас. Одна обмотка E_1 , що складається з 190 витків, має тільки крайні виводи на лицьовій панелі.

Друга обмотка E_2 , повна кількість витків якої також 190, має проміжні відведення, кількість витків в яких по відношенню до середини соленоїда вигравірувано на панелі. Діаметр намотки $D = 50$ мм, довжина намотки $L = 206$ мм. На панель нанесена також сантиметрова шкала, яка дозволяє визначити довжину соленоїда при використанні відповідного виведення. Ці відстані наведені також у табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Параметри обмотки E_2 .

Номери виведень, i	Довжина соленоїда l_i , мм	N , кількість витків
1	10,8	10
2	21,6	20
3	43,2	40
4	64,8	60
5	108	100
6	151,2	140
7	206	190

9.3.2 Вимірювач магнітної індукції

Для вимірювання магнітної індукції використовується зонд, який являє собою котушку, що має $N = 1500$ витків. Середній радіус намотки $r = 8,5$ мм. Котушка закріплена на держаківі, що має шкалу з сантиметровими поділками для визначення положення зонда x відносно середини соленоїда. Принцип дії зонда базується на явищі електромагнітної індукції [2–5]. Відповідно до нього електрорушійна сила, що виникає у зонді при зміні магнітного потоку Φ через його площу поперечного перерізу S , дорівнює

$$\varepsilon = -W \frac{d\Phi}{dt} = -WS \frac{dB}{dt}. \quad (9.4)$$

У зв'язку з тим, що індукція B усередині соленоїда, по якому протікає змінний струм, змінюється за гармонічним законом $B = B_m \cos \omega t$, то співвідношення (9.4) набуває вигляду

$$\mathcal{E} = WS B_m \omega \sin \omega t. \quad (9.5)$$

При вимірюванні напруги приладом з великим вхідним опором можна вважати, що $\mathcal{E} = U = U_m \sin \omega t$, де кутова частота коливань ω пов'язана з лінійною частотою ν співвідношенням $\omega = 2\pi\nu$. Тоді формула (9.5) набуває вигляду

$$B_m = \frac{U_m}{WS 2\pi\nu}.$$

Під час використання вольтметрів змінної напруги необхідно враховувати, що вони проградуйовані в ефективних значеннях напруги U_{ef} . У цьому випадку $U_m = \sqrt{2}U_{ef}$. Тоді

$$B_m = \frac{\sqrt{2}U_{ef}}{WS 2\pi\nu}. \quad (9.6)$$

Під час використання осцилографів для вимірювання напруги визначається безпосередньо U_m .

$$B_m = \frac{U_m}{2\pi\nu SW} = kU_m, \quad (9.7)$$

де $k = 0.363 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} / \text{ мВ}$.

9.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

9.4.1 Вивчення магнітного поля всередині довгого соленоїда

1. Скласти схему (рис.9.2). підключивши $N=10$ витків обмотки E_2 .

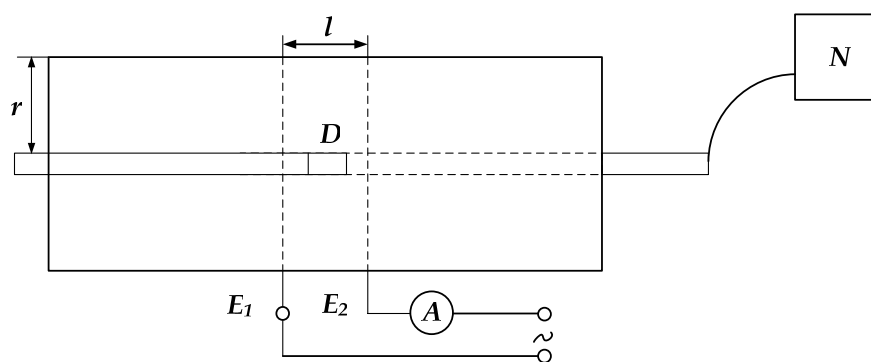


Рисунок 9.3

2. Встановити зонд у центрі соленоїда, використовуючи для цього шкалу на держаку зонда. Встановивши струм у колі $I = 250$ мА, виміряти напругу на клеммах зонда.

3. Повторити вимірювання, послідовно підключаючи 20, 40, 60, 100, 140 та 190 витків обмотки E_2 . Визначити індукцію магнітного поля у центрі соле-

ноїда, скориставшись формулою (9.6) або (9.7) в залежності від використаного вимірювального пристрою.

4. Побудувати графік залежності індукції у центрі соленоїда від довжини соленоїда $B_0 = f(l)$, отримавши величину l з табл. 9.1. З побудованого графіка знайти, при якому співвідношенні довжини соленоїда l до його діаметра D соленоїд можна вважати нескінченно довгим.

9.4.2 Визначення магнітної сталої μ_0

1. Скласти схему, наведену на рис. 9.2, підключивши повну довжину намотки соленоїда E_2 .

2. Зняти залежність індукції B_0 у центрі соленоїда від сили струму I , який протікає по обмотці соленоїда. Побудувати графік залежності $B_0 = f(I)$.

3. З'єднати обмотки E_1 та E_2 послідовно та повторити попередні вимірювання. Нанести одержані дані на графік $B_0 = f(I)$.

4. Переконайтеся у тому, що індукція у центрі соленоїда B_0 пропорційна числу витків на одиницю довжини n , тобто $B \sim nI$.

5. З одержаних залежностей $B_0(I)$ визначити коефіцієнт пропорційності a між B_0 та nI

$$a = \frac{B}{nI}.$$

6. Порівняти одержані значення a з магнітною сталою μ_0 .

9.4.3 Визначення залежності індукції B від положення точки на осі соленоїда

1. Скласти схему рис. 9.2, підключивши 100 витків обмотки E_2 .

2. Встановити струм у колі ≈ 200 мА.

3. Переміщуючи зонд вздовж осі соленоїда, зняти залежність індукції $B(x)$.

4. Побудувати графічно залежність $B(x)/B_0 = f_e(x)$ на основі проведених вимірювань.

5. Обчислити та нанести на той же графік теоретичну залежність

$$f_m(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{(l+2x)^2}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{(l-2x)^2}}} \right).$$

Порівняти експериментальну та теоретичну залежності.

9.5 Зміст звіту

Звіт повинен містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірювань, графіки залежностей $B_0(l)$, $B_0(I)$, $B/B_0 = f(x)$, резуль-

тати розрахунку магнітної сталої μ_0 , короткі висновки.

9.6 Контрольні запитання і завдання

1. Сформулювати закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Сформулювати закон повного струму.
3. Вивести формулу для індукції магнітного поля у центрі нескінченно довгого соленоїда.
4. Пояснити, яким чином було знайдено числове значення μ_0 .
5. Вивести формулу для індукції магнітного поля на осі колового струму.
6. Вивести співвідношення 9.6.
7. За яких умов соленоїд можна вважати нескінченно довгим?

10 ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

10.1 Мета роботи: дослідити рух зарядженої частинки у взаємо перпендикулярних електричному і магнітному полях.

10.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

У даній роботі відношення e/m для електрона визначається за допомогою методу, який отримав назву «метод магнетрона». Ця назва пов'язана з тим, що конфігурація електричного і магнітного полів, яка використовується в роботі нагадує конфігурацію полів у магнетронах – генераторах електромагнітних коливань в області надвисоких частот.

Рух електронів в цьому випадку відбувається в кільцевому просторі, розташованому між катодом і анодом двохелектродної електронної лампи. Нитка розжарювання (катод) розміщується вздовж осі циліндричного аноду таким чином, що напруженість електричного поля напрямлена вздовж радіусу (рис. 10.1). Лампа розміщується всередині соленоїда, який створює магнітне поле, вектор індукції якого паралельний осі катоду. Розглянемо траєкторію електронів, які рухаються під дією електричного і магнітного полів. Вважатимемо, що початкова (теплова) швидкість електрона, який вилетів із катода, дорівнює нулю.

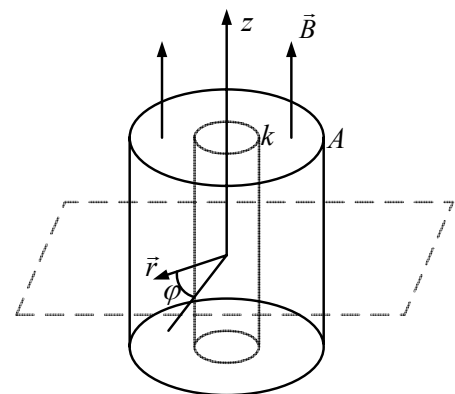


Рисунок 10.1

Тоді за заданої орієнтації електричного і магнітного полів рух електрона відбуватиметься в площині, перпендикулярній магнітному полю. Скористаємося полярною системою координат. У цьому випадку положення точки

визначається відстанню від осі циліндра r , полярним кутом φ і зсувом вздовж осі Z . Розглянемо спочатку сили, які діють на електрон збоку електричного поля. Напруженість електричного поля у циліндричному конденсаторі має тільки радіальну компоненту E_r . Тому сила, яка діє на електрон в такому полі спрямована по радіусу, так що

$$F_r^{\text{эл}} = eE_r, \quad F_z^{\text{эл}} = F_\varphi^{\text{эл}} = 0. \quad (10.1)$$

Розглянемо тепер сили, які діють на електрон з боку магнітного поля. Оскільки магнітне поле у нашому випадку спрямовано по осі Z , для проекції сили на вісь Z маємо:

$$F_z^{\text{маг}} = 0. \quad (10.2)$$

Інші дві складові сили знайдемо за допомогою формули Лоренца:

$$F_\varphi^{\text{маг}} = -ev_r B, \quad F_r^{\text{маг}} = ev_\varphi B. \quad (10.3)$$

З простих кінематичних міркувань зрозуміло, що

$$v_r = \dot{r} = \frac{dr}{dt}, \quad v_\varphi = r\dot{\varphi} = r \frac{d\varphi}{dt}. \quad (10.4)$$

Таким чином, ні магнітні, ні електричні сили, які діють на електрон, не мають складових по осі Z . Рух вздовж осі Z є рівномірним. Рух в площині (r, φ) зручно описати за допомогою рівняння моментів:

$$\frac{dL}{dt} = M_z, \quad (10.5)$$

де L – момент імпульсу електрона відносно осі Z , який дорівнює, як відомо, $mr^2\dot{\varphi}$. Величина M_z дорівнює rF_φ . За допомогою (10.1) і (10.3) знайдемо:

$$M_z = -erv_r B. \quad (10.6)$$

Після підстановки (10.4) і (10.6) у (10.5) знайдемо:

$$\frac{d}{dt}(mr^2\dot{\varphi}) = -eBr \frac{dr}{dt} = -\frac{1}{2}eB \frac{d(r^2)}{dt}. \quad (10.7)$$

Після інтегрування рівняння (10.7) і урахування негативного заряду електрона буде:

$$r^2\dot{\varphi} + C = |e|Br^2/2m, \quad (10.8)$$

де C – стала інтегрування, яку потрібно визначити з початкових умов. На початку руху радіус r дорівнює радіусу катода і є досить малим. Права частина (10.8) і перший член лівої частини також дуже малі. З достатньою точністю можна припустити, що $C=0$. Тоді рівняння матиме простий вигляд:

$$\dot{\varphi} = |e|B/2m. \quad (10.9)$$

Розглянемо тепер рух електрона вздовж радіусу. Робота сил електричного поля, яка виконується при переміщенні електрона від катода до точки з потенціалом U , дорівнює $A=eU$. Магнітне поле ніякої роботи не виконує. Знайдена робота має дорівнювати кінетичній енергії електрона (початковою швидкістю електрона ми знову нехтуємо):

$$eU = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(v_r^2 + v_\phi^2)}{2}.$$

За допомогою (10.4) і (10.9) знаходимо:

$$eU = \frac{m}{2} \left[\dot{r}^2 + \left(\frac{reB}{2m} \right)^2 \right]. \quad (10.10)$$

Рівняння (10.10) визначає радіальний рух електрона.

Далі розглядаємо траєкторію електронів, які вилетіли із катода при анодній напрузі U_a . За відсутності магнітного поля (рис. 10.2) електрони рухаються прямолінійно вздовж радіуса. В слабкому полі траєкторія трохи викривляється, але електрон досягає анода. При збільшенні магнітного поля траєкторія викривляється настільки, що стає дотичною до анода. Це поле називається критичним $B_{кр}$.

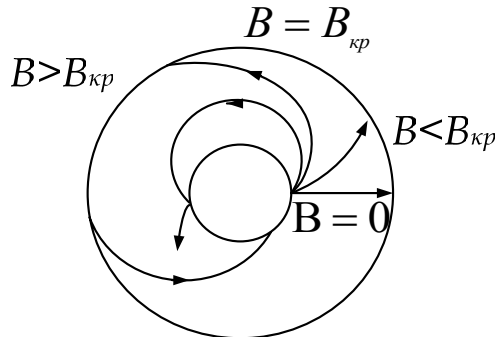


Рисунок 10.2

У випадку $B > B_{кр}$ електрон не потрапляє на анод і повертається до катода. Знайдемо величину $B_{кр}$ із співвідношення (10.8), звернувши увагу на те, що в цьому випадку радіальна швидкість електрона \dot{r} при $r = r_a$ перетвориться на нуль:

$$U_a = \frac{eB_{кр}^2 r_a^2}{8m}, \quad (10.11)$$

звідки

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}. \quad (10.12)$$

Із формули (10.12) знаходимо e/m , якщо при заданому U_a визначене таке значення магнітного поля (або навпаки, при заданому B таке значення U_a), при якому електрони перестають попадати на анод.

Приведені математичні вирази зроблені за умов, коли всі електрони залишають катод з початковою швидкістю, що дорівнює нулю. Як впливає із (10.12), в цьому випадку при $B < B_{кр}$ всі електрони без винятку потрапляли б на анод, а при $B > B_{кр}$ всі б вони поверталися на катод, не досягнувши анода. Анодний струм I_a із збільшенням магнітного поля змінювався б при цьому

так, як це зображено на рис.10.3 пунктирною лінією. Але насправді електрони, які випускає катод, мають різні початкові швидкості. Тому критичні умови для різних електронів досягаються при різних значеннях B . Крива $I_a(B)$ набуває внаслідок цього вигляд похилої безперервної лінії (рис. 10.3).

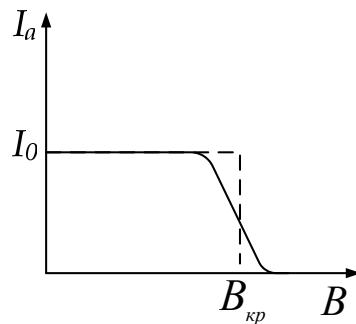


Рисунок 10.3

10.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з вакуумного діоду з циліндричним анодом (1), соленоїда (2), мікроамперметра (3), міліамперметра (4), змінного резистора, вольтметра для вимірювання постійної напруги до 3 В, регульованого джерела живлення. Принципова електрична схема установки зображена на рис. 10.4.

Обмотка соленоїда підключена до блоку живлення з регульованою напругою. Індукція магнітного поля всередині соленоїда без осердя прямо пропорційна силі струму, який протікає по обмотці $B = DI_c$. Значення коефіцієнта пропорційності D наведено на робочому місці.

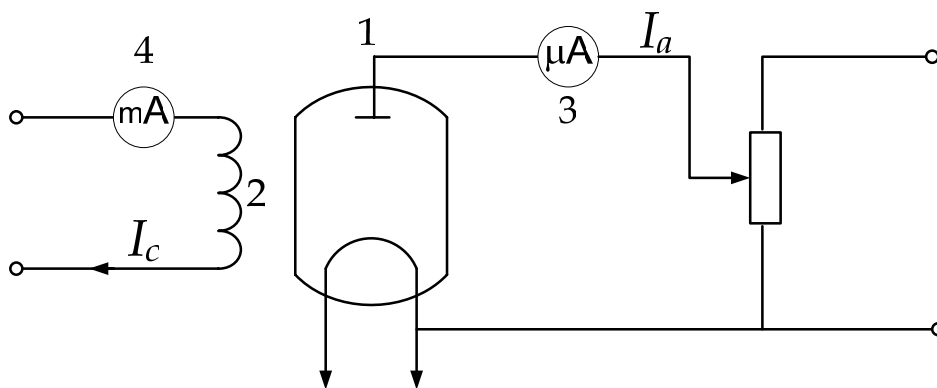


Рисунок 10.6

10.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис. 10.6) і зняти залежність анодного струму від струму, який протікає через соленоїд $I_a = f(I_c)$, для декількох значень анодної напруги. Результати занести в таблицю 10.1.

Таблиця 10.1 – Результати вимірювань

U=1В	I_c, mA								
	$I_a, \mu\text{A}$								
U=2В	I_c, mA								
	$I_a, \mu\text{A}$								
U=3В	I_c, mA								
	$I_a, \mu\text{A}$								

Побудувати графіки залежності $I_a = f(I_c)$.

2. Із графіків визначити значення $B_{кр}$. Вибір критичного значення струму, що протікає соленоїдом ($B_{кр} = DI_{кр}$) звичайно відбувається на ділянці з найбільшим нахилом. Інколи вважають, що $I_{кр}$ дорівнює тій величині струму соленоїда, яка на графіку відповідає до $0,85I_0 \cdot I_0$ – значення анодного струму при $I_c = 0$. Результати занести до таблиці 10.2.

Таблиця 10.2 – Результати розрахунків

U, В	$I_0, \mu\text{A}$	$I_{кр}, \text{mA}$	$B_{кр}, \text{Тл}$
1			
2			
3			

3. Побудувати графік залежності $B_{кр}^2$ від U.

4. За допомогою графіка $B_{кр}^2 = f(U)$ обчислити значення питомого заряду електрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8}{r_a^2} \frac{(U_2 - U_1)}{(B_{кр2}^2 - B_{кр1}^2)}$$

Знайти абсолютну та відносну похибки.

10.5 Зміст звіту

Зміст має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірів у вигляді таблиць, графіки залежностей $I_a = f(I_c)$ та $B_{кр}^2 = f(U)$, результат розрахунку питомого заряду електрона, абсолютної та відносної похибок, стислі висновки.

10.6 Контрольні запитання і завдання

1. Що таке сила Лоренца?
2. Як визначити напрямок сили Лоренца?
3. Записати рівняння руху електрона в електромагнітному полі.

4. Як визначають критичні значення сили струму соленоїда?
5. Вивести робочу формулу для визначення e/m .
6. Що таке критичне поле $B_{кр}$?
7. Чи виконує роботу сила Лоренца?

11 ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ДО ЙОГО МАСИ МЕТОДОМ ФОКУСУВАННЯ ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ ПОДОВЖНІМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

11.1 Мета роботи: дослідити рух заряджених частинок у магнітному полі, визначити питомий заряд електрона e/m , поперечну та продольну складові його швидкості.

11.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

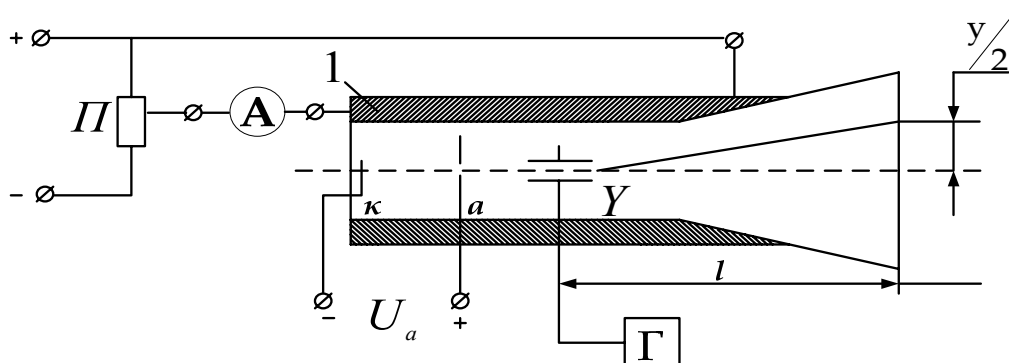
У лабораторній роботі використовується осцилографічна електронно-променева трубка (ЕПТ) (рис.11.1), у якій створюється вузький пучок електронів, що мають однакову подовжню швидкість $V_{||}$. Ця швидкість обумовлюється анодною напругою U_a , зарядом електрона e та його масою m і визначається із закону збереження енергії:

$$eU_a = \frac{mV_{||}^2}{2},$$

$$V_{||} = \sqrt{2U_a e/m}. \quad (11.1)$$

При сталих значеннях U_a та відомій відстані l (рис.11.1) час руху електрона до екрана:

$$t = \frac{l}{V_{||}}. \quad (11.2)$$



Γ – генератор; Π – потенціометр; A – амперметр; 1 – соленоїд; κ – катод; a – анод; l – відстань від пластин Y до екрана; Y – вертикально відхиляючі пластинки

Рисунок 11.1

Максимальне значення поперечної складової V_{\perp} швидкості електрона в ЕПТ та розмах коливань на екрані ($y/2$) визначаються амплітудним значенням напруги коливань, що подаються від генератора G (рис.11.1) на вертикально відхиляючі пластини Y .

За допомогою соленоїда 1, надітого на трубку (рис.11.1), створюється подовжнє магнітне поле, що діє на заряджену частинку з силою Лоренца [2–5]:

$$\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}]$$

і створює доцентрове прискорення

$$eV_{\perp}B = \frac{mV_{\perp}^2}{r}.$$

Радіус траєкторії обертального руху електрона визначається величинами V_{\perp} та B :

$$r = \frac{mV_{\perp}}{eB}. \quad (11.3)$$

Період обертання електрона $T = \frac{2\pi r}{V_{\perp}}$. Підставивши в це рівняння значення r з (11.3), отримаємо:

$$T = \frac{2\pi m}{eB}. \quad (11.4)$$

Кутова швидкість обертання електрона

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{e}{m}B.$$

Усі електрони з однаковою швидкістю V_{\parallel} за час T зроблять один оберт та зберуться (сфокусуються) в одній точці.

За допомогою соленоїда 1, надітого на трубку (рис. 11.3), створимо спочатку слабе подовжнє магнітне поле. При малому значенні індукції B вертикальна лінія повернеться на екрані на деякий кут $\varphi = \omega t$, де ω залежить тільки від B . Збільшуючи струм у соленоїді, ми збільшуємо індукцію B магнітного поля, кут повороту φ зростатиме, а радіус обертального руху електрона r зменшуватиметься. При деякому значенні індукції $B = B_{\varphi}$ кут повороту досягає 180° і пряма лінія стягнеться у точку на екрані.

Відповідне значення магнітної індукції визначається за формулою:

$$B_{\varphi} = \mu_0 I_{\varphi} N / L, \quad (11.5)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна стала;

N – кількість витків соленоїда;

L – довжина соленоїда;

I_{φ} – значення струму через соленоїд, при якому розмах коливань на екрані ЕПТ зменшується до нуля.

Визначивши величину B_ϕ , при якій настає фокусування електронного пучка, можна знайти питомий заряд електрона e/m . Прирівняємо значення t з (11.2) та T з (11.4) і підставимо туди значення $V_{||}$ з (11.1) та B_ϕ з (11.5):

$$\frac{l}{V_{||}} = \frac{2\pi t}{eB_\phi},$$

$$\frac{l}{\sqrt{2U_a e/m}} = \frac{2\pi t}{e\mu_0 I_\phi N/L},$$

звідки

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a L^2}{l^2 \mu_0^2 I_\phi^2 N^2}. \quad (11.6)$$

11.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з осцилографа з соленоїдом, надітим на ЕПТ, регульованого джерела постійної напруги (0–60В), міліамперметра постійного струму, з'єднувальних проводів, генератора низької частоти.

Схема лабораторної установки наведена на рис. 11.1. Соленоїд 1 має довжину L та число витків проводу N . На прискорювальний анод трубки подається напруга $U_a = 1200\text{В}$. З генератора G синусоїдальних напруг подається на вхід Y осцилографа невелика змінна напруга, яка формує на екрані вертикальну лінію довжиною 1–2см. Відстань від вертикально відхиляючих пластин трубки до екрана $l = 75$ мм. Сила струму у соленоїді регулюється потенціометром P , а визначається по амперметру A . Кількість витків соленоїда вказано на робочому місці.

11.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис. 11.1). Виміряти довжину соленоїда L .
2. Увімкнути осцилограф та одержати у центрі екрана чітке зображення світлової плями.
3. Увімкнути генератор та подати на відхиляючі пластини змінну напругу невеликої частоти так, щоб на екрані з'явилася вертикальна лінія довжиною 1см.
4. Увімкнути живлення соленоїда і, підвищуючи силу струму, одержати на екрані осцилографа фокусування електронного променя подовжнім магнітним полем (пряма лінія стягується у точку на екрані). Записати силу струму фокусування I_ϕ .
5. Вимкнути живлення соленоїда. Збільшити довжину вертикальної лінії на екрані на 0,5см, а потім на 1см і повторити двічі завдання п. 4.

Значення довжини у вертикальних ліній та струму фокусування записати у таблицю вимірювань (табл. 11.1).

Таблиця 11.1 – Результати вимірювань і розрахунків

y_i , м	I_ϕ , А	e/m , Кл/кг	$V_{//}$, м/с	V_{\perp} , м/с

6. Знайти e/m за формулою (11.10) для кожного значення I_ϕ та занести результати у таблицю, обчислити середнє значення e/m . Порівняти одержане значення з відомим. Знайти відносну та абсолютну похибки.

7. За формулою (11.6) визначити подовжню складову швидкості електрона $V_{//}$ для середнього значення відношення e/m .

8. Із співвідношення

$$\frac{V_{\perp}}{V_{//}} = \frac{y/2}{l}$$

знайти приблизні значення вертикальних швидкостей для всіх значень y та занести їх до таблиці 11.1

11.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірів і розрахунків у вигляді таблиці, обчислення похибки, стислі висновки.

11.6 Контрольні запитання і завдання

1. Яка сила діє на заряд, що рухається в магнітному полі?
2. Як визначити напрямки сили Лоренца, що діє на електрон, який рухається зі швидкістю \vec{V} ?
3. Чому сила Лоренца не діє на подовжню складову швидкості?
4. Чому сила Лоренца не здійснює роботи по переміщенню заряду?
5. Пояснити принцип фокусування електронного пучка подовжнім магнітним полем.
6. Одержати формулу (11.6) для обчислення відношення e/m .

12 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА САМОІНДУКЦІЇ

12.1 Мета роботи: дослідити явище самоіндукції, яке виникає при змінах сили струму в котушці, вивчити закон Фарадея для самоіндукції.

12.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

За будь-якої зміни сили струму в контурі змінюватиметься і магнітний потік Φ , який пронизує контур. За законом індукції Фарадея зміна магнітного

поток викликає появу ЕРС індукції [2–5]:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (12.1)$$

Знак мінус показує, що ЕРС завжди спрямована таким чином, щоб протидіяти зміні струму в контурі – правило Ленца [2].

У відповідності до закону Біо-Савара-Лапласа [2–5] магнітна індукція пропорційна силі струму, який створює магнітне поле. Звідки випливає, що струм в контурі i та створюваний ним магнітний потік Φ через контур пропорційні один одному:

$$\Phi = Li. \quad (12.2)$$

Коефіцієнт пропорційності L між силою струму і магнітним потоком називається індуктивністю контуру.

Підставивши (12.2) в закон індукції (12.1), знайдемо ЕРС самоіндукції, яка виникає при змінах струму в контурі:

$$\varepsilon_C = -\frac{d(Li)}{dt} = -\left(L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}\right). \quad (12.3)$$

Якщо L при змінах сили струму залишається сталою або змінюється незначно і сила струму в контурі мала за величиною, то ЕРС індукції залежатиме від швидкості зміни сили струму di/dt і від величини індуктивності:

$$\varepsilon_C = -L\frac{di}{dt}. \quad (12.4)$$

Розглянемо, як змінюватиметься струм в колі, зображеному на рис. 12.1, при вмиканні і вимиканні ЕРС ε . Перемикач Π в положенні 1 підключає батарею ε до котушки з індуктивністю L і опором R . За законом Ома для неоднорідного кола [2–5]:

$$i = \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{R}.$$

Звідки маємо таке рівняння:

$$iR = \varepsilon + \varepsilon_C = \varepsilon - L\frac{di}{dt}. \quad (12.5)$$

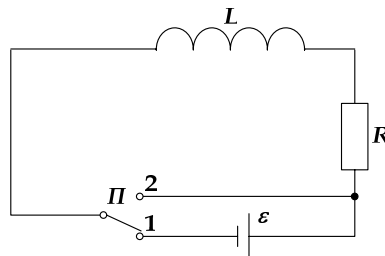


Рисунок 12.1

Після замикання ключа Π у положення 1 відбудеться зміна струму Δi в котушці за час його вмикання Δt . Миттєва зміна струму di/dt додатна і, як випливає з рівняння (12.5), струм в колі повільно збільшуватиметься до встанов-

леного значення i_0 . Збільшенню струму перешкоджає ЕРС самоіндукції. Через деякий проміжок часу di/dt дорівнюватиме нулю, в колі встановиться постійний струм $i_0 = \mathcal{E}/R$. Значення струму в будь-який момент часу можна знайти, розв'язавши диференціальне рівняння (12.5). Розв'язком цього рівняння для початкових умов ($i_0 = 0$ при $t = 0$) буде функція

$$i = i_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (12.6)$$

Графік цієї функції зображений на рис. 12.2 (крива 1).

Розглянемо тепер, що відбудеться в контурі, якщо розімкнути ключ після того, як в колі встановиться струм i_0 . Струм за час розмикання Δt зменшиться до нуля, di/dt і ЕРС самоіндукції при $\Delta t \rightarrow 0$ прямуватимуть до мінус нескінченності.

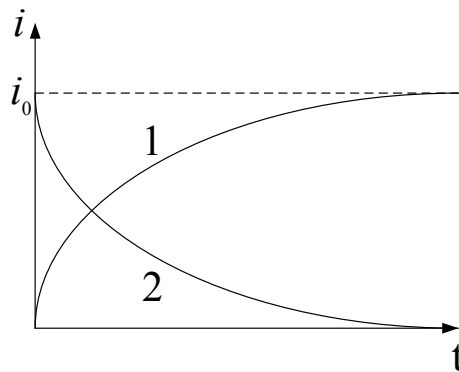


Рисунок 12.2

Щоб обмежити індуктивний струм, у схемі (рис. 12.1) котушка замикається накоротко перемикачем Π в положенні 2 і одночасно відключається батарея. Контур (рис. 12.1) тепер описується рівнянням

$$iR = \mathcal{E}_C = -L \frac{di}{dt}. \quad (12.7)$$

Перепишемо це рівняння таким чином

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L}i = 0. \quad (12.8)$$

Якщо $t = 0$, $i_0 = 0$, то розв'язком цього лінійного однорідного диференціального рівняння 1-го порядку буде функція

$$i = i_0 e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (12.9)$$

Отже, після відключення джерела ЕРС сила струму в колі не перетворюється миттєво в нуль, а зменшується за експоненціальним законом. Графік функції (12.9) зображено на рис. 12.2 (крива 2).

Із рівняння (12.9) випливає, що чим більша індуктивність кола L і мен-

ший його опір R , тим повільніше зменшується струм.

Підставивши (12.9) до (12.4), знайдемо закон ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon_C = -L \frac{di}{dt} = Ri_0 e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (12.10)$$

Із співвідношення (12.10) можна зробити висновок про те, що коли опір кола R_i одразу після його розмикання дуже великий (і значно перевищує опір R котушки), то ЕРС самоіндукції сягає дуже великих значень. У нашій схемі перемикач із положення 1 в положення 2 відбувається немиттєво, отже, протягом малого часу перемикач опір кола стає дуже великим ($R_i \rightarrow \infty$, коли коло розімкнено), і ЕРС може досягати дуже великої величини.

12.3 Опис лабораторної установки

Схема установки наведена на рис. 12.3.

На схемі зображена котушка з індуктивністю L і опором R , розміщена в Ш-подібне замкнуте стальне осердя, газорозрядна лампа Л МГХ-90, перемикач П, кнопка "Кн".

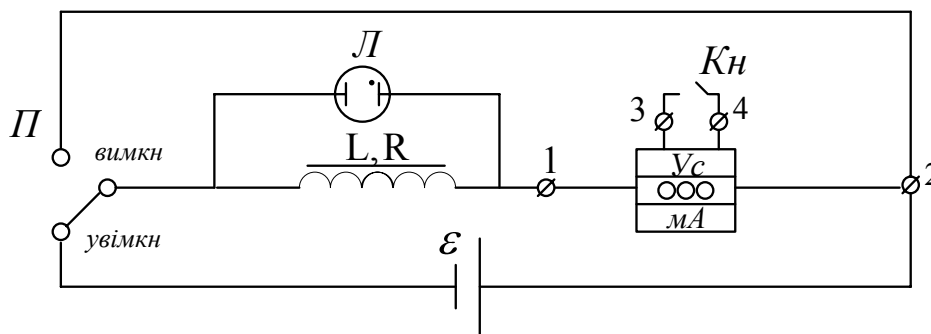


Рисунок 12.3

Для вимірювання сили струму використовується цифровий універсальний прилад В7-21А, який під'єднується до клем 1,2.

До 32-контактного роз'єму приладу В7-21А (який розміщений на задній панелі) підключається узгоджувальний пристрій, провідники від якого під'єднані до клем кнопки "Кн" – 3, 4. Пристрій узгоджувальний і кнопка призначені для зовнішнього запуску В7-21А при вимірюванні струму.

Значення струму в колі змінюється дуже швидко і, якщо натискати кнопку через визначені інтервали часу (наприклад через 2с), можна отримувати на табло приладу лише певні значення струму, що полегшує процес вимірювань і підвищує їх точність.

В положенні перемикача П *увімкн* до котушки підключається джерело ЕРС 1В. Приблизно через 10с струм в колі досягне сталого значення ($i_0 = 10\text{мА}$). За малої напруги опір газорозрядної лампи Л дуже великий і струм через неї не протікає. Коли П перемикається в положення *вимкн*, джерело ЕРС вимикається, в момент розриву кола швидкість зміни сили струму і опір кола

великі, і ЕРС самоіндукції досягає великого значення. В цей час газорозрядна лампа, яка має напругу запалювання 90В яскраво спалахує, її опір стає малим і струм самоіндукції протікає через лампу. Напруга на лампі швидко зменшується і лампа гасне. До цього часу перемикач *П* вже замкне коло в положенні *вимкн*. Далі струм зменшуватиметься від усталеного значення за експоненціальним законом. Натискаючи кнопку через кожні 2с після перемикання кола та спалаху лампочки, слід знімати залежність $i(t)$.

12.5 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис. 12.3), встановити перемикач *П* у положення *вимкн*. Увімкнути джерело живлення і амперметр В7-21А. Встановити перемикач *П* в положення *увімкн* і, натискаючи кнопку з інтервалами приблизно 2с, спостерігати на табло приладу за постійним збільшенням сили струму доки вона не перестане збільшуватися. Записати значення сили струму i_0 .

2. Встановити перемикач *П* в положення *вимкн* і почати відлік часу після спалаху лампи. Через кожні 2с натискати кнопку і записувати показані амперметра. Після проведення досліду дані занести до табл. 12.1.

Завдання 1, 2 повторити тричі. Знайти середнє значення струмів і занести їх у табл. 12.1. Побудувати графік залежності $i_{cp}(t)$ та $\ln i_{cp}(t)$.

3. Із закону зміни сили струму (12.9) визначити L для декількох значень i_{cp} . Результат розрахунків занести до табл. 12.1. Переконатися в сталому значенні індуктивності котушки L і побудувати графік залежності $L = f(\ln i)$.

4. Використовуючи формулу (12.10), визначити ЕРС самоіндукції в кожний момент часу після переміщення в положення *вимкн*. Побудувати графік $\mathcal{E} = f(t)$.

Таблиця 12.1 – Результати вимірювань і розрахунків

t, c	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
i_1, mA											
i_2, mA											
i_3, mA											
i_{cp}, mA											
$L, Гн$											
$\mathcal{E}, мВ$											

12.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірів у вигляді таблиці; графіки залежностей $i_{cp}(t)$, $\ln i_{cp}(t)$, $L = f(\ln i)$, $\mathcal{E} = f(t)$; стислі висновки.

12.6 Контрольні запитання і завдання

1. Що називається явищем самоіндукції?
2. Записати закон Фарадея для електромагнітної індукції.
3. В чому полягає правило Ленца?
4. Як отримати співвідношення для ЕРС самоіндукції із закону Фарадея?

Від чого залежить величина цієї ЕРС?

5. Як змінюється струм самоіндукції при підключенні котушки індуктивності до джерела ЕРС?

6. Як змінюються ЕРС і струм самоіндукції при вимиканні джерела ЕРС і короткому замиканні котушки?

6. Чому ЕРС самоіндукції може досягати великих абсолютних значень при відмиканні від котушки зовнішнього джерела ЕРС?

7. Пояснити принцип роботи лабораторної установки і призначення газорозрядної лампи.

13 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ

13.1 Мета роботи: дослідити явище взаємоіндукції, вивчити закон Фарадея, розглянути принцип роботи трансформатора та визначити його характеристики: коефіцієнт трансформації напруги, коефіцієнти взаємоіндукції обмоток трансформатора та його ККД.

13.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Змінний струм, який протікає в одному з контурів (рис. 13.1), наприклад в контурі 1, створює змінне магнітне поле, яке викликає появу ЕРС індукції в контурі 2. Таке явище називається взаємоіндукцією. ЕРС взаємоіндукції (як і самоіндукції) визначається за законом Фарадея:

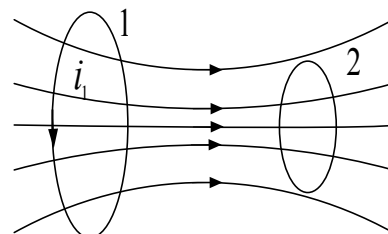


Рисунок 13.1

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt},$$

де Φ – магнітний потік контуру зі струмом.

На практиці звичайно магнітний потік створюється не одним витком, а котушкою з великою кількістю витків. Повний магнітний потік Ψ крізь усі витки котушки, пропорційний кількості витків N та магнітному потоку одного витка Φ : $\Psi = N\Phi$. Величину Ψ іноді називають поточкозчепленням. Щоб підсилити взаємодію між повними магнітними потоками котушок, останні потрібно розташувати навколо

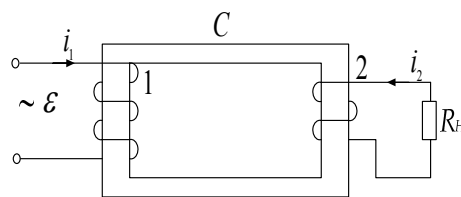


Рисунок 13.2

замкнутого феромагнітного осердя (рис.13.2). Такий пристрій є трансформатором.

Якщо у котушці 1 протікає змінний струм i_1 , то у феромагнітному осерді створюється змінний магнітний потік, частина якого Ψ_{21} проходить через котушку 2 та створює в ній ЕРС індукції:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Psi_{21}}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (13.1)$$

де Ψ_{21} – потокозчеплення з контуром 2, яке створюється струмом i_1 ;

Φ_1 – магнітний потік котушки 1;

N_2 – кількість витків другої котушки.

Розглянемо випадок, коли котушка 2 трансформатора розімкнена (навантаження R_H відсутнє). Цей випадок називається режимом холостого ходу трансформатора.

Запишемо співвідношення (13.1) у вигляді

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Psi_{21}}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt} = -L_{21} \frac{di_1}{dt}, \quad (13.2)$$

де величина

$$L_{21} = \frac{d\Psi_{21}}{di_1}. \quad (13.3)$$

називається динамічною взаємною індуктивністю або коефіцієнтом взаємоіндукції котушки 2 з котушкою 1.

Повний магнітний потік (потокозчеплення з котушкою 2)

$$\Psi_{21} = N_2 \Phi_1 = N_2 B_1 S. \quad (13.4)$$

створюється котушкою 1 (оскільки $i_2 = 0$) та залежить від індукції магнітного поля B_1 цієї котушки, кількості витків другої котушки N_2 та площі перерізу осердя S .

Індукція магнітного поля, що створюється першою котушкою із числом витків N_1 , довжиною l_1 і магнітною проникністю сердечника μ_D , визначається формулою:

$$B_1 = \mu_0 \mu_D \frac{N_1 i_1}{l}. \quad (13.5)$$

Підставимо (13.5) у (13.4), а отримане співвідношення – у (13.3):

$$L_{21} = \mu_0 \mu_D \frac{N_1 N_2}{l} \cdot S. \quad (13.6)$$

Дана формула дозволяє визначити коефіцієнт взаємоіндукції котушки 2 з котушкою 1 тільки для режиму холостого ходу. У цьому режимі в котушці 1 створюватиметься ЕРС ε_1 , яка чисельно дорівнює ЕРС індукції.

Якщо вважати падіння напруги на опорі обмотки 1 малим через незначну величину опору цієї обмотки, то можна записати:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (13.7)$$

Поділивши (13.1) на (13.7), отримаємо можливість обчислення кількості витків однієї з обмоток, якщо відома кількість витків другої:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (13.8)$$

Перейдемо до розгляду режиму роботи, при якому в котушці 2 протікає струм i_2 – сумірний з величиною струму i_1 ($0 < R_H < \infty$).

Струм i_2 (рис. 13.2) створює змінний магнітний потік Ψ_{12} у вторинній обмотці трансформатора. Цей повний потік поширюючись в осерді, проходить крізь витки котушки 1 та створює в ній ЕРС взаємоіндукції:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{di_2}{dt}, \quad (13.9)$$

де $\Psi_{12} = N_1\Phi_2 = N_1B_2S$ (B_2 – індукція магнітного поля котушки 2);

L_{12} – коефіцієнт взаємоіндукції котушки 1 з котушкою 2:

$$L_{12} = \frac{d\Psi_{12}}{di_2} = N_2S \frac{dB_2}{di_2}.$$

ε_1 та ε_2 є сумарними ЕРС взаємоіндукції, тому що в створенні змінного потоку осердя приймають участь струми i_1 та i_2 . Враховуючи це, запишемо рівняння другого правила Кірхгофа [2–5] для контуру 1:

$$i_1R_1 = \varepsilon - \varepsilon_1.$$

Якщо падіння напруги на котушці 1 мале ($i_1R_1 \approx 0$), то $\varepsilon_1 \approx \varepsilon \approx U$, де U – напруга джерела змінного струму, який змінюється за гармонічним законом:

$$i_1 = i_{01} \cos \omega t, \quad (13.10)$$

де i_{01} – амплітуда сили струму;

ω – циклічна частота.

Підставимо (13.10) до (13.2) та знайдемо ЕРС котушки 2:

$$\varepsilon_2 = -L_{21} \frac{di_1}{dt} = L_{21}i_{01}\omega \sin \omega t. \quad (13.11)$$

Якщо знехтувати падінням напруги в котушці 2 через малий опір ($R_2 \approx 0$), можна вважати $\varepsilon_2 \approx U_2$. Тоді

$$U_2 = L_{21}i_{01}\omega \sin \omega t.$$

Амплітудне значення напруги:

$$U_{02} = L_{21}i_{01}\omega. \quad (13.12)$$

Із співвідношення (13.12) знайдемо максимальне значення коефіцієнта взаємоіндукції другої котушки з першою:

$$L_{21} = \frac{U_{02}}{i_{01}\omega}. \quad (13.13)$$

Аналогічно можна визначити коефіцієнт взаємоіндукції першої котушки з другою:

$$L_{12} = \frac{U_0}{i_{02}\omega}, \quad (13.14)$$

де U_0 – амплітуда напруги джерела струму;

i_{02} – амплітуда сили струму в контурі 2;

$\omega = 2\pi\nu$, $\nu = 50$ Гц.

Потужність P_2 , яка виділяється у зовнішньому колі цього контуру, завжди менша, ніж споживана з мережі потужність P_1 . Якщо навіть на опорі навантаження R_H вторинної обмотки трансформатора виділяється максимально допустима активна потужність, то і тоді вона буде менша за споживану. Це пов'язано з тим, що частина споживаної електричної енергії витрачається на перемагнічування осердя (гістерезис) та його нагрівання (струми Фуко), а також на нагрівання обмоток трансформатора [2–5].

Відношення активної потужності P_2 , яка виділяється на опорі навантаження R_H , до активної потужності P_1 , що споживається із мережі, називається ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{i_{02}U_{02} \cos \varphi_2}{i_{01}U_{01} \cos \varphi_1}, \quad (13.15)$$

де φ_1 – різниця фаз між i_{01} та U_{01} ;

φ_2 – різниця фаз між i_{02} та U_{02} .

При опорах навантаження, близьких до оптимальних, та при невеликих коефіцієнтах трансформації різниці фаз в обмотках будуть малі і їх можна прирівняти ($\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$). Тому формула (13.15) для таких умов спрощується:

$$\eta = \frac{i_{02}U_{02}}{i_{01}U_{01}}. \quad (13.16)$$

Порівнюючи (13.13) та (13.14), можна сказати, що відношення коефіцієнтів взаємодуції обмоток чисельно дорівнює при зазначених вище умовах ККД трансформатора:

$$\frac{L_{21}}{L_{12}} = \eta. \quad (13.17)$$

За законом збереження енергії потужності на первинній та вторинній обмотках трансформатора можна вважати однаковими $P_1 = P_2$, якщо знехтувати тепловими втратами на їх активних опорах та в осерді, що обумовлені струмами Фуко. Тобто

$$\frac{\mathcal{E}_{01}i_{01}}{2} \cos \varphi_1 = \frac{\mathcal{E}_{02}i_{02}}{2} \cos \varphi_2,$$

або через ефективні значення напруг та струмів:

$$U_1 i_1 \cos \varphi_1 = U_2 i_2 \cos \varphi_2.$$

Після підстановки виразів (13.1) і (13.7) та при $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$ ці рівняння можна переписати у вигляді такого співвідношення:

$$\frac{\varepsilon_{02}}{\varepsilon_{01}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{i_1}{i_2} = k. \quad (13.18)$$

Величина k називається коефіцієнтом трансформації напруги. Вона визначає, у скільки разів ЕРС у вторинній обмотці трансформатора є більшою або меншою, ніж у первинній.

13.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з трансформатора напруги, двох амперметрів змінного струму, регульованого джерела змінної напруги (0–5В), цифрового вольтметра В7–21А або мультиметра ВР–11, з'єднувальних провідників.

Схема установки наведена на рис.13.3. На схемі зображено: TV – трансформатор, з обмотками 1 та 2; амперметри A_1 та A_2 ; R_H – опір навантаження; V – вольтметр для вимірювання ефективних (діючих) напруг первинної та вторинної обмоток трансформатора.

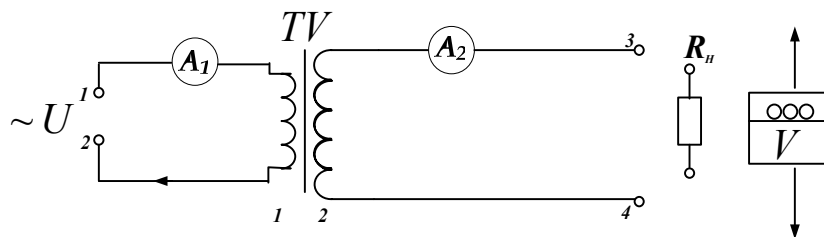


Рисунок 13.3

Для синусоїдальної напруги та струму амплітудні значення пов'язані з діючими співвідношеннями:

$$U_0 = U\sqrt{2}, \quad i_0 = i\sqrt{2}. \quad (13.19)$$

Для зміни величини діючої напруги на обмотці I у межах від 0 до 5В використовується регульоване джерело змінної напруги $\sim U$, вихідні клеми якого виведені на передню панель експериментальної установки.

13.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Дослідити режим холостого ходу трансформатора (рис. 13.3). Для цього, змінюючи напругу $\sim U$ через кожен 1,0В, вимірювати за допомогою цифрового вольтметра напруги на котушці 1 (клеми 1, 2) та котушці 2 (клеми 3, 4) трансформатора. Дані записати до таблиці 13.1.

2. Використовуючи співвідношення (13.8), визначити кількість витків N_2 вторинної обмотки ($N_1 = 50$). За формулою (13.6) обчислити коефіцієнт взаємодукції L_{21} для режиму холостого ходу. Результати записати до таб-

лиці 13.1. Дані осердя трансформатора вказані на робочому місці, а $\mu_D = \mu = 500$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Таблиця 13.1 – Результати вимірювань та розрахунків для режиму холостого ходу трансформатора

U_1 , В	U_2 , В	N_1	N_2	L_{21} , мГн
1,0		50		
2,0				
3,0				
4,0				
5,0				
Середнє значення				

3. Дослідити режим роботи трансформатора при номінальному навантаженні. Для цього приєднати опір навантаження до котушки 2 трансформатора (з'єднати провідниками відповідні клеми). Змінюючи вхідну напругу U_1 через кожен 1,0 В, вимірювати силу струму i_1 у колі первинної обмотки та i_2 – у колі вторинної обмотки, а також напругу U_2 на опорі R_H . Дані досліду записати до таблиці 13.2.

4. Для кожної вхідної напруги визначити за формулами (13.13), (13.14), враховуючи співвідношення (13.19) та результати експерименту, коефіцієнти взаємоіндукції L_{21} і L_{12} . Результати записати до таблиці 13.2.

5. Для всіх значень вхідної напруги за даними завдання 2 знайти ККД трансформатора, використовуючи співвідношення (13.15). Результати занести до таблиці 13.2. Зробити перевірку результатів за формулою (13.17).

6. За формулою (13.18), обчислити коефіцієнти трансформації для усіх значень вхідних напруг U_1 . Знайти середнє значення коефіцієнта трансформації k . Результати занести до таблиці 13.2. Визначити максимальні відносні та абсолютні похибки коефіцієнтів взаємоіндукції та трансформації.

Таблиця 13.2 – Результати вимірювань та розрахунків для режиму при номінальному навантаженні

U_1 , В	i_1 , мА	U_2 , В	i_2 , мА	L_{21} , мГн	L_{12} , мГн	ККД, %	k
1,0							
2,0							
3,0							
4,0							
5,0							
Середнє значення							

13.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи, схему лабораторної установки, результати вимірів у вигляді таблиць, результати розрахунків кількості витків N_2 , коефіцієнт взаємоіндукції L_{21} для режиму холостого ходу, коефіцієнти взаємоіндукції L_{21} і L_{12} при навантаженні, ККД трансформатора, коефіцієнт трансформації k , статистичну обробку результатів вимірювань, стислі висновки.

13.6 Контрольні запитання

1. У чому полягає явище взаємної індукції? Написати вираз для ЕРС взаємоіндукції.
2. Що називають взаємною індуктивністю двох контурів? Від чого вона залежить?
3. Знайти коефіцієнт взаємоіндукції обмоток трансформатора для режиму холостого ходу.
4. Обчислити коефіцієнти взаємоіндукції обмоток трансформатора для режиму номінального навантаження.
5. Навести формулу коефіцієнта трансформації трансформатора. Пояснити принцип роботи.
6. Що називається ККД трансформатора? Як визначається ККД трансформатора та від чого він залежить?
7. Як поєднати діючі значення напруги та сили струму з їх амплітудними значеннями для синусоїдального струму та напруги?
8. Як можна знайти ККД трансформатора, знаючи максимальні коефіцієнти взаємоіндукції його обмоток? При яких умовах цей ККД можна визначити через коефіцієнти взаємоіндукції?

14 ВИВЧЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

14.1 Мета роботи: дослідження магнітного поля в речовині на прикладі різних феромагнетичних матеріалів, ознайомлення з явищем гістерезису.

14.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Будь-яка речовина, що розташована в магнітному полі, змінює свої властивості. Магнітні властивості речовини пов'язані з орбітальним рухом електронів в атомі, із заповненням електронних оболонок в атомі, з магнітними властивостями самих електронів та інших частинок.

У переважній більшості речовин їхні магнітні властивості є дуже слабкими. До них відносяться діамагнетики та парамагнетики, які у відсутності

зовнішнього магнітного поля не мають намагніченості. Намагніченість характеризують магнітним моментом одиниці об'єму

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{P}_m,$$

де \vec{J} – намагніченість;

\vec{P}_m – магнітний момент молекул, що знаходяться в об'ємі ΔV .

В слабких магнітних полях намагніченість пара- та діамагнетиків залежить лінійно від напруженості зовнішнього магнітного поля \vec{H} :

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}, \quad (14.1)$$

де χ – магнітна сприйнятливість речовини, характерна для даного магнетика величина, що не залежить від H .

Феромагнетики – речовини, які в макроскопічних об'ємах мають магнітовпорядкований стан. Магнітовпорядкований стан речовини виникає внаслідок того, що магнітні моменти атомних носіїв магнетизму (спінові магнітні моменти) розташовані паралельно в межах деякої області речовини (домени). Феромагнітна атомна структура кубічної решітки зображена на рис. 14.1. Така орієнтація магнітних моментів атомів призводить до власної (спонтанної) намагніченості речовини, яка характеризується вектором намагніченості \vec{J} . Спонтанна намагніченість \vec{J}_c залежить від температури і зменшується з її зростанням. Характер цієї залежності зображений на рис. 14.2, де θ – температура, при якій спонтанна намагніченість зникає. Ця температура називається точкою Кюрі. При $T > \theta$ феромагнітні властивості зникають і речовина стає парамагнетиком. Таким чином, феромагнетики – це такі речовини, в яких встановлюється певний магнітний порядок атомних магнітних моментів. До них відносяться: залізо, нікель, кобальт, гадоліній, їх сплави та сполуки, а також деякі сплави інших елементів.

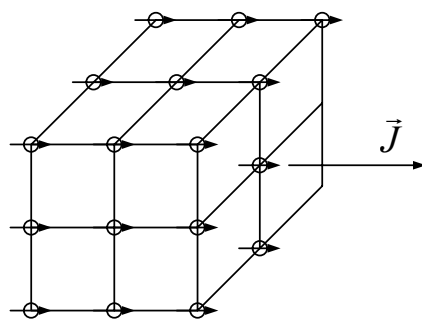


Рисунок 14.1

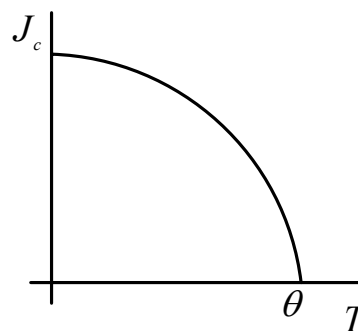


Рисунок 14.2

Для феромагнетиків залежність J від H (або B від H) носить складний характер. На рис. 14.3 зображений вид цієї залежності для початковоненамагніченого феромагнетика (головна або нульова крива намагнічування). З цієї залежності видно, що магнітна сприйнятливість χ не може служити характеристи-

кою магнітного стану феромагнетика. В цьому випадку як магнітна сприйнят-
 ливість χ , так і магнітна проникність речовини

$$\mu = 1 + \chi \quad (14.2)$$

є функціями напруженості магнітного поля H .

Залежність μ від H для феромагнетика зображена на рис. 14.4.

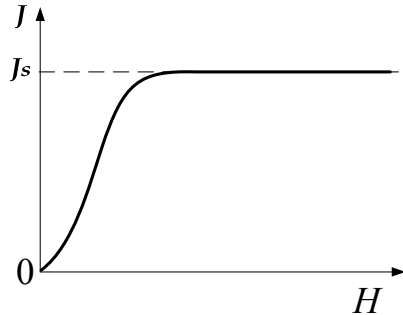


Рисунок 14.3

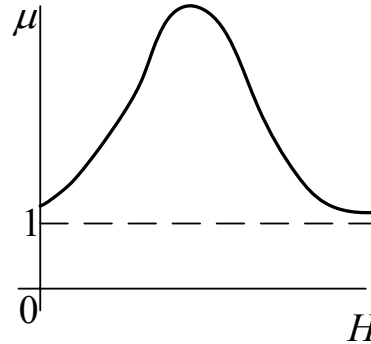


Рисунок 14.4

Для феромагнетиків характерно явище насичення намагніченості J при досить високих напруженостях магнітного поля H (рис. 14.3). Магнітна індукція $B = \mu_0(J + H)$ залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля нелінійно, але при досягненні насичення $B = \mu_0(J_s + H) = \mu_0 H + \text{const}$ ця залежність переходить в лінійну (рис. 14.5). Окрім розглянутих особливостей феромагнетиків, існує ще одна, яка полягає в тому, що магнітна проникність μ (а отже, і χ) залежить не тільки від миттєвого значення напруженості поля H , але й від попереднього намагнічування зразка. Тому за характеристику феромагнетика приймається залежність $B(H)$ у вигляді повного циклу кривої намагнічування (рис. 14.6), яка зображує процес перемагнічування феромагнетика у змінному магнітному полі.

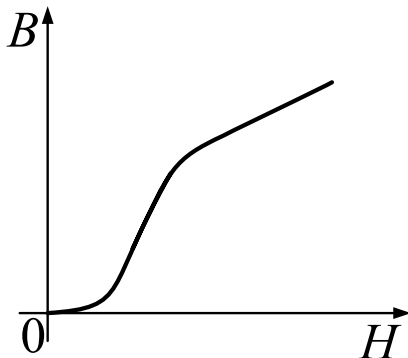


Рисунок 14.5

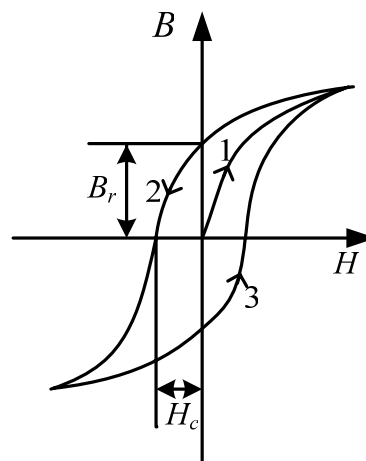


Рисунок 14.6

З кривих видно, що для якогось конкретного значення поля H індукція B не є однозначною. Явище, при якому фізична величина, що характеризує

стан тіла (наприклад індукція B), неоднозначно залежить від фізичної величини, яка характеризує зовнішні умови (наприклад, магнітне поле H), називається гістерезисом.

Замкнена крива, що зображена на рис. 14.6 – петля гістерезису. Якщо первинну криву намагнічування довести до насичення, то петля гістерезису буде найбільша, або гранична. На рис. 14.6 видно, що при зменшенні магнітного поля до нуля $H = 0$ індукція B не зникає, а зображується певним відрізком на осі координат. Це означає, що намагніченість зразка не зникає і їй відповідає так звана залишкова індукція B_r . З наявністю такої залишкової намагніченості пов'язано існування постійних магнітів. Для того, щоб розмагнітити зразок, потрібно прикласти певне поле, яке направлене протилежно первинному полю H_C . Ця напруженість поля є коерцитивною силою феромагнетика.

Значення залишкової намагніченості та коерцитивної сили для різних феромагнетиків змінюється в широких межах. Для м'якого заліза петля гістерезису вузька (коерцитивна сила мала), для сталі та матеріалів, що йдуть на виготовлення постійних магнітів, – широка (коерцитивна сила велика).

14.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з джерела регульованої змінної напруги 0–10В, електронного осцилографа (N), вольтметрів змінної напруги (V_1, V_2), трансформатора кільцевого з вуглецевої сталі, трансформатора кільцевого з трансформаторної сталі, трансформатора кільцевого з фериту, набору опорів, електроємності (C), з'єднувальних дротів. Схема установки зображена на рис 14.7.

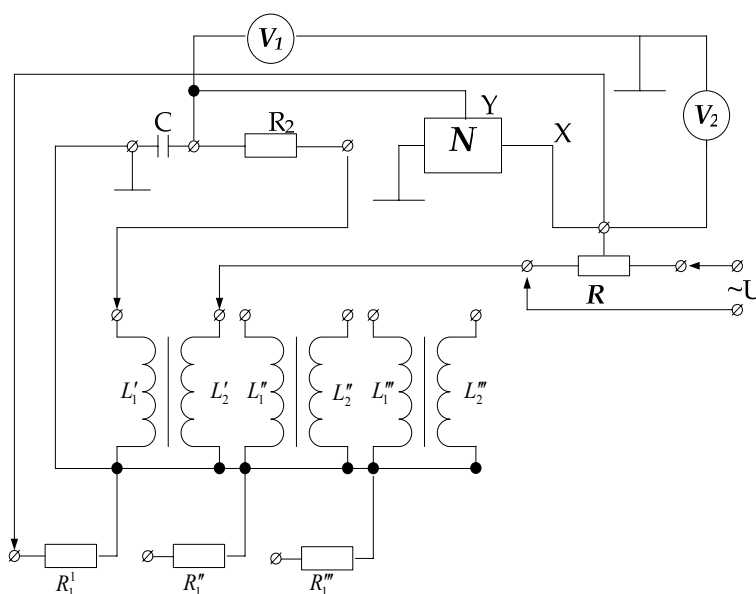


Рисунок 14.7

Як досліджуваний феромагнетик використовується осердя трансформатора. Первинна обмотка трансформатора живиться від джерела змінного

струму та має число витків N_1 . Ця обмотка трансформатора потрібна для створення змінного магнітного поля H , яке намагнічує осердя трансформатора.

Зв'язок H з падінням напруги U_x на резисторі R_1 в колі первинної обмотки може бути записано на основі закону повного струму [1,4] і виражається співвідношенням:

$$H = \frac{N_1}{l} i_1 = \frac{N_1}{l_1} \cdot \frac{U_x}{R_1} = n_1 \frac{U_x}{R_1}, \quad (14.4)$$

де l_1 – довжина середньої лінії осердя трансформатора;

N_1 – кількість витків первинної обмотки;

$n_1 = \frac{N_1}{l_1}$ – кількість витків на одиницю довжини.

Для вимірювання індукції B у феромагнітному осерді використовується метод, побудований на законі електромагнітної індукції [2]

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Оскільки потокозчеплення

$$\Psi = \Phi N_2 = BSN_2,$$

де S – переріз осердя;

N_2 – кількість витків вторинної обмотки, то

$$|\varepsilon| = \frac{dB}{dt} SN_2. \quad (14.5)$$

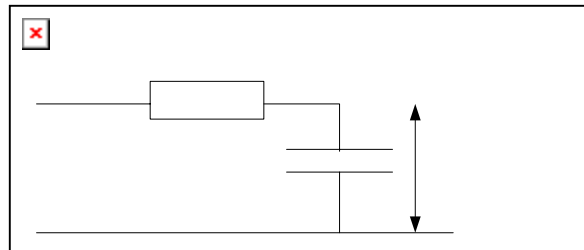


Рисунок 14.8

Для того, щоб подати на вхід підсилювача вертикального відхилення напругу, пропорційну B , між вторинною обмоткою і осцилографом вмикається інтегруюче кільце – R_2C (рис 14.8).

Запишемо закон Ома для вторинного кола трансформатора (рис. 14.8), враховуючи, що ЕРС самоіндукції мала:

$$\varepsilon = U_C + I_2 R_2. \quad (14.6)$$

Врахуємо, що

$$U_C = U_Y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt, \quad (14.7)$$

де q – заряд конденсатора,

U_Y – напруга, що подається на вхід Y осцилографа,

I_2 – сила струму у вторинному колі трансформатора.

З іншого боку, $U_C = I_2/\omega C$, а падіння напруги на резисторі R_2 є $U_R = I_2 R_2$. Тоді

$$U_R/U_C = R_2 \omega C.$$

При $R_2 \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Ом}$, $\omega = 3,14 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, $C = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $\frac{U_R}{U_C} \approx 25$, $U_R \gg U_C$.

Тому можна знехтувати U_C у формулі (14.16). Тоді з урахуванням формул (14.5) і (14.6) маємо:

$$\varepsilon = I_2 R_2 = \frac{dB}{dt} SN_2,$$

звідки

$$I_2 = \frac{SN_2}{R_2} \frac{dB}{dt}.$$

Підставивши I_2 до формули (14.7), отримаємо напругу, яка подається на вхід Y осцилографа:

$$U_Y = U_C = \frac{SN_2}{R_2 C} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{SN_2}{R_2 C} B. \quad (14.8)$$

Звідси знайдемо індукцію магнітного поля у феромагнетика.

$$B = \frac{U_Y R_2 C}{SN_2}. \quad (14.9)$$

Таким чином, під час подачі напруги U_X на горизонтально відхиляючі пластини і напруги U_Y на вертикальні відбувається складання двох взаємоперпендикулярних коливань. Внаслідок цього за повний період коливань промінь відтворить на екрані в деякому масштабі петлю гістерезису, як це виходить із рівнянь (14.4) і (14.9).

14.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему з трансформатором із вуглецевої сталі (рис. 14.7) і увімкнути осцилограф.

2. Вимкнути розгортку осцилографа. Ручками керування променем встановити світлу пляму в центрі екрана.

Подати змінну напругу на первинну обмотку трансформатора і, збільшуючи напругу, встановити струм, необхідний для насичення феромагнетика. Встановити перемикач «V/дел» в таке положення, щоб петля гістерезису мала максимальний розмір по вертикалі.

3. За допомогою вольтметра провести калібровку каналів X і Y. При цьо-

му звернути увагу на те, що вольтметр показує ефективне значення напруги, а зміщення променя на екрані осцилографа визначається амплітудним значенням напруги.

Після цього рівень підсилення по осях X і Y не змінювати.

4. Поступово зменшуючи за допомогою потенціометра R напругу живлення, зробити 8–10 вимірювань значень координат x і y верхнього кінця петлі при різних напругах. Записати отримані величини до таблиці 14.1.

Таблиця 14.1 – Результати вимірювань та розрахунків

$x, \text{мм}$	$y, \text{мм}$	$U_x, \text{В}$	$U_y, \text{В}$	$B, \text{Тл}$	$H, \text{А/м}$	μ

5. За формулами (14.4) і (14.9) визначити H і B . Дані $N_1, l_1, R_1, N_2, R_2, S$ наведені на робочому місці. Величини U_x і U_y обчислюються через координати точок і чутливість горизонтального і вертикального каналів осцилографа. Знайти похибку.

6. Побудувати криву намагнічування $B = B(H)$.

7. Знайти магнітну проникність μ , використовуючи співвідношення $\mu = B/\mu_0 H$. Визначити абсолютну похибку. Побудувати графік $\mu(H)$.

14.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірів у вигляді таблиці; графіки залежностей $B(H)$, $\mu(H)$ з вказаними на них похибками; стислі висновки.

14.6 Контрольні запитання і завдання

1. На які види розподіляються магнетиками?
2. Що таке вектор намагніченості і який його фізичний зміст?
3. Що таке магнітна сприйнятливост?
4. Які речовини називаються ферромагнетиками?
5. Охарактеризувати температуру Кюрі.
6. Які речовини відносять до діамагнетиків? до парамагнетиків?
7. Який фізичний смисл має магнітна проникність?

8. В чому полягає явище гістерезису?
9. Яка сутність залишкової індукції і коерцитивної сили?

15 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВНОГО ПОСЛІДОВНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

15.1 Мета роботи: дослідження вимушених електромагнітних коливань в повному послідовному колі змінного струму, ознайомлення з явищем резонансу.

15.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

У послідовному колі (рис. 15.1), який складається з ємності C , індуктивності L , активного опору R і генератора, виникають вимушені електромагнітні коливання.

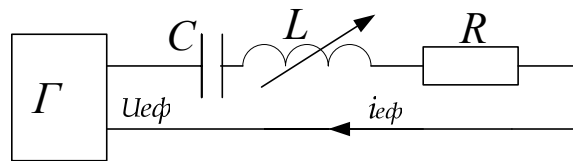


Рисунок 15.1

Рівняння таких коливань для миттєвих значень сили струму i та напруги u можна записати на основі 2-го закону Кірхгофа [2-5] для даного кола:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{q}{C} = u_0 \cos \omega t, \quad (15.1)$$

де ω – циклічна частота напруги генератора;

u_0 – амплітуда напруги генератора;

q – миттєве значення заряду конденсатора.

Враховуючи, що $i = dq/dt$, можна сказати, що коливання заряду описуються диференціальним рівнянням другого порядку [2]. Розв'язання такого рівняння для усталеного значення сили струму, як відомо, описується гармонічною функцією часу

$$i = i_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (15.2)$$

де φ – зсув фаз між напругою і силою струму;

У рівнянні (15.2) i_0 – амплітуда сили струму в колі – знаходиться із співвідношення

$$i_0 = \frac{u_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{u_0}{Z}, \quad (15.3)$$

Зсув фаз φ можна обчислити з формули:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (15.4)$$

Рівняння (15.3) виражає закон Ома для повного послідовного кола змінного струму. Вираз в знаменнику цього рівняння є модулем повного електричного опору (модулем імпедансу) кола і може бути представлений у вигляді:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (15.5)$$

де X – реактивний опір кола (реактанс); $X_L = \omega L$ – індуктивний опір (реактанс котушки індуктивності), $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – ємнісний опір (реактанс конденсатора).

Якщо виключити із кола ємність C (прийняти $C = \infty$), то закон Ома матиме такий вигляд:

$$i_0 = \frac{u_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (15.6)$$

звідки

$$L = \frac{\sqrt{\left(\frac{u_0}{i_0}\right)^2 - R^2}}{\omega}. \quad (15.7)$$

Якщо ж виключити із повного кола індуктивність ($L = 0$) і активний опір ($R = 0$), то закон Ома можна записати у вигляді співвідношення

$$i_0 = \omega C u_0. \quad (15.8)$$

У повному послідовному колі амплітуда сили струму i_0 досягає максимального значення

$$i_{0m} = \frac{u_0}{R}, \quad (15.9)$$

коли індуктивний і ємнісний опори будуть однаковими:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (15.10)$$

У цьому випадку циклічна частота генератора дорівнює частоті власних коливань кола ω_0 :

$$\omega = \omega_0, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (15.11)$$

зсув фаз (15.4) між струмом і напругою дорівнює нулю ($\varphi = 0$), тобто настає резонанс напруг: $U_L = U_C$.

У даній роботі змінюється лише частота ω_0 власних коливань повного кола шляхом плавної зміни індуктивності L . Для цього передбачена можливість переміщувати феритове осердя всередині котушки. Вимірюються ефективні значення сили струму i_{ef} в колі і напруги u_{ef} при різних положеннях осердя h . Опір R визначається по значеннях i_m та u_0 при резонансі. Величини L і C знаходяться за напругою і струмом в колі при вимкнених ємності та індуктивності відповідно. В роботі визначається повний опір кола за законом Ома:

$Z = u_0/i_0$ для різних значень індуктивності, потім робиться його перевірка за формулою (15.5).

15.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з котушки змінної індуктивності (L), конденсатора (C), цифрового вольтметра В7-21А (V), мультиметра ВР-11(А), генератора синусоїдальних напруг (Γ), з'єднувальних провідників.

Схема лабораторної установки наведена на рис. 15.2.

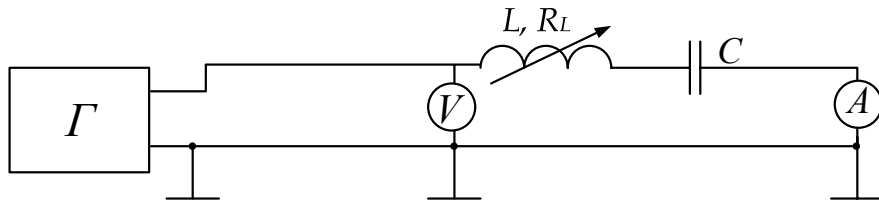


Рисунок 15.2

15.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

1. Скласти схему (рис. 15.2). Простежити за тим, щоб нульові клеми всіх приладів були з'єднані разом. Встановити частоту генератора зазначену на робочому місці.

2. Увімкнути живлення приладів. Встановити вихідну напругу генератора 1–5В. Заглиблюючи осердя в котушку L , через кожні 2 мм, зняти залежність $i(h)$. Значення h , i , u занести до таблиці 15.1.

Таблиця 15.1 – Результати вимірювань

h , мм	i , А	u , В

3. Експериментально визначити глибину занурювання осердя h_p при резонансі напруг. Вимкнути живлення приладів.

4. Виключити із схеми (рис. 15.2) ємність C . Виконати завдання п. 2. Результати вимірювань занести до табл. 15.2. Вимкнути живлення.

Таблиця 15.2 – Результати вимірювань та розрахунків за відсутності ємності

h , мм	i , А	u , В	L , Гн

5. Виключити із схеми (рис.15.2) індуктивність L . Увімкнути живлення приладів і визначити ефективне значення сили струму i_{ef} та напругу u_{ef} . Вимкнути живлення і розібрати схему.

6. За даними, отриманими в завданнях 2 і 4, побудувати графіки залежностей $i(h), u(h)$.

7. За ефективними значеннями сили струму і напруги при резонансі визначити активний опір кола R .

8. Використовуючи дані завдання 4, розрахувати за формулою (15.7) індуктивність L . Результати розрахунків занести до табл.15.2. Зобразити графічно залежність $L(h)$.

9. Із співвідношення (15.8) за даними завдання 5 визначити ємність конденсатора C .

10. Визначити імпеданс Z повного кола із закону Ома для таких трьох значень h : $h_1 = 0$, $h_2 = h_P$, $h_3 = h_{max}$.

11. Обчислити імпеданс Z за формулою (15.5) для зазначених вище даних h . Порівняти результати з експериментальними значеннями, отриманими в завданні 10.

12. Знайти різницю фаз φ за формулою (15.4) для тих самих значень індуктивності (при $h_1 = 0$, $h_2 = h_P$, $h_3 = h_{max}$).

13. Розрахувати похибки для імпедансу Z , знайденого із закону Ома (15.3), і за формулою (15.5) для випадку $h_1 = 0$. Зробити висновок про точність використаного методу перевірки закону Ома для повного кола змінного струму.

15.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірів у вигляді таблиць; графіки залежностей $i(h)$, $u(h)$, $L(h)$; результати обчислення активного опору кола R , ємності конденсатора, імпедансу Z повного кола; падіння напруги на ємності u_C та індуктивності u_L ; розрахунок похибок; стислі висновки.

15.6 Контрольні запитання і завдання

1. Які коливання називаються вимушеними?
2. Наведіть диференціальне рівняння вимушених електромагнітних коливань. Який розв'язок має це рівняння?
3. Який струм називається змінним?
4. Запишіть закон Ома для повного кола змінного струму.
5. Що називається повним опором послідовного кола змінного струму?
6. Як залежать індуктивний і ємнісний опори від частоти вимушених коливань?
7. Що називається резонансом напруг? За якої умови він виникає?

16 ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУМУ ЗМІЩЕННЯ

16.1 Мета роботи: ознайомитися з рівняннями Максвелла, довести експериментально рівність струмів провідності та зміщення в колі змінного струму, що містить конденсатор.

16.2 Методичні вказівки з організації самостійної роботи студентів

Змінне магнітне поле викликає появу вихрового електричного поля. Англійський фізик Максвелл прийшов до висновку, що має існувати і зворотнє явище: будь-яка зміна електричного поля викликає появу вихрового магнітного поля [2-5]. Перші два рівняння Максвелла вказують на цей взаємозв'язок у взаємодії магнітного та електричного полів:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi_m}{dt}, \quad (16.1)$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = i_{np} + \frac{d\Phi_e}{dt}. \quad (16.2)$$

Ліві частини цих рівнянь визначають циркуляцію векторів напруженості електричного \vec{E} та магнітного \vec{H} полів вздовж будь-якого замкненого контуру L , Φ_m та Φ_e – потоки векторів магнітної та електричної індукції (електричного зміщення), відповідно [2]. Оскільки магнітне поле є основною обов'язковою ознакою струму, то Максвелл назвав змінне електричне поле в рівнянні (16.2) струмом зміщення

$$i_{зм} = \frac{d\Phi_e}{dt}, \quad (16.3)$$

на відміну від струму провідності i_{np} , зумовленого рухом заряджених частинок (електронів та іонів). Отже, змінне електричне поле – це струм зміщення, що, як і струм провідності, створює навколо себе магнітне поле, але, на відміну від струму провідності, не викликає виділення теплоти. В речовинах, що мають добру провідність, струм зміщення малий і ним можна знехтувати порівняно з струмом провідності. Навпаки, в середовищах, що мають погану провідність (діелектриках) та при високих частотах струм зміщення відіграє головну роль [2–5]. Великий струм зміщення виникає, наприклад, між обкладинками конденсатора, підключеного до високочастотного генератора (ВГ) змінної напруги, як на рис.16.1.

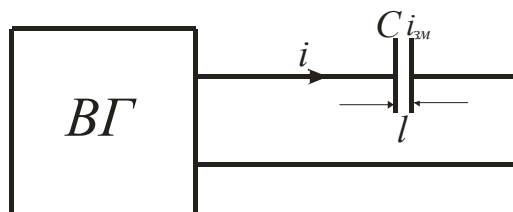


Рисунок 16.1

В цьому колі сила струму зміщення має дорівнювати силі струму провідності. Доведемо це.

У співвідношенні (16.3) електричний потік Φ_e виразимо через електричне зміщення (індукцію) \vec{D} :

$$\Phi_e = \int_S \vec{D} d\vec{S} = \int_S (\vec{D}, \vec{n}) dS = \int_S D_n dS, \quad (16.4)$$

де S – площа пластини конденсатора,

\vec{n} – зовнішня нормаль до елемента площі dS .

Вважатимемо конденсатор плоским, ємність його дорівнює

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l}, \quad (16.5)$$

де ϵ_0 – електрична стала,

ϵ – діелектрична проникність речовини між пластинами,

l – відстань між пластинами.

Для плоского конденсатора справедливе співвідношення

$$D_n = D = \epsilon_0 \epsilon E, \quad (16.6)$$

де E – напруженість електричного поля між пластинками. Вона дорівнює

$$E = \frac{U}{l}, \quad (16.7)$$

де U – різниця потенціалів між обкладинками.

Напруга U_Γ на виході генератора змінюється за гармонічним законом:

$$U_\Gamma = U_0 \sin \omega t, \quad (16.8)$$

де U_0 – амплітуда, $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота, ν – частота.

Враховуючи співвідношення (16.3 – 16.8) знайдемо силу струму зміщення:

$$\begin{aligned} i_{зм} &= \frac{d\Phi_e}{dt} = \frac{d}{dt} \int_S D dS = \frac{d}{dt} \int_S \epsilon_0 \epsilon E dS = \epsilon_0 \epsilon \frac{d}{dt} \int_S \frac{U_\Gamma}{l} dS = \epsilon_0 \epsilon \frac{d}{dt} \int_S U_0 \sin \omega t dS = \\ &= \epsilon_0 \epsilon U_0 \frac{d(\sin \omega t)}{dt} \int_S dS = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l} U_0 \omega \cos \omega t = C U_0 \omega \cos \omega t, \end{aligned}$$

У цьому виразі

$$i_{0зм} = C U_0 \omega \quad (16.9)$$

– амплітуда струму зміщення

Знайдемо тепер амплітуду сили струму провідності $i_{0пр}$. Для цього скористаємось законом Ома для кола змінного струму, що містить конденсатор:

$$i_0 = \frac{U_0}{R_C} = \frac{U_0}{1/\omega C} = C U_0 \omega, \quad (16.10)$$

де $R_C = \frac{1}{\omega C}$ – реактивний опір конденсатора.

Порівнявши праві частини виразів (16.9) та (16.10) можна зробити висновок, що амплітуди сил струмів зміщення та провідності однакові:

$$i_{0зм} = i_{0пр}$$

Струм зміщення між обкладинками конденсатора створює навколо себе таке саме змінне магнітне поле, що і струм провідності. Якщо в це поле між пластинками конденсатора помістити котушку з дротом (соленоїд), то в ній за законом Фарадея виникає ЕРС індукції та індуктивний струм, що дорівнює за величиною струму провідності у колі конденсатора. У вимірюванні цих струмів і полягає перше завдання даної роботи.

У другому завданні соленоїд підключають до генератора, змінне магнітне поле між пластинами конденсатора створює вихрове електричне поле на його пластинах.

Вимірюють струм провідності в колі конденсатора і струм „зміщення”, що створюється соленоїдом між пластинами конденсатора.

16.3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з конденсатора ємністю C , котушки, що має індуктивність L , резистора з опором $R_I = 10$ кОм, високочастотного генератора Γ та осцилографа O . Значення C та L вказані на лабораторній установці.

16.4 Порядок виконання роботи і методичні вказівки з її виконання

Завдання 1

1. Скласти схему (рис.16.2).

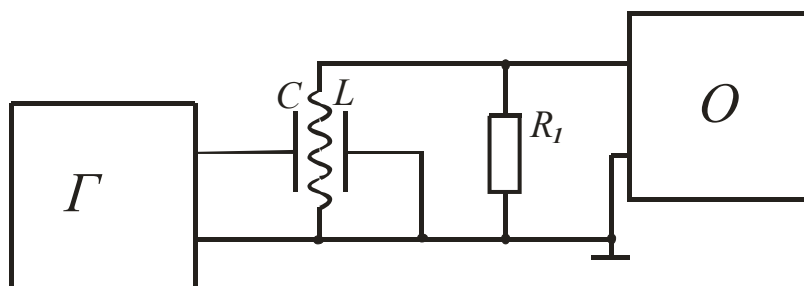


Рисунок 16.2

2. Встановити частоту генератора $\nu = 4-10$ МГц та ефективну величину вихідної напруги генератора $U_\Gamma = 3$ В.

3. Виміряти за допомогою осцилографа амплітуду напруги на резисторі R та знайти його ефективне значення за формулою

$$U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

4. Визначити силу струму провідності:

$$i_{np} = \frac{U_\Gamma}{R_C} = \frac{U_\Gamma}{1/\omega C} = U_\Gamma \omega C = 2\pi\nu U_\Gamma C.$$

5. Знайти силу струму зміщення, нехтуючи індуктивним та активним опорами котушки, порівняно з опором R_I : $i_{zm} = U/R_I$.

6. Порівняти сили струму зміщення та провідності. Визначити похибки вимірювань, враховуючи, що абсолютна похибка всіх величин (ΔR , ΔC , Δv) складає 10 % від їх номінальних значень.

Завдання 2

1. Скласти схему (рис. 16.3), встановити таку ж частоту генератора, як в завданні 1, напруга на виході $U_G = 3\text{В}$.

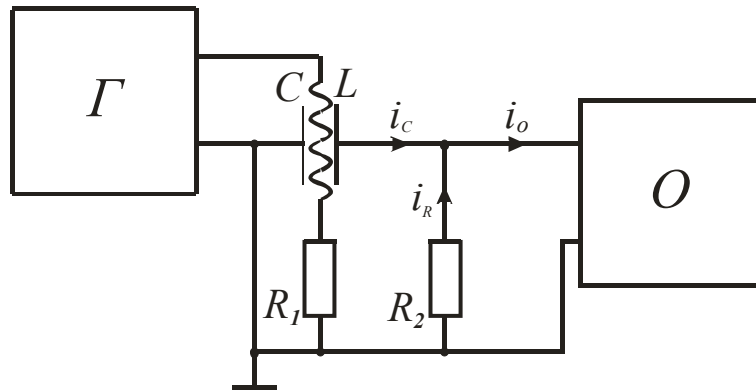


Рисунок 16.3

2. Виміряти за допомогою осцилографа амплітуду напруги U_0 на паралельному з'єднанні $R_C = \frac{1}{\omega C}$ та $R_2 = 10\text{ кОм}$. Знайти ефективне значення: $U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

3. Визначити опір конденсатора R_C і повний опір $R_{||}$ паралельного з'єднання $R_C R_2$.

4. Визначити струм провідності в колі котушки L , нехтуючи її активним та індуктивним опором: $i_{np} = \frac{U_G}{R_1}$.

5. Знайти силу струму $i_0 = i_C + i_R$ за формулою $i_0 = \frac{U}{R_{||}}$.

6. Порівняти визначене значення сили струму з струмом провідності i_{np} . Зробити висновки. Розрахувати похибки результатів вимірювань.

16.5 Зміст звіту

Звіт має містити: мету роботи; схему лабораторної установки; результати вимірів у вигляді таблиць; результати обчислення сили струму провідності, сили струму зміщення; статистичну обробку результатів вимірювання; стислі висновки.

16.6 Контрольні запитання і завдання:

1. Що називається струмом зміщення?
2. В чому подібність і відмінність між струмом зміщення і струмом провідності?

3. Доведіть однаковість струму зміщення і струму провідності в колі, що містить конденсатор.
4. Як в завданні 1 визначають струми провідності і зміщення?
5. Як створюється струм зміщення в завданні 2?
6. Як в завданні 2 визначають струми провідності і зміщення?
7. Запишіть та поясніть рівняння Максвелла в інтегральному та диференціальному вигляді.

Додаток А

А.1 ОСЦИЛОГРАФ УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ С1-77

А 1.1 Підготовка до проведення вимірів

1. Під'єднати осцилограф до мережі $\sim 220\text{В}$ і увімкнути тумблер СЕТЬ. Прогріти осцилограф протягом 2-3 хв. І розпочати перевірку його працездатності та балансування.

2. Перевести перемикач роду роботи в положення « \updownarrow ».

3. Ручкою « \odot » встановити яскравість зображення, зручну для спостереження, а ручкою « \odot » сфокусувати зображення.

У випадку відсутності лінії розгортки ручкою « \updownarrow » вертикального переміщення одвести розгортки на робочу частину екрана.

4. Після 10-хвилинного прогріву зробити балансування підсилювача Y для чого закоротити вхід підсилювача на корпус, встановити перемикач «V/дел» каналу I в положення «0.01» і ручкою « \updownarrow I» встановити лінію розгортки в центр екрана.

5. Для балансування каналу II перевести ручку вибору режиму роботи підсилювача в положення "II". Балансування проводити аналогічно п.1.4., використовуючи при цьому органи управління, які відносяться до каналу II.

6. Для калібрування коефіцієнта відхилення встановити перемикач «V/дел» в положення « ∇ 5 дел.». Ручки « \triangleright » встановити в крайнє праве положення. Перемикач роду роботи підсилювача встановити в положення «I». При цьому величина зображення сигналу на екрані має бути рівною 5 поділкам.

7. Осцилограф дозволяє робити алгебраїчне додавання та віднімання двох сигналів. Для цього встановити перемикач каналів в положення «I-II». Для додавання сигналів перемикач полярності встановити в положення «+», а для віднімання – «-».

8. Тумблером вибору входу « \sim , \approx » вибрати вид зв'язку підсилювача з джерелом досліджуваного сигналу.

В положенні « \approx » зв'язок з джерелом досліджуваного сигналу відбувається за постійним струмом. Цей режим може бути використаний, якщо постійна складова досліджуваного сигналу сумарна зі змінною складовою.

9. Для роботи з осцилографом в одноканальному режимі може використовувати будь-який із вхідних каналів

А.1.2 Проведення вимірів

1. Для вимірювання напруг здійснити такі операції:

а) подати кабелем сигнал на гніздо « $\oplus 1\text{M}\Omega 30\text{pF}$ » одного з каналів;

б) поставити перемикач «V/дел» в таке положення, щоб амплітуда зображення складала приблизно 5 поділок;

в) поставити тумблер « \sim , \approx » в положення « \sim » при вимірюванні змінної напруги і в положення « \approx » при вимірі постійної або змінної напруги частоти нижче 50Гц;

г) ручкою УРОВЕНЬ встановити стійке зображення. Поставити перемикач ВРЕМЯ/ДЕЛИТЕЛЬ в положення, при якому спостерігається декілька періодів досліджуваного сигналу;

д) встановити ручку « \updownarrow » вертикального переміщення так, щоб мінімальний рівень сигналу співпадав з однією з нижніх ліній, а максимальний знаходився в межах екрана. Ручкою « \triangleright » горизонтального переміщення змістити зображення таким чином, щоб один з верхніх піків знаходився на вертикальній середній лінії шкали;

е) виміряти кількість поділок шкали між крайніми точками розмаху амплітуди і помножити на коефіцієнт відхилення перемикача «V/дел». При цьому ручка « \triangleright » має бути встановлена в крайньому правому положенні.

2. Вимірювання фази за допомогою Ліссажу

а) подати синусоїдальні сигнали на входи « $\ominus 1M\Omega 30pF$ » одного з каналів і « $\ominus X$ »;

б) перемикач виду синхронізації поставити в положення « $\ominus X$ »;

в) перемикач режиму роботи підсилювача встановити в положення, яке відповідає вибраному каналу;

г) ручкою «V/дел» встановити зображення в межах екрана;

д) ручками « \updownarrow » і « \leftrightarrow » встановити зображення в центрі екрана;

е) виміряти відстань A і B . Різниця фаз визначається співвідношенням $\varphi = \arcsin A/B$ (рис 2.5).

2.3 Визначення фази між сигналами однієї частоти можна здійснити, використовуючи двоканальний режим осцилографа. Для цього необхідно:

а) встановити тумблери « \sim , \approx » в однакове положення;

б) встановити перемикач режиму роботи підсилювача в положення «...» або « \rightarrow ». Режим «...» звичайно вживається при низькочастотних сигналах;

в) встановити перемикач виду синхронізації в положення ВНУТР.1;

г) подати опорний сигнал на вхід каналу I, а порівнювальний - на вхід каналу II. Опорний сигнал повинен попереджати порівнювальний в часі;

д) якщо сигнали протилежної полярності, перемикачем полярності «+, -» другого каналу інвертувати сигнали;

е) встановити перемикачем ВРЕМЯ/ДЕЛ на швидкість розгортки, яка забезпечує один цикл сигналів на екрані;

А.2 ГЕНЕРАТОР ЛЗО

А 2.1 Підготовка до роботи

Встановити органи управління в такому порядку:

- рівень – за годинниковою стрілкою до упору;
- девіацію – проти годинниковою стрілки до упору.

Натиснути кнопки перемикачів ДЕЛИТЕЛЬ, РОД РАБОТЫ, МНОЖИТЕЛЬ.

А.2.2 Порядок роботи

1. Для вибору необхідної форми сигналу на перемикачі РОД РАБОТЫ натиснути відповідну кнопку.

2. Встановити необхідний рівень вихідного сигналу за допомогою перемикача ДЕЛИТЕЛЬ, а ручка УРОВЕНЬ має знаходитися в крайньому правому положенні.

Величина вихідної напруги регулюється плавно та ступенево в межах: 100мкВ – 18 на гнізді «1В» при навантаженні 60Ом; 1–10В на гнізді «10В» при навантаженні 500 Ом.

Вихід 10В ступеневого регулювання не має.

3. Встановити необхідну частоту за індикатором за допомогою перемикача МНОЖИТЕЛЬ і ручки ЧАСТОТА.

Генератор забезпечує діапазон частот від 20Гц до 10МГц з піддіапазонами:

0,02-02кГц;	20,0-200кГц;
0,2-2,0кГц;	200-2000кГц;
2,0-20кГц;	2000-10000кГц;

А.3 ІНСТРУКЦІЯ З ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРА СИНУСОЇДАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ГЗ-118

А.3.1 Основні технічні дані

1. Частота вихідного сигналу встановлюється в діапазоні від 10Гц до 200кГц.

Установка частоти відбувається дискретно на п'яти піддіапазонах:

- 1) 10–100Гц через 0,1 Гц;
- 2) 100–1000Гц через 1Гц;
- 3) 1,0–10кГц через 10Гц;
- 4) 10–100кГц через 100Гц;
- 5) 100–200кГц через 100ц.

2. Відносна (основна) похибка ε установки частоти складає:

- 1) $\varepsilon_1 = \pm \left(1 + \frac{50}{\nu}\right)\%$ у діапазоні частот 10Гц-20кГц;

2) $\varepsilon_2 = \pm 1,5\%$ – у всьому іншому діапазоні частот. (ν – встановлене значення частоти, Гц)

3. Під час роботи з низькоомними навантаженнями (більш 50м) слід використовувати вихід « \ominus I» генератора. Для цього перемикач " ΔdB " встановлюється в положення «I».

Ручка " \sphericalangle " дозволяє встановити необхідну вихідну напругу в межах від 2,5 до 10В.

4. Якщо номінальний опір навантаження генератора складає $R_H = 600 \pm 6$ Ом, використовується вихід « \ominus II».

Гніздо « \ominus II» вмикається в усіх положеннях перемикача « ΔdB » відмінних від положення «I». При цьому гніздо « \ominus I» залишається з'єднаним з вихідним підсилювачем генератора через резистор 1-2кОм і може бути використано для підключення осцилографа, а також як джерело сигналу синхронізації, частотомір і т.ін. Максимальна вихідна напруга на гнізді « \ominus II» при номінальному навантаженні складає 5В. Регулювання напруги відбувається плавно ручкою « \sphericalangle » і дискретно від 0 до 60дВ через 10дВ перемикачем « ΔdB ».

Якщо навантаження, під'єднане до гнізда « \ominus II», відрізняється від 600 Ом, вихідну напругу генератора $U_{вих}$ можна обчислити за формулою

$$U_{вих} = U_{вих\ x.x.} \cdot \frac{R_H}{R_H - 600},$$

де $U_{вих\ x.x.}$ – напруга на ненавантаженому виході, В;

R_H – опір навантаження, Ом.

А.3.2 Порядок роботи

1. Встановити перемикачі «Н» і МНОЖИТЕЛЬ в положення, відповідне вибраній частоті.

2. Під'єднати вхідний кабель навантаження (схеми) до одного з виходів генератора « \ominus I» або « \ominus II» в залежності від опору навантаження (див. пп. 1.3, 1.4).

3. Тумблер СЕТЬ поставити в положення «I». При цьому має засвітитися лампочка індикатора вмикання генератора.

Для початку роботи необхідно прогріти генератор протягом 15хв. Перша цифра відліку частоти вказується в одному із двох вікон, розміщених зліва від відлікових вікон декад.

Положення «II» старшої декади відповідає п'ятому піддіапазону частоти (від 100 до 200кГц).*

* Перемикачі « H_Z » середньої і молодшої декад мають по 10 положень, а перемикач старшої – 11. Під час установки в положення «II» в індикаторному вікні старшої декади фіксується «0», який буде другою цифрою у відліку частоти.

А.4 ВОЛЬТМЕТР УНІВЕРСАЛЬНИЙ В7-21А

А.4.1 Вольтметр призначений для вимірів:

- напруги і сили постійного струму;
- напруги і сили змінного струму;
- активного опору.

А.4.2 Діапазонів вимірів:

- напруга постійного струму: $1 \cdot 10^{-6} - 10^3 \text{ В}$;
- напруга змінного струму: $1 \cdot 10^{-5} - 10^3 \text{ В}$;
- сила постійного струму: $1 \cdot 10^{-11} - 10 \text{ А}$;
- сила змінного струму: $1 \cdot 10^{-6} - 10 \text{ А}$;
- активний опір: $1 \cdot 10^{-2} - 1,2 \cdot 10^7 \text{ В}$;
- частотний діапазон вимірюваних напруг: $20 - 1 \cdot 10^{-5} \text{ Гц}$
- частотний діапазон вимірювання сили змінного струму: $20 - 20 \cdot 10^3 \text{ Гц}$.

А.4.3 Похибки вимірів. Межі припустимої відносної похибки при вимірюванні

1. Напруги постійного струму в межах вимірів менше 10мВ

$$\delta = \pm \left[0,006 + 0,3 \left(\left| \frac{U_K}{U_X} \right| - 1 \right) \right].$$

2. Напруги постійного струму в межах вимірів більше 10В:

$$\delta = \pm \left[0,1 + 0,4 \left(\left| \frac{U_K}{U_X} \right| - 1 \right) \right].$$

3. Напруга змінного струму:

$$\delta = \pm \left[0,1 + 0,5 \left(\left| \frac{U_K}{U_X} \right| - 1 \right) \right].$$

4. Сили змінного струму « $\approx 100 \text{ мА}$ », « $\approx 1 \text{ мА}$ »:

$$\delta = \pm \left[0,4 + 0,05 \left(\left| \frac{I_K}{I_X} \right| - 1 \right) \right].$$

5. Активний опір:

$$\delta = \pm \left[0,1 + 0,4 \left(\left| \frac{R_K}{R_X} \right| - 1 \right) \right].$$

А.4.4 Тривалість одного виміру:

$\tau = 800\text{мс}$ на межі « $\leq 10\text{мВ}$ » і « $\leq 100\text{нА}$ »,

80мс – при вимірі постійної напруги і сили постійного струму в інших межах;

10с – при вимірі напруги і сили змінного струму.

А.4.5 Порядок роботи

1. Основні органи управління і підключення розміщені на передній панелі приладу.

« $\overline{\sim} U$ » – клемма для підключення вимірюваних напруг;

« $\overline{\sim} I$ » – клемма для підключення вимірюваних струмів;

«0» – низькопотенційна клемма при вимірі напруг і струмів;

ЭКРАН – клемма для підключення екрана вимірювального кабелю;

« \ominus » – дві пари клем для виміру активного опору.

В середній частині передньої панелі розміщені перемикач меж вимірів і перемикач роду роботи. В положенні « \mathcal{A} » відбувається автоматичний вибір меж вимірів. Перемикачем роду роботи робиться його вибір.

– положення « $\overline{\sim} U$ » – режим вимірювання постійної напруги;

– положення « $\sim U$ » – режим вимірювання змінної напруги;

– положення « $\overline{\sim} I$ » – режим постійного струму;

– положення « $\sim I$ » – режим змінного струму;

– положення «R» – режим опору.

Тумблер СЕТЬ розміщений на задній панелі.

2. Підготовка до вимірювання постійної напруги:

1) під'єднати вимірювальний кабель до клем « $\overline{\sim} U$ », «0» і ЭКРАН;

2) перемикач роду роботи встановити в положення « $\overline{\sim} U$ »;

3) перемикач меж вимірювань встановити на межу, яка вимагається, а якщо вона невідома, то на максимальне значення « $\overline{\sim} U$ »;

3. Підготовка до вимірювання змінної напруги:

1) перемикач роду роботи встановити в положення « $\sim U$ »;

2) перемикачем меж вимірювання встановити необхідну межу, а якщо вона невідома, то на максимальне значення U .

4. Підготовка до вимірювання сили струму:

1) під'єднати вимірювальний кабель до вхідних клем « $\overline{\sim} I$ », «0» і ЭКРАН;

2) перемикач роду роботи встановити в положення « $\overline{\sim} I$ » при вимірі постійного струму або в положення « $\sim I$ » при вимірюванні змінного струму;

3) встановити потрібну межу вимірів.

5. Вимірювання активного опору.

1) під'єднати кабель до вхідних клем «R» і ЭКРАН;

2) перемикач роду роботи встановити в положення «R»;

3) перемикач роду роботи встановити на таку межу виміру, яка вимагається.

Після проведення цих операцій вольтметр готовий до роботи. За необхідності перевірки нуля або проведення будь-яких регулювань звертатися до викладача.

Додаток Б
ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра фізики

Звіти
з лабораторних робіт
з електромагнетизму

Виконав:
ст. гр. ІБрт-04-1
Д.Пончко

Перевірили:
доц. О.М. Коваленко
ас. С.Ю. Протасеня

Харків 2006

Б.1 Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

Б.1.1 Мета роботи: дослідити рух зарядженої частинки у взаємно перпендикулярних електричному і магнітному полях.

Б.1.2 Експериментальні дослідження

Б.1.2.1 Схема лабораторної установки

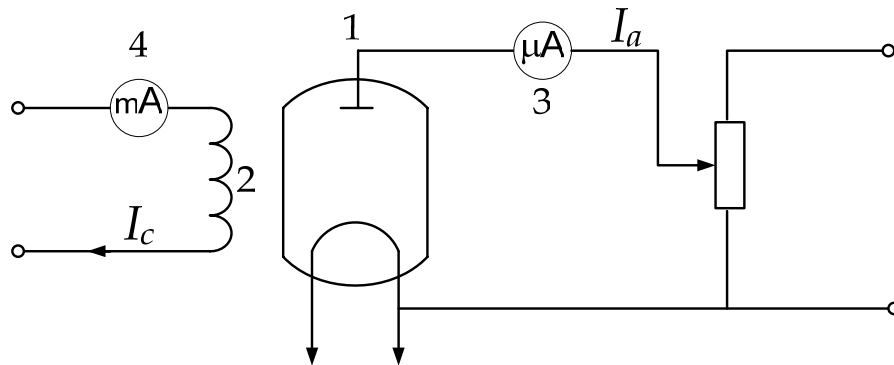


Рисунок Б.1 – Принципіальна електрична схема лабораторної установки

Б.1.2.2 Отримання залежності анодного струму (I_a) від струму соленоїда (I_c) для різних значень напруги, що подається на анод.

Таблиця 1.1 – Результати вимірювань

$U=1\text{В}$	I_c, mA	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	$I_a, \mu\text{A}$	90	90	90	90	87	87	85	85	85	85	82	80	75	45	25	10
$U=2\text{В}$	I_c, mA	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	$I_a, \mu\text{A}$	125	125	125	125	125	125	125	124	122	120	120	115	105	75	35	20
$U=3\text{В}$	I_c, mA	0	10	20	30	40	50	65	70	80	90	100	110	120	130	140	150
	$I_a, \mu\text{A}$	165	165	165	165	162	161	160	160	160	160	160	155	145	100	55	30

Розрахунок похибки прямих вимірювань:

$$\Delta U_a = \frac{2,5 \cdot 3}{100} = 0,075 \text{ (В)},$$

$$\Delta I_a = \frac{2,5 \cdot 200 \cdot 10^{-6}}{100} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ (А)},$$

$$\Delta I_c = \frac{1,5 \cdot 500 \cdot 10^{-3}}{100} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ (А)}.$$

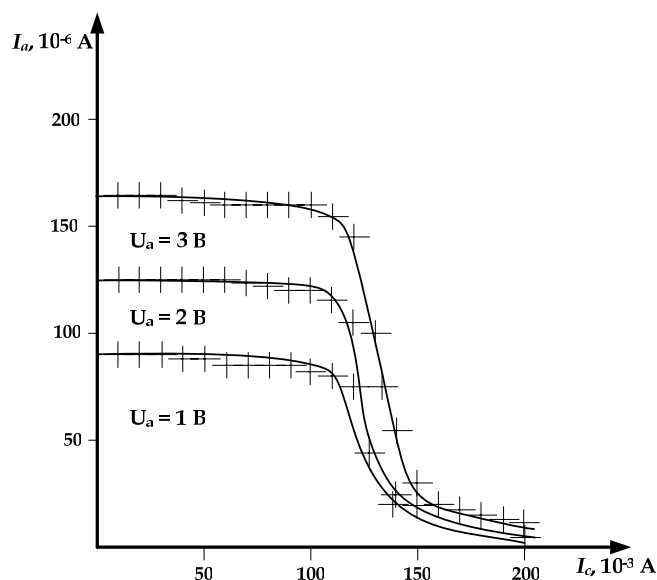


Рисунок Б.2 – Графік залежності анодного струму від струму соленоїда ($I_a = f(I_c)$)

Б.1.2.3 Визначення критичного значення $B_{кр}$. За формулою $B_{кр} = DI_{кр}$, де $D = 3,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Тл}}{\text{А}}$; $I_{кр}$ дорівнює тій величині струму соленоїда, яка на графіку відповідає до $0,85I_0$. Результати занесемо до таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 – Результати розрахунків

$U, \text{В}$	$I_0, \mu\text{А}$	$I_{кр}, \text{мА}$	$B_{кр}, \text{мТл}$
1	90	105	3,8
2	125	120	4,3
3	165	122	4,4

Б.1.2.4 Визначення питомого заряду електрону

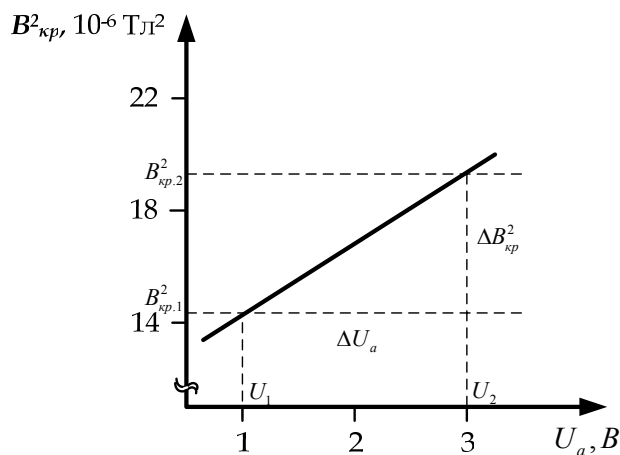


Рисунок Б.3 – Графік залежності $B_{кр}^2 = f(U_a)$.

Знаходження з графіку $B_{кр}^2 = f(U_a)$ питомого заряду електрона, як:

$$\frac{e}{m} = \frac{8}{r_a^2} \frac{(U_2 - U_1)}{(B_{кр.2}^2 - B_{кр.1}^2)};$$

$$\frac{e}{m} = \frac{8}{(4,5)^2 \cdot 10^{-6}} \frac{(3-1)}{(19,27 - 14,29) \cdot 10^{-6}} \approx 1,6 \cdot 10^{11} \left(\frac{Кл}{кг} \right).$$

Б.1.2.5 Визначення похибки питомого заряду електрона

$$\Delta \frac{e}{m} = 2 \cdot \frac{e}{m} \left(\frac{\Delta U_a}{U_2 - U_1} + \frac{\Delta B_{кр}}{B_{кр.2} + B_{кр.1}} \right);$$

$$\Delta \frac{e}{m} \approx 0,4 \cdot 10^{11} \left(\frac{Кл}{кг} \right); \delta = 0,25 \ %.$$

Висновок: У результаті дослідження руху зарядженої частинки у взаємоперпендикулярних електричному і магнітному полях визначено експериментально значення питомого заряду електрону, яке дорівнює $(1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{11} \left(\frac{Кл}{кг} \right)$, що співпадає з теоретичним значенням $\frac{e}{m} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{Кл}{кг}$ в межах отриманої похибки.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Запитання і відповіді до лабораторних робіт з фізики „Електрика та магнетизм”, ч.2 для студентів усіх спеціальностей. / Упоряд. А.І. Рибалка, С.С. Авотін, В.І. Бедратий та ін. – Харків: ХНУРЕ, 2004. – 60с.
2. Савельєв І.В. Курс фізики, т.2 – М.: Наука, 1989. – 464с.
3. Калашникова С.Г. Електрика. – М.: Наука, 1977. – 576с.
4. Сивухін Д.В. Загальний курс фізики: Електрика, т.3, – М.: Наука, 1983. – 519с.
5. Українець М.І., Ткаченко Т.Б., Калінін В.В. та ін. Електромагнетизм. Хвилі. Оптика: Навч. посібник. – Харків: ХТУРЕ, 2000, 2005 – 164с.
6. Лабораторні заняття з фізики / За ред. Л.Л.Гольдїйна. – М.: Наука, 1973. – 688с.
7. Фізичний практикум. Електрика та оптика/ За ред. проф. В.І.Іверонової. – М.: Наука, 1968. – 806с.
8. Коротнєв А.В., Рубльов Ю.В., Куценко А.Н. Практикум з фізики – М.: Вищ. шк., 1965. – 568с.
9. Лабораторний практикум з фізики/ За ред. К.А.Барсукова та Ю.І.Уханова. – М.: Вищ. шк., 1988. – 351с.
10. Черкашин В.П. Фізика. Електрика та магнетизм. – Київ: Вищ. шк., головне видавництво, 1986. – 167с.
11. Фізичний енциклопедичний словник/ За ред. А.М.Прохорова. – М.: Рад. енциклопедія, 1984. – 944с.

Електронне навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт

з дисципліни

«ФІЗИКА»

Частина 2

(Електрика та магнетизм)

для студентів усіх форм навчання

напрямів 6.040301 «Прикладна математика», 6.040302 «Інформатика», 6.040303 «Системний аналіз», 6.050101 «Комп'ютерні науки», 6.050102 «Комп'ютерна інженерія», 6.050103 «Програмна інженерія», 6.050201 «Системна інженерія», 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка», 6.050802 «Електронні пристрої та системи», 6.050803 «Акустотехніка», 6.050901 «Радіотехніка», 6.050902 «Радіоелектронні апарати», 6.050903 «Телекомунікації», 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології», 6.051002 «Метрологія, стандартизація та сертифікація», 6.051004 «Оптотехніка», 6.051402 «Біомедична інженерія», 6.051501 «Видавничо-поліграфічна справа», 6.170101 «Безпека інформаційних і комунікаційних систем», 6.170102 «Системи технічного захисту інформації», 6.170103 «Управління інформаційною безпекою»

Упорядники: КОВАЛЕНКО Олена Миколаївна
ЛАЗОРЕНКО Олег Валерійович
ОРЕЛ Роман Петрович
МЕШКОВ Сергій Миколайович

Відповідальний випусковий: О. В. Лазоренко

Авторська редакція