

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Фізики та прикладної
математики»

В авторській редакції

ЕЛЕКТРИКА. МАГНЕТИЗМ

Навчально-методичні рекомендації
до лабораторних занять

Електронне видання

ДНІПРО
2024

УДК 537.8(076.5)

Е 50

Упорядники:

Е. П. Штапенко, Д. М. Волнянський, О. М. Гулівець, С. А. Гришечкін

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
141 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»
Протокол № 5 від 01.02.2024

Е 50 Електрика. Магнетизм : навчально-методичні рекомендації до лабораторних занять / упоряд. Е. П. Штапенко, Д. М. Волнянський, О. М. Гулівець, С. А. Гришечкін ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – 54 с.

Навчально-методичні рекомендації призначені для використання студентами денної та безвідривної форми навчання всіх спеціальностей УДУНТу під час виконання лабораторних робіт з фізики.

Навчально-методичні рекомендації містять основи теорії помилок, описання вимірювальних приладів та тексти лабораторних робіт, інструкції до виконання лабораторних робіт, вимоги до аналізу результатів та оформлення робіт.

Іл. 36. Табл. 15. Бібліогр.: 3 назви.

© Штапенко Е. П. та ін., упорядкування, 2024

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ВСТУП	4
1. Основні характеристики електровимірювальних приладів	6
2. Звіт про виконання лабораторної роботи	8
3. Правила техніки безпеки	8
ЕЛЕКТРОСТАТИКА	9
Лабораторна робота № 8-1 Вивчення електростатичного поля	9
Лабораторна робота № 8-2 Визначення електроємності конденсатора	11
Лабораторна робота № 8-3 Визначення електроємності послідовного та паралельного з'єднання конденсаторів	14
Лабораторна робота № 8-4 Визначення діелектричної проникності діелектрика	16
ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ	18
Лабораторна робота № 9-1 Визначення питомого опору провідника	18
Лабораторна робота № 9-2 Визначення опору резистора за допомогою моста постійного струму	21
Лабораторна робота № 9-3 Визначення температури розжарювання спіралі електричної лампи	23
Лабораторна робота № 9-4 Робота і потужність в колі постійного струму	26
Лабораторна робота № 9-5 Градування термопари	28
Лабораторна робота № 9-6 Визначення внутрішнього опору і коефіцієнта корисної дії джерела струму	30
ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ	32
Лабораторна робота № 10-1 Визначення індуктивності котушки	32
Лабораторна робота № 10-2 Вивчення закону Ома для змінного струму	35
Лабораторна робота № 10-3 Визначення коефіцієнту трансформації і коефіцієнту корисної дії трансформатора	40
МАГНІТНЕ ПОЛЕ	44
Лабораторна робота № 11-1 Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі	44
Лабораторна робота № 11-2 Перевірка закону Ампера	46
Лабораторна робота № 11-3 Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона	50
Перелік посилань	54

ПЕРЕДМОВА

Розвиток науки і техніки неможливий без знань з таких основоположних наук, як фізика, математика та хімія. Тому поліпшення фізико-математичної підготовки студентів є в даний час важливою задачею. Курс фізики разом з курсом математики складає основу теоретичної підготовки інженерів.

Велику роль у вивченні фізики грає фізичний практикум. У лабораторіях студенти самостійно проводять експериментальні навчальні дослідження, вчаться користуватися сучасними приладами та устаткуванням, осмислюють досліджувані явища, обробляють отримані результати і роблять висновки. Ці навички необхідні для засвоєння спеціальних дисциплін та в наступній виробничій діяльності.

У кожному лабораторному завданні є короткі теоретичні відомості, опис установки, запропоновані методи виміру наведені електричні схеми та порядок виконання роботи. Оновлений лабораторний практикум має деякі особливості. Це, по-перше, адаптованість до лекційного курсу, по-друге, циклічно-тематичний характер лабораторних робіт і, по-третє, орієнтованість лабораторних робіт на перевірку фізичних законів та фізичних величин. Лабораторні роботи згруповані темами в цикли по декілька робіт. Тобто з однієї теми академічна група може виконувати лабораторні роботи декілька занять, в залежності від учбових планів. Темі лабораторних робіт такі:

1. Електростатика.
2. Постійний електричний струм.
3. Змінний електричний струм.
4. Магнітне поле.

Запропонований лабораторний практикум призначений для студентів I та II курсів всіх спеціальностей. Право вибору у виконанні тих чи інших лабораторних робіт належить викладачеві, яких викладає лекційних курс, в залежності від учбової програми для даної спеціальності.

ВСТУП

Електричне коло, як правило, складається з джерела струму, споживача, з'єднувальних провідників і вимірювальних приладів. Живлення до робочих місць підводиться від мережі змінної напруги 220В. Джерелом постійного струму служать випрямлячі або гальванічні елементи.

Для зміни режиму роботи електричного кола і визначення числових значень фізичних величин користуються різними вимірювальними приладами. До них відносяться: вимірювальні котушки опорів, магазини опорів, реостати, реохорди, трансформатори, ключі, рубильники, амперметри і вольтметри постійного і змінного струму.

Магазини опорів являють собою набори котушок опорів, змонтованих в одному корпусі. Для плавної зміни опору кола використовують повзункові реостати й реохорди.

Повзунковий реостат являє собою циліндр із ізоляційного матеріалу, на який намотано дріт з великим питомим опором, витки щільно прилягають один до одного, але струм між ними не йде, тому що дріт покрито тонким шаром окалини, яка є ізолятором. В місцях ковзання контакту шар окалини знято. На корпусі реостату вказано його повний опір і максимально допустимий струм.

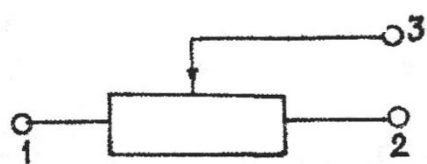


Рис. 1

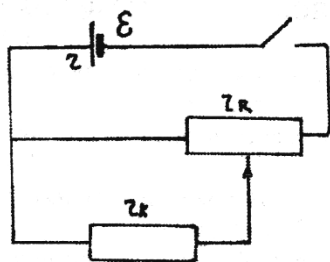


Рис. 2

Реохорд являє собою калібрований дріт (однакового перерізу і сталого питомого опору на всіх ділянках), який натягнуто між двома клемми, закріпленими на панелі, що має лінійку. Вздовж дроту може ковзати контакт.

Схематично реохорд і реостат зображають, як показано на рис.1. Реостат і реохорд включають в електричне коло за допомогою клем 1 і 2, а також повзункового контакту 3, з'єднаного з клемою 3. Часто реостати застосовують для поділу напругою. В цьому випадку реостат включають за схемою потенціометра (рис.2).

Слід мати на увазі, що не кожен реостат може бути використаний як потенціометр.

Потенціометрами можуть бути тільки такі реостати, які задовольняють умові:

$$r_k \gg r_R \gg r$$

де r_k – опір кола, r_R – опір реостата, r – внутрішній опір джерела струму.

Для визначення значень електричних величин (напруги, струму, заряду, опору і т.д.) використовують різні електровимірювальні прилади – гальванометри, вольтметри, амперметри і т.д. Ці прилади класифікують за рядом ознак, деякі з них наведено нижче:

1. За способом визначення вимірюваної величини: прилади безпосереднього вимірювання.
2. За способом видачі результатів вимірювань: такі, що показують; такі, що реєструють (записують).
3. За призначенням: робочі; зразкові.
4. За класом точності: лабораторні; технічні.
5. За принципом дії: магнітоелектричні; електромагнітні; електродинамічні; теплові; індукційні.
6. За характером струму: постійного; змінного; постійного і змінного.

7. За способом установки в процесі вимірювання:

горизонтальні „→”; вертикальні „↑”; похилі $\angle 60^\circ$.

В усіх вимірювальних приладах значення вимірюваної величини визначається за величиною їх дії - механічної, теплової, хімічної і т. д.

1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Клас точності

Клас точності приладу характеризує величину відносної помилки, вираженої в процентах від номінального значення вимірюваної величини, тобто найбільшого значення електричної величини, яке може бути виміряне приладом.

Існують прилади з такими класами точності: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 та 4,0.

Перші п'ять класів приладів – лабораторні, а останні – технічні.

Якщо K – клас точності, X_H – номінальне значення вимірюваної величини, ΔX – абсолютна похибка, то
$$K = \frac{\Delta X}{X_H}.$$

Чим менша вимірювана величина X в порівнянні з номінальною X_H , тим більша відносна похибка виміру. В зв'язку з цим необхідно вибирати прилад таким чином, щоб відлік показань був на другій половині шкали, тобто $X > 0,5 X_H$.

Чутливість і ціна поділки приладу

Чутливістю електровимірювального приладу називається відношення лінійного, або кутового переміщення покажчика до вимірюваної величини, що

спричинила це переміщення, тобто
$$S = \frac{n}{X},$$

де n – лінійне, або кутове переміщення,

X – вимірювана величина .

Приклад. Для вимірювання струму 5 А покажчик приладу змінив своє положення на $n = 50$ поділок . Отже чутливість приладу до струму дорівнює

$$S = \frac{n}{I} = \frac{50}{5} = 10 \frac{\text{под}}{\text{А}}.$$

Величина, обернена до чутливості називається ціною поділки приладу.

Позначається $C = \frac{1}{S}.$

Ціна поділки приладу дорівнює значенню фізичної величини, яке відповідає одній поділці шкали приладу.

Межі вимірювання

Значення вимірюваної величини, при якому стрілка приладу відхиляється до кінця шкали, називається межею вимірювання цього приладу

(номінальне значення).

Електровимірювальні прилади можуть мати кілька меж вимірювань. Необхідно пам'ятати, що при вимірюваннях таким приладом ціна поділки буде різною, а тому слід уміти визначати її.

Приклад. Вольтметр з додатковим опором має три межі вимірювання: 3 В, 15 В, 150 В. Шкала має 75 поділок. Ціна поділки для межі 3 В дорівнює $3/75 = 0,04$ В/под, для межі 15 В – 0,2 В/под, для межі 150 В – 2 В/под.

Принцип дії електровимірювальних приладів

1. Магнітоелектричні прилади

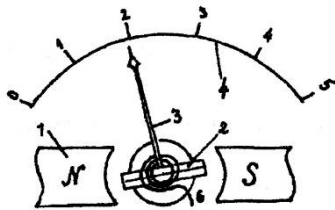


Рис. 3

В магнітному полі сталого магніту 1 (рис.3) знаходиться рамка 2. На осі рамки закріплена стрілка 3, яка переміщується по шкалі 4. Щоб поле, в якому знаходиться рамка, було радіальним, в середині рамки знаходиться осердя з м'якого заліза 5. Через спіральні пружини 6 до рамки підводиться постійний струм.

В результаті взаємодії струму в рамці з магнітним полем магніту виникає обертаючий момент $M_1 = K_1 I$, що діє на рамку і примушує її повертатися. При повороті рамки на кут φ виникає протидіючий момент M_2 пропорційний до кута повороту φ рамки: $M_2 = K_2 \varphi$

Якщо $M_1 = M_2$, то $K_1 I = K_2 \varphi$, звідки: $\varphi = \frac{K_1}{K_2} I$, тобто кут повороту рамки

буде пропорційний до величини струму.

Коефіцієнти K_1 і K_2 та їх відношення залежать від конструкції приладу. Прилади цього типу мають рівномірну шкалу, високу чутливість і використовуються для вимірювання слабких постійних струмів та мають відносно сильне власне магнітне поле.

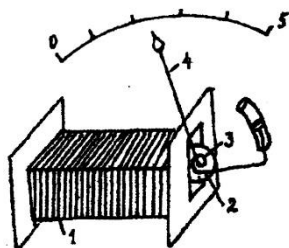


Рис.4

2. Електромагнітні прилади

В цих приладах (рис.4) по нерухомій котушці 1 проходить струм I . Магнітне поле, що виникає при цьому, втягує в котушку залізне осердя 2, що підвішене на пружині 3. З осердям зв'язана стрілка 4, яка переміщується по шкалі 5. Чим більший струм, тим більша сила діє на осердя, тим сильніше розтягується

пружина і тим більше переміщується стрілка по шкалі.

Прилади цього типу можуть застосовуватись для вимірювання постійного і змінного струму, але в залежності від типу струму градування шкали буде різним. Шкала цих приладів нерівномірна. Прилади цього типу

застосовуються для вимірювання порівняно великих струмів і напруги.

ЗВІТ ПРО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Звіт оформляється на окремому листку (А4), який після захисту здають викладачеві.

В звіт повинні бути включені наступні пункти:

1. Назва і номер лабораторної роботи.
2. Короткий опис теорії методу, що застосовується в даній роботі.
3. Опис і креслення схем, приладів та установок.
4. Занесення вимірюваних даних до таблиць.
5. Обчислення шуканих величин за розрахунковими формулами.
6. Обчислення похибок.
7. Побудова графіків.
8. Відповіді на контрольні запитання.

Успіх будь-якої експериментальної роботи залежить від попередньої самостійної підготовки, а тому перші три пункти мають бути виконані до початку занять [1-3].

Під час виконання роботи необхідно систематично виробляти навички точного, акуратного і своєчасного запису всіх вимірюваних величин. Звичка робити обчислення на випадкових шматках паперу недопустима навіть в чорнових розрахунках.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Виконання лабораторних робіт з електрики і магнетизму вимагає суворого дотримання техніки безпеки. Монтаж експериментальної установки проводиться студентами самостійно за принциповою або монтажною схемою, при цьому необхідно пам'ятати наступне :

1. Електричне коло збирається за допомогою з'єднувальних провідників, кінці яких повинні бути добре зачищені для забезпечення надійного контакту.
2. Коло збирають, починаючи від джерела струму, але джерело підключають в останню чергу. При розбиранні схеми перш за все відключають джерело струму.
3. Всі реостати, включені в коло, повинні бути встановлені на максимум опору.
4. Потенціометри встановлюють на нуль напруги, що подається в контур.
5. Всі ключі при збиранні кола повинні бути розімкненими.
6. Замикати коло без перевірки його викладачем категорично заборонено.
7. Коло замикають тільки на час зняття показів.
8. Перемикання в колі, що перебуває під напругою, і дотик до неізольованих частин кола суворо заборонено.
9. Не можна залишати без нагляду коло, що перебуває під напругою.

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Лабораторна робота № 8-1

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи: вивчення електростатичного поля, знаходження положень еквіпотенціальних поверхонь та побудові по ним силових ліній.

Приладдя: установка для вивчення електростатичного поля, яка включає в себе гальванометр, потенціометр, пантограф.

1. Теоретичні відомості

Електричне поле – це особливий вид матерії, який нерозривно пов'язаний з електричними зарядами та який передає дію одних зарядів на інші. Якщо електричне поле розглядати в системі відліку, що є нерухомою відносно зарядів, які створюють поле, то таке поле є електростатичним. Характеристиками електростатичного поля в кожній точці є напруженість та потенціал.

Напруженість електричного поля E у даній точці – це векторна фізична величина, що чисельно дорівнює силі F , з якою поле діє на одиничний позитивний заряд q , вміщений в цю точку, тобто

$$E = F/q.$$

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд, вміщений в дану точку поля. Одиниця напруженості в СІ – 1 В/м.

Потенціал φ – це фізична величина, що чисельно дорівнює роботі A , яку виконує електричне поле при переміщенні одиничного позитивного заряду q з даної точки поля на нескінченність:

$$\varphi = A/q.$$

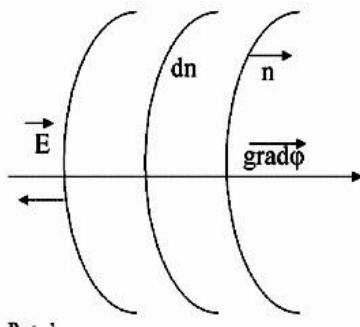


Рис. 1

Потенціал – скалярна величина. Знак потенціалу визначається знаком заряду, що створює поле. Одиниця потенціалу в СІ – 1 вольт.

Графічно електричне поле відображується силовими лініями та еквіпотенціальними поверхнями.

Силова лінія – це лінія, напрям дотичної до якої в кожній точці співпадає з напрямом вектора напруженості електричного поля. **Еквіпотенціальна**

поверхня – це поверхня, всі точки якої мають однакові потенціали.

Між напруженістю та потенціалом електростатичного поля існує зв'язок: напруженість чисельно дорівнює градієнту потенціалу; вона спрямована в бік зменшення потенціалу (рис.1), тобто $E = -grad \varphi$, де $grad \varphi = d\varphi/dn$ – градієнт скаляра, що чисельно дорівнює зміні потенціалу на одиницю довжини у

напрямку, перпендикулярному до екіпотенціальних поверхонь. Силкові лінії в будь-якій точці поля направлені за нормаллю до екіпотенціальної поверхні в цій точці.

Вивчення електростатичного поля замінено вивченням електричного поля малого струму, сталого в часі, оскільки лінії густини струму j співпадають по напрямку з силівними лініями електростатичного поля E . Згідно з законом Ома в диференційній формі

$$j = \gamma E$$

де j – вектор густини струму, напрям якого співпадає з напрямом руху позитивного заряду;

γ – питома провідність електроліту;

E – вектор напруженості в даній точці поля.

Зазначимо, що поверхню провідника в полі струму можна вважати екіпотенціальною, якщо питома електропровідність оточуючого середовища значно менша електропровідності провідника. В цій роботі середовищем, яке проводить струм, є вода ($\gamma = 10^{-7} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$); електрод – металевий ($\gamma = 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$).

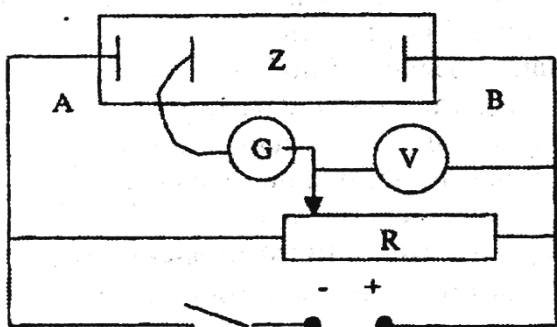


Рис. 2

На рис.2 показана схема установки. В ванну, яка виготовлена з ізолюючого матеріалу, вміщено металеві електроди, на які подається постійна напруга 3 вольта. Ванна заповнюється водою. Для визначення розподілу потенціалу в електричному полі струму застосовано пересувний електрод Z , який через гальванометр G

приєднано до потенціометра R , за допомогою якого можна плавно змінювати різницю потенціалу між електродами B і Z в межах 1 - 3 вольта.

Потенціал електрода Z дорівнює потенціалу регулятора потенціометра і, коли цей електрод знаходиться в точці поля з таким же потенціалом, як у регулятора, струм через гальванометр дорівнює нулю. Оскільки потенціал електрода B дорівнює нулю, вольтметр показує потенціал точки поля, в якій знаходиться електрод.

2. Порядок виконання роботи.

1. У ванні з водою встановити систему з двох електродів A і B .
2. Покласти аркуш паперу в затискачі пантографа.
3. Обвести електродом Z контури поверхонь електродів A і B і зафіксувати їх горизонтальний переріз за допомогою пантографа.

4. Включити живлення установки.
5. Розмістити пересувний електрод Z біля того з електродів, який має нульовий потенціал (вольтметр показує 0). Цей електрод – електрод B на схемі рис. 2.
6. За допомогою регулятора потенціометра встановити на вольтметрі потенціал 0,5 В; пересувним електродом знайти 6-10 точок, які відповідають цьому потенціалу поля (при цьому гальванометр показує нульовий струм).
7. Поєднавши всі ці точки, побудувати еквіпотенціальну лінію.
8. Теж саме зробити для потенціалів 1,0 В, 1,5 В, 2,0 В, 2,5 В, 3,0 В.
9. Побудувати 5-7 силових ліній поля, враховуючи, що силові лінії поля і еквіпотенціальні лінії завжди ортогональні між собою.
10. Визначити величину $grad\varphi$ в декількох областях поля, враховуючи масштаб малюнка.

3. Контрольні запитання

1. Що таке електричне поле?
2. Дайте визначення напруженості та потенціалу електричного поля.
3. В яких одиницях в СІ вимірюються напруженість та потенціал електричного поля?
4. Який зв'язок між потенціалом та напруженістю електричного поля?
5. Сформулюйте теорему Остроградського - Гауса.
6. Яке поле називається однорідним?
7. Побудувати графічне зображення електричного поля зарядженої провідної сфери.
8. Чому дорівнює потенціал і напруженість всередині зарядженої провідної сфери?
9. За допомогою теореми Остроградського-Гауса вивести формулу напруженості зарядженої площини.

Лабораторна робота № 8-2

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: визначення електроємності конденсатору та системи конденсаторів (паралельне та послідовне з'єднання)

Приладдя: гальванометр, мікроамперметр, конденсатори.

1. Теоретичні відомості

Конденсатором називається система, що складається з двох провідників (обкладинок), розділених діелектриком. Заряди на обкладинках однакові за величиною та протилежні за знаком. Напруженість поля в кожній точці в середині конденсатору пропорційна заряду на його обкладинках. Різниця

потенціалів двох точок середині конденсатору також пропорційна до їх заряду. Таким чином:

$$q = C(\varphi_1 - \varphi_2) = CU,$$

де C - електроємність конденсатору. Звідки

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Отже, **електроємність** конденсатору є фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, який потрібно надати одній з обкладинок, щоб змінити різницю потенціалу на його обкладинках на одиницю.

Величина ємності залежить від форми, геометричних розмірів конденсатора, а також від діелектричної проникності середовища, яке заповнює простір між обкладинками. Для плоского конденсатору:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$$

На практиці застосовується з'єднання конденсаторів в батареї. Загальна ємність батареї розраховується за формулами:

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad \text{- при послідовному з'єднанні конденсаторів;}$$

$$C = \sum_i C_i \quad \text{- при паралельному з'єднанні конденсаторів.}$$

Для вимірювання електроємності розроблено багато методів з використанням ланцюгів постійного та змінного струму. В даній роботі для визначення електроємності конденсатора вимірюється заряд, який віддав конденсатор при розряді. Щоб визначити заряд, необхідно знати залежність сили струму під час розряду від часу. В даній роботі досліджується ця залежність і за отриманими даними будується графік $I=f(t)$. Площа, яка обмежена графіком і осями координат, чисельно дорівнює заряду, що віддав конденсатор. Визначивши таким чином заряд і вимірявши вольтметром різницю потенціалів на обкладинках конденсатора на початку розряду, визначають ємність за формулою (1).

Порядок виконання роботи:

1. Зібрати ланцюг за схемою (рис.1).
2. Зарядити конденсатор. Записати в зошит напругу на обкладинках.
3. Розрядити конденсатор через мікроамперметр. При цьому через кожні 5-10 с (по вказівці викладача) фіксуйте силу струму і записуйте її

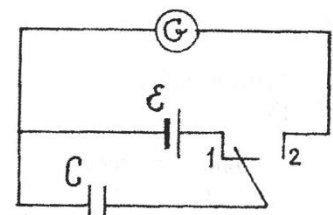


Рис.1

значення в таблицю. Повторіть дослід 5 разів.

Таблиця

Сила струму розряду, А													
Час, с													
Середній час, с													

4. Обчислити середні значення сили струму.

5. За даними таблиці побудуйте графік залежності сили струму (середні значення) при розряді конденсатора від часу (по осі абсцис відкладайте час в секундах, а по осі ординат – силу струму в амперах).

6. Визначте, якому заряду в кулонах відповідає на графіку площа в 1см^2 : для цього помножте час в секундах (відповідно 1 см по осі абсцис) на силу струму в амперах (відповідно 1 см по осі ординат).

7. Підрахуйте площу в квадратних сантиметрах, обмежену графіком і осями координат. Визначте заряд, відповідно всієї цієї площі.

8. Знаючи напругу і заряд, визначте ємність конденсатора, виразіть її у фарадах і мікрофарадах.

3. Контрольні запитання

1. Що розуміють під електроємністю?
2. Виведіть формулу ємності для послідовного з'єднання конденсаторів.
3. Виведіть формулу ємності для паралельного з'єднання конденсаторів.
4. Виведіть формулу ємності плоского конденсатора.
5. Чому дорівнює енергія конденсатора?
6. Запишіть формулу для конденсатора з багатошаровим діелектриком.
7. Які типи конденсаторів ви знаєте?
8. Де знаходять застосування конденсатори?
9. Чи зміниться електроємність плоского конденсатора, якщо посередині між обкладинками вставити тонку металеву пластинку?
10. Порівняти геометричні розміри двох плоских конденсаторів, що мають однакову ємність, але різні робочі напруги.
11. Чи однакова робота витрачається на зарядку конденсатора від 0 до 10 В та від 10 до 20 В?
12. Відстань між пластинами зарядженого конденсатора збільшили у 2 рази. Як це вплинуло на його заряд, ємність, напруженість поля, напругу між обкладинками?

Лабораторна робота № 8-3

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ ПОСЛІДОВНОГО ТА ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ

Мета роботи: визначення електроємності конденсатору та системи конденсаторів (паралельне та послідовне з'єднання)

Приладдя: три конденсатора (ємність одного відома, два конденсатора невідомої ємності), гальванометр, джерело постійного струму.

1. Теоретичні відомості

Конденсатор - є система, яка складається з двох провідників (обкладинок), відокремлених діелектриком, в якій при наявності електричного поля між провідниками усі лінії електричного зміщення замикаються в середині системи. Таким чином, заряди на обкладинках однакові за величиною та протилежні за знаком. Напруженість поля в кожній точці в середині конденсатору пропорційна заряду на його обкладинках.

Різниця потенціалів двох точок поля в середині конденсатору:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_l E_l dl \quad (1)$$

де E_l - проекція вектору напруженості електричного поля на переміщення dl .

Тоді напруга теж пропорційна заряду:

$$q = C(\varphi_1 - \varphi_2) = CU \quad (2)$$

де C - електроємність конденсатору. Звідки $C = \frac{q}{U}$. (3)

Таким чином, **електроємність конденсатору** є фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, який треба надати одній з обкладинок, щоб змінити різницю потенціалу на його обкладинках на одиницю.

Величина ємності залежить від форми, геометричних розмірів конденсатору, а також від діелектричної проникності середовища, яке заповнює простір між обкладинками. Для плоского конденсатору:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad (4)$$

На практиці застосовується з'єднання конденсаторів в батареї. Загальна ємність батареї розраховується за формулами:

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad \text{- при послідовному з'єднанні конденсаторів} \quad (5)$$

$$C = \sum_i C_i \quad \text{- при паралельному з'єднанні конденсаторів} \quad (6)$$

Якщо зарядити конденсатор невідомої ємності C_x і розрядити крізь гальванометр, то відхилення стрілки буде пропорційне пропущеному заряду:

$$q_x = C_x U = k N_x \quad (7)$$

де U – різниця потенціалу на обкладинках конденсатора, а N_x – число поділок відхилення стрілки гальванометра..

Якщо ж тепер зарядити конденсатор з відомою ємністю від того ж джерела та розрядити його через гальванометр, то:

$$q_0 = C_0 U = k N_0 \quad (8)$$

З (7) та (8) отримаємо:

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{N_x}{N_0}, \quad (9)$$

Звідки:

$$C_x = C_0 \frac{N_x}{N_0} \quad (10)$$

2. Порядок виконання роботи:

1. Зібрати ланцюг за схемою (рис.1).
 2. Встановити стрілку гальванометру на нуль.
 3. Зарядити конденсатор з відомою ємністю (C_0).
 4. Розрядити конденсатор крізь гальванометр.
 5. Повторити пункти 3, 4 для кожного з конденсаторів з невідомою ємністю C_{x1} та C_{x2} .
- Розрахувати їх ємність за формулою (10).

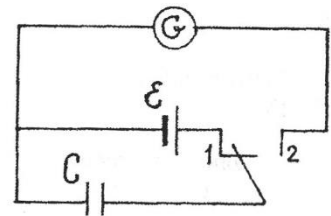


Рис.1

Таблиця

	№	N	C_x, Φ	\bar{C}_x, Φ	$\Delta C, \Phi$	$\delta, \%$
C_0	1					
	2					
	3					
C_{x1}	1					
	2					
	3					
C_{x2}	1					
	2					
	3					
 C_{x1} C_{x2}	1					
	2					
	3					
 C_{x1} C_{x2}	1					
	2					
	3					

6. Повторити пункти 3, 4 для паралельного та послідовного з'єднання конденсаторів C_{x1} , C_{x2} . Порівняти експериментальні та розрахункові значення електроємностей для цих випадків.
7. Результати вимірювань занести в таблицю.
8. Зробити висновок по роботі, в якому проаналізувати отримані результати, відносно похибку, зазначити точність вимірювальних приладів.

3. Контрольні запитання

1. Що розуміють під електроємністю?
2. В яких одиницях в СІ вимірюється електроємність?
3. Вивести співвідношення ємності для послідовного з'єднання конденсаторів.
4. Вивести співвідношення ємності для паралельного з'єднання конденсаторів.
5. Вивести формулу для ємності плоского конденсатора.
6. Чому дорівнює енергія конденсатора?
7. Запишіть формулу для конденсатора з багатошаровим діелектриком.
8. Чи зміниться електроємність плоского конденсатора, якщо посередині між обкладинками вставити тонку металеву пластинку?
9. Порівняти геометричні розміри двох плоских конденсаторів, що мають однакову ємність, але різні робочі напруги.
10. Де знаходять застосування конденсатори?

Лабораторна робота № 8-4

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКА

Мета роботи: визначення діелектричної проникності діелектрика в керамічному конденсаторі з невідомою ємністю.

Приладдя: гальванометр типу М 213-9; джерело електроспоживання для практикуму ІЭПП-1; вольтметр постійного струму МН5М; конденсатор на 30 мкФ; керамічний конденсатор невідомої ємності; штангенциркуль, 15 см; комплект з'єднуючих провідників.

1. Теоретичні відомості

Ємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі S його пластин, діелектричній проникності матеріала ε та обернено пропорційна відстані l між пластинами:

$$C_x = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l}, \text{ звідки } \varepsilon = \frac{C_x l}{\varepsilon_0 S} \quad (1)$$

Товщину l шару діелектрика можна виміряти мікрометром, площину S його пластин розрахувати, вимірюючи штангенциркулем їх довжину та ширину;

ϵ_0 – електрична стала. Залишається невідомою ємність конденсатора C_x ; її можна визначити методом порівняння.

Для цього конденсатор з відомою ємністю C та конденсатор з невідомою ємністю C_x вмикають по чергову в електричне коло, схема якого зображена на рис.1. В положенні I перемикача конденсатор заряджається від випрямляча і накопичує кількість заряду $q=CU$, де U – напруга, яка подається на обкладинки конденсатора від випрямляча.

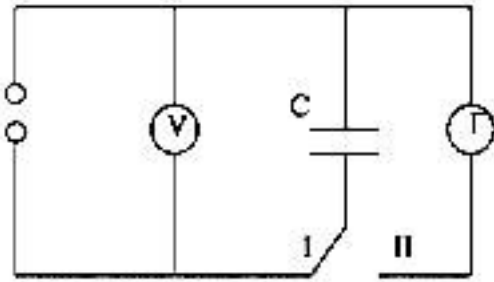


Рис.1.

Якщо перемикач установити в положення II, тобто з'єднати конденсатор з гальванометром, то заряд q потече через гальванометр і виникне короточасний викид стрілки гальванометра на деяке число поділок n його шкали, цей викид пропорційний заряду:

$$n=kq, \quad (2)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції приладу.

Підставляючи у це рівняння вираз, який визначає заряд - $q=CU$, отримуємо:

$$n = kCU. \quad (3)$$

Якщо замість конденсатора C увімкнути в електричне коло конденсатор з невідомою ємністю C_x , то при тих же умовах досліду виникне другий викид стрілки на n_x поділок:

$$n_x = kC_x U \quad (4)$$

Поділивши вираз (4) на вираз (3), отримаємо:

$$\frac{n_x}{n} = \frac{kC_x U}{kCU}, \text{ або } C_x = \frac{n_x}{n} C. \quad (5)$$

Визначивши таким чином ємність конденсатора, можна за формулою (1), знайти діелектричну проникність ϵ діелектрика, який заповнює простір між його обкладинками.

2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричний ланцюг за схемою наведеною на рис.1.
2. Занотувати в зошиті таблицю для запису результатів вимірів та обчислень.

C, Φ	N	n_x	C_x, Φ	$l, \text{мм}$	$S, \text{см}^2$	ϵ

3. Увімкнути конденсатор з відомою ємністю в електричне коло за схемою, зображеною на рис.1. Від джерела постійної напруги подати на його обкладинки напругу 30 В.

4. Перемикачем з'єднати заряджений конденсатор з гальванометром та

занотувати кількість поділок n , на яку здійснився викид стрілки. Дослід повторити три рази та знайти середнє значення $n_{сер}$.

5. Увімкнути в електричне коло керамічний конденсатор з невідомою ємністю. Подати на його обкладки напругу 30 В.

6. Занотувати кількість поділок n_x , на яке здійснюється викид стрілки гальванометра при вмиканні до нього конденсатора з невідомою ємністю C_x . Дослід повторити три рази та знайти середнє значення $n_{сер}$.

7. Визначити ємність невідомого конденсатора C_x за формулою (5).

8. Використовуючи штангенциркуль, виміряти лінійні розміри та розрахувати площу S пластин конденсатора, визначити товщину l діелектрика та обчислити його діелектричну проникність ϵ . Результати вимірів та обчислень занести до таблиці.

3. Контрольні запитання

1. Як класифікуються речовини за електричними властивостями?
2. Пояснити механізм поляризації діелектриків.
4. Навести класифікацію полярних та неполярних діелектриків.
5. Що таке діелектрична проникність?
6. Дати визначення електроємності.
7. Отримати формулу ємності плоского конденсатора.
8. Отримати формулу (5).
9. Охарактеризувати види конденсаторів.
10. Дати визначення напруженості електричного поля.
11. Отримати формулу для визначення напруженості електричного поля у конденсаторі?

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Лабораторна робота № 9-1

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА

Мета роботи: визначення питомого опору провідника за допомогою методу точного вимірювання сили струму та точного вимірювання напруги. Перевірка закону Ома у диференціальній формі.

Приладдя: прилад FPM-01, мікрометр.

1. Теоретичні відомості

У 1826 р. німецький фізик Г. Ом експериментально встановив, що сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника і обернено пропорційна опору цього провідника:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Співвідношення (1) називається *законом Ома для однорідної ділянки кола в інтегральній формі*. Користуючись ним, можна дістати одиницю опору. В СІ опір провідника вимірюється в омах. 1 Ом – опір такого провідника, в якому виникає сила струму в один ампер, коли різниця потенціалів на його кінцях становить один вольт.

Дослід показує, що опір однорідного провідника прямо пропорційний його довжині і обернено пропорційний площі поперечного перерізу:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності ρ , що характеризує матеріал, з якого виготовлено провідник, називають питомим опором речовини провідника. В СІ питомий опір вимірюється в Ом·м.

В *диференціальній формі закон Ома* має такий вигляд:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3),$$

де
$$j = \frac{I}{S} \quad (4),$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5),$$

$$E = \frac{U}{l} \quad (6)$$

В формулах (3), (4), (5), (6) \vec{j} – густина струму в провіднику, \vec{E} – напруженість електричного поля всередині провідника, ρ – питомий опір речовини провідника, σ – питома електропровідність речовини провідника, I – струм у провіднику, U – напруга на кінцях провідника, l – довжина провідника, S – площа перерізу провідника.

В цій роботі питомий опір провідника ρ знаходять за формулою (2). Опір провідника R визначають за допомогою закону Ома, площу перерізу провідника обчислюють за формулою: $S = \pi d^2/4$.

Напругу U на кінцях провідника, силу струму I в ньому, а також довжину провідника l та його діаметр d вимірюють безпосередньо.

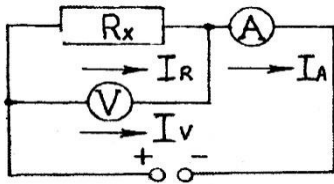


Рис.1

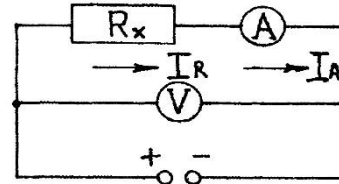


Рис.2

Для визначення опору провідника за формулою (1) існує два методи:

1. Метод точного визначення напруги на кінцях провідника (електрична схема рис.1).
2. Метод точного визначення струму в провіднику (електрична схема на рис.2).

В першому випадку (рис.1) вольтметр показує напругу на кінцях провідника U , опір якого визначається, а амперметр – суму струмів, які протікають через цей провідник і вольтметр: $I_A = I_R + I_V$. Оскільки

$$R_X = U/I_R, \quad I_V = U/R_V, \quad I_R = I_A - I_V,$$

остаточно маємо:

$$R_X = \frac{U}{I_A - \frac{U}{R_V}} \quad (8)$$

При застосуванні електричної схеми, приведеної на рис.2, амперметр показує струм в провіднику – I , а вольтметр показує суму напруг на опорі та амперметрі: $U_V = U_R + U_A$. В цьому випадку $U_V/I = R_X + R_A$ (струми в провіднику та амперметрі – однакові). Отже:

$$R_X = \frac{U_V}{I} - R_A \quad (9)$$

З обох схем видно, що найменші відхилення в результатах вимірів, будуть досягнені, коли опір вольтметра буде набагато більший, а опір амперметра набагато менший опору ділянки кола, в якій вимірюються напруга та струм.

2. Порядок виконання роботи

1. За допомогою рухомого затискача встановити довжину провідника l .
2. Мікрометром виміряти діаметр провідника.
3. Увімкнути установку до джерела змінного струму 220 В.
4. Перемикач виду робіт встановити в положення, яке відповідає рис. 1 – точному вимірюванню напруги. Для трьох значень напруги та струму, зробити підрахунки за формулою (8). Опір вольтметра $R_V = 2500 \text{ В}$.
5. Перемикач виду робіт встановити в положення, яке відповідає рис. 2 – точному вимірюванню струму. Тричі виміряти напругу і струм, зробити

підрахунки за формулою (9). Опір амперметра $R_A = 0,15 \text{ Ом}$.

6. Визначити середнє значення опору провідника.

7. За формулою (2) визначити питомий опір провідника; при цьому за величину опору провідника взяти його середнє значення.

8. За формулами (4), (5), (6) відповідно визначити густину струму, питому електропровідність, напруженість електричного поля всередині провідника.

9. Перевірити правильність закону Ома в диференціальній формі – рівняння (3).

10. Результати занести в таблицю.

Таблиця

Режим	№	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$R_x, \text{ Ом}$	$R_{сер.}, \text{ Ом}$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\sigma, \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$	$l, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$E, \text{ В/м}$	$j, \text{ А/м}^2$
Точне вимірюв. струму	1										
	2										
	3										
Точне вимірюв. напруги	1										
	2										
	3										

3. Контрольні запитання

1. Від чого залежить опір провідника?
2. Запишіть закон Ома в інтегральній формі.
3. Що таке питомий опір?
4. Від чого залежить питомий опір?
5. Дати визначається густині струму.
6. Запишіть закон Ома у диференціальній формі.
7. Що таке питома електропровідність?
8. В яких одиницях в СІ вимірюються опір, питомий опір, питома електропровідність?
9. У чому полягає метод точного визначення напруги та точного визначення струму, які використано у даній роботі?
10. Як визначається напруженість електричного поля усередині провідника?

Лабораторна робота № 9-2

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ РЕЗИСТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ МОСТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи : визначення опору резистора

Приладдя: 2 резистори з невідомим опором, реохорд, джерело постійного струму, чуттєвий гальванометр, магазин опорів, ключ, провідники .

1. Теоретичні відомості

Мостова схема постійного струму, яка скорочено називається мостом Уїтстона, являє собою замкнутий чотирикутник, складений з чотирьох резисторів, з'єднаних між собою проводами. В одну з діагоналей цієї схеми включається джерело струму ε , в іншу - гальванометр G (рис.1). Якщо струм, через гальванометр G , дорівнює нулю, то потенціали крапок C і D ($\varphi_c = \varphi_d$) рівні, а тому і струми $I_1=I_2$, $I_3=I_4$ рівні.

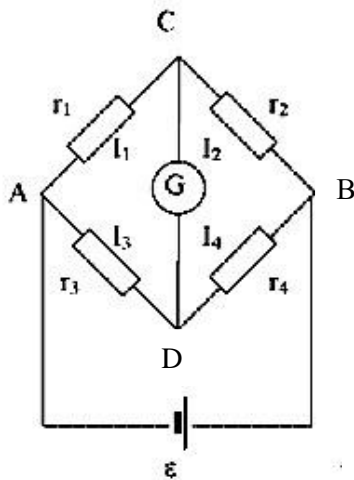


Рис.1

За законом Ома для ділянки ланцюга AC , CB , AD , DB струми I_1, I_2, I_3, I_4 рівні :

$$I_1 = \frac{\varphi_A - \varphi_C}{r_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_C - \varphi_B}{r_2};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_A - \varphi_D}{r_3}; \quad I_4 = \frac{\varphi_D - \varphi_B}{r_4}.$$

Так як $I_1 = I_2$; $I_3 = I_4$ отримуємо:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_C}{r_1} = \frac{\varphi_C - \varphi_B}{r_2}; \quad \frac{\varphi_A - \varphi_D}{r_3} = \frac{\varphi_D - \varphi_B}{r_4};$$

Отже
$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4} \quad (1)$$

Формула (1) дозволяє визначити кожний з чотирьох опорів, що включені у плечі моста, якщо відомі три інші.

Мостова схема, яку застосовують в практиці, представлена на рис.2. В одне з плечей моста включається відомий опір r_{em} , (магазин опорів), в інше – вимірюваний опір r_x . Третє і четверте плечі моста AD і DB є опорами ділянок реохорда AB .

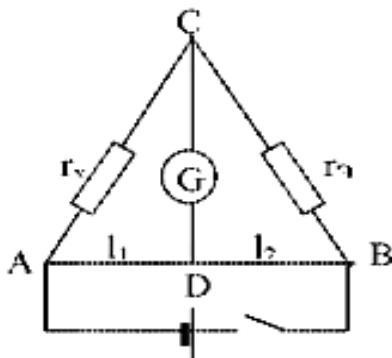


Рис. 2

Реохорд – це натягнутий металевий дріт із міліметровою шкалою. Сполучення гальванометра з реохордом відбувається за допомогою контактної повзунка, що ходить уздовж реохорду .

Якщо опір дроту $R_{AD} = r_1$, а $R_{DB} = r_2$,

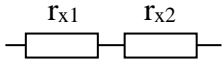
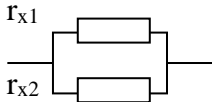
то
$$\frac{r_x}{r_e} = \frac{r_1}{r_2}, \quad \text{звідки:} \quad r_x = r_e \frac{r_1}{r_2}. \quad (2)$$

Враховуючи, що опір провідника прямо пропорційний до його довжини, отримаємо то
$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (3).$$

2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричний ланцюг за схемою (рис.2).
2. Для різних відношень плечей реохорда l_1 і l_2 , заданих викладачем, і кожного з невідомих опорів, визначити еталонний опір r_e за допомогою магазину опорів (не менш 3 разів для кожного опору), який відповідає балансу моста ($I=0$).
3. Повторити п.2 для послідовного і паралельного з'єднання невідомих опорів.
4. Визначити за формулою (2) величини опорів r_{x1} , r_{x2}
5. Результати вимірів порівняти з теоретичними значеннями.
6. Результати вимірів занести в таблицю.

Таблиця

	№	l ₁ , м	l ₂ , м	r _e , Ом	r _x , Ом	r, Ом	Δr, Ом	δ, %
r_{x1}	1							
	2							
	3							
r_{x2}	1							
	2							
	3							
	1							
	2							
	3							
	1							
	2							
	3							

3. Контрольні запитання

1. Що називають опором ?
2. Одиниці виміру опору в СІ.
3. Від чого залежить опір металевого провідника?
4. Фізичне пояснення існування питомого опору провідника?
5. Які фактори впливають на питомий опір провідника?
6. Одиниці виміру питомого опору в СІ.
7. Виведіть розрахункову формулу (2).
8. Як отримали співвідношення (3)?
9. Виведіть формулу для послідовного і паралельного з'єднання провідників.

Лабораторна робота №9-3

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗЖАРЮВАННЯ СПІРАЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЛАМПИ

Мета роботи: експериментальне підтвердження характеру залежності опору металевих провідників від температури.

Приладдя: плата №2 лабораторного столу К-4822-2; вольтметр змінного струму на 250 В; амперметр змінного струму на 500 мА; електрична лампа на 60, або 100 ватт (опір якої при кімнатній температурі – R_{20} становить відповідно 70 Ом та 40 Ом).

1. Теоретичні відомості

Носіями електрики в металах є вільні електрони, які перебувають в безладному, хаотичному русі. Інтенсивність цього руху залежить від температури речовини. Якщо до кінців провідника прикласти напругу, то на хаотичний рух електронів накладається їх упорядкований рух. Цьому руху заважають позитивні іони металу, які розташовані у вузлах кристалічної решітки і які коливаються відносно цих вузлів. При зростанні температури провідника теплові коливання іонів стають більш інтенсивними, що приводить до зростання опору провідника. Залежності питомого опору, а також опору провідників для невеликих інтервалів температур мають такий вигляд:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (1) \quad R = R_0(1 + \alpha t) \quad (2)$$

Тут ρ_0 і R_0 – відповідно питомий опір і опір при 0°C ; t – температура в градусах Цельсія; α - температурний коефіцієнт опору.

Фізичний зміст коефіцієнту опору такий: він чисельно дорівнює відносному зростанню опору при збільшенні температури на один градус.

Спіраль електричної лампи, яка використовується для освітлення, виготовляється з вольфраму. Питомий опір вольфраму ρ в широкому діапазоні температур нелінійно залежить від температури; тому для визначення температури розжареної спіралі користуються таблицею залежності температури від співвідношення її опорів в стані розжарення і при кімнатній температурі - R_T/R_{20} . Температуру спіралі при кімнатній температурі - R_{20} - вимірюють омметром (за допомогою моста Уїтстона), а її температуру в стані розжарення – R_T – за законом Ома для ділянки кола

$$R_T = \frac{U}{I}, \quad (3)$$

де U – напруга, яка прикладена до лампи, а I – струм, який проходить через спіраль лампи.

Таблиця 1

R_T / R_{20}	1	1,03	1,47	1,92	2,41	2,93	3,46	4,00	4,54	5,08	5,65
T, K	293	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
R_T / R_{20}	6,22	6,78	7,36	7,93	8,52	9,12	9,72	10,33	10,93	11,57	12,19
T, K	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
R_T / R_{20}	12,83	13,47	14,12	14,76	15,43	16,10	16,77	17,76	18,15	19,53	20,24
T, K	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200	3400	3500

Примітки: 3655⁰ К – температура плавлення вольфраму.

2. Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло згідно рис.1.
2. Змінюючи напругу на лампі в межах 130 – 220 В (через 10 вольт), виміряти відповідну силу струму.
3. Визначити R_T , за законом Ома (формула (3)).

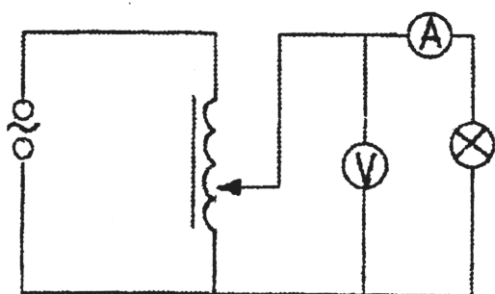


Рис.1

4. Підрахувати співвідношення R_T/R_{20} .
5. Користуючись таблицею 1, визначити температуру розжарення спіралі лампи (з точністю до 10⁰) при різних напругах.
6. Результати вимірів занести в таблицю 2.
7. Побудувати графіки залежності $T = f(U)$ та $R_T = f(T)$.

Таблиця 2

№	R_{20} , Ом	U, В	I, А	R_T , Ом	R_T / R_{20}	T, К
1						
2						
3						
4						
5						

3. Контрольні запитання

1. Що є носієм струму в металах?
2. Як залежить опір металевого провідника від температури?
3. Який фізичний зміст температурного коефіцієнта опору матеріалу?
4. В яких одиницях в СІ вимірюється температурний коефіцієнт опору?
5. Як експериментально визначається опір спіралі лампи в холодному та робочому станах ?
6. Чи є лінійною залежність опору вольфраму від температури в широкому діапазоні температур ?
7. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
8. Який зв'язок між питомим та омичним опором металевого провідника?
9. Пояснити причину збільшення опору металевого провідника з температурою.

Лабораторна робота № 9-4

РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ В КОЛІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Метою роботи є розрахунок роботи і потужності в колі постійного струму при послідовному і паралельному сполученні споживачів.

Приладдя: ВП 1–міліамперметр постійного струму 50 мА; ВП 2–вольтметр постійного струму 50 В; ВП 3–амперметр постійного струму 1 А.

1. Теоретичні відомості

Розглянемо ділянку кола постійного струму, до кінців якої прикладена напруга U . За час t через переріз провідника проходить заряд Q , при цьому виконується робота:

$$A = QU = UIt \quad (1)$$

Враховуючи закон Ома для ділянки кола ($U=IR$), цю формулу можна записати так:

$$A = I^2 R t \quad (2), \quad \text{або} \quad A = \frac{U^2}{R} t \quad (3)$$

Розділивши роботу A на час t , за який вона виконується, одержимо формулу потужності постійного струму:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (4)$$

Якщо на даній ділянці включено кілька споживачів електроенергії, то формули (1)–(4) мають такий же вигляд, але під R слід розуміти загальний опір кола.

2. Порядок виконання роботи

Частина перша

1. Скласти коло, зображене на рис.1.
2. Підключити коло до клем „0 –30 В” блоку живлення.
3. Зняти показання приладів при трьох різних положеннях ручки потенціометра.
4. Обчислити потужність, яку споживають резистори і роботу струму за 10 хвилин.

Частина друга

1. Скласти коло, зображене на рис.2.
2. Підключити коло до клем „0—30 В” блоку живлення.
3. Зняти покази приладів при трьох різних положеннях ручки потенціометра.
4. Обчислити потужність, яку споживають резистори і роботу струму за 10 хвилин.

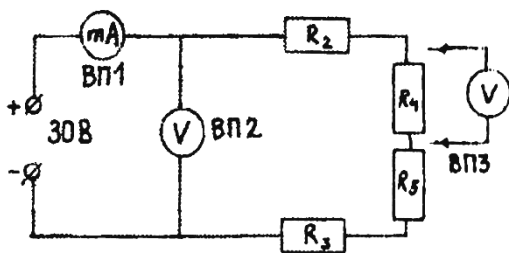


Рис.1

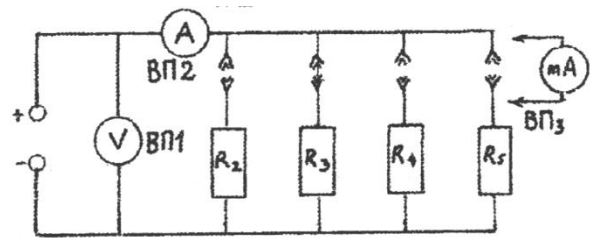


Рис.2

Таблиця

№ n/n	I(мА)	U(В)	P(Вт)	A(Дж)	З'єднання послідовне
1					
2					
№ n/n	I(мА)	U(В)	P(Вт)	A(Дж)	З'єднання паралельне
1					
2					
3					

3. Контрольні запитання

1. Написати розрахункові формули роботи електричного струму.
2. Показати, як з формули (2), отримати формулу (3).
3. Що таке потужність електричного струму?

4. В яких одиницях в СІ вимірюється потужність електричного струму?
5. В які види енергії переходить енергія електричного поля?
6. При якому з'єднанні загальний опір у зовнішньому колі буде більший?
7. Записати закон Джоуля-Ленца для ділянки кола.
8. Записати закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.

Лабораторна робота № 9-5

ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ

Мета роботи: вивчення принципу роботи термопари, градуювання термопари, визначення питомої термо-ЕРС.

Приладдя та приналежності: термопара, мікроамперметр, електронагрівач, ртутний термометр.

1. Теоретичні відомості

Термопара являє собою два різнорідні металеві провідники, з'єднані між собою обома кінцями. Вона може бути використана для вимірювання різниці температур в двох певних точках або для генерування термо-ЕРС. Робота термопари заснована на дифузії електронів, внаслідок чого на межі двох різнорідних металів виникає контактна різниця потенціалів (рис.1).

Контактна різниця потенціалів обумовлена двома причинами:

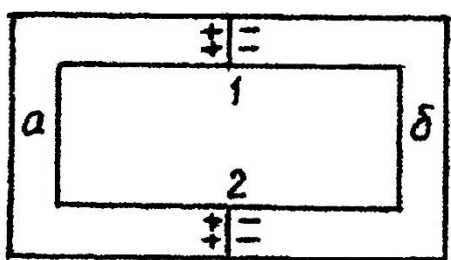


Рис.1

1. Різницею в роботах виходу A_1 та A_2 електронів з металу "а" і металу "б". A_1 та A_2 - робота, яку потрібно виконати, щоб звільнити електрон із металу в вакуум.
2. Різницею концентрацій вільних електронів в металах "а" та "б".

Згідно з уявленнями класичної фізики вільні електрони в металі утворюють електронний газ, тиск якого залежить від їх концентрації. Якщо припустити, що концентрація електронів в металі "а" більша, ніж в металі "б", то внаслідок різниці тисків електронного газу електрони з металу "а" будуть переходити в метал "б". Метал "а" буде при цьому заряджатись позитивно, метал "б" – негативно. На контактi виникне електричне поле, сили якого будуть гальмувати перехід електронів і коли ця сила буде рівною силі, що виникає від різниці тисків електронного газу в металах "а" та "б", подальший перехід електронів припиниться. На контактi встановиться різниця потенціалів:

$$\varphi_a - \varphi_b = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{n_a}{n_b}, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; κ – стала Больцмана.

Доки на контактах "1" та "2" температура буде однаковою, струму в термопарі не буде. Якщо температури контактів різні, то виникає термоелектрорушійна сила, пропорційна різниці температур на контактах:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_0(T_1 - T_2),$$

де ε_0 – середня величина термоелектрорушійної сили, що виникає при різниці температур спаїв на один градус. Ця величина зветься питомою термо - ЕРС.

При великих різницях температур спаїв лінійна залежність термо-ЕРС від ΔT порушується. Тому користуватись термопарою для вимірювання температур можна лише у випадку, якщо відома залежність її термо-ЕРС від різниці температур. Визначення експериментальним шляхом цієї залежності зветься градуванням термопар.

На рис.2 наведена схема установки для градування термопар. Установка складається з електронагрівача H з термопарою T_n та термометром T .

2. Порядок виконання роботи

1. Визначити кімнатну температуру.
2. Помістити термометр в нагрівач.
3. Перемикач "ЛАТР" встановити в положення $0 \div 250$ В.
4. Встановити напругу на ЛАТР $20 \div 25$ В.
5. Провести не менше шести вимірювань температури і відповідних показань мікроамперметра.
6. За законом Ома для кожного значення струму визначити термо-ЕРС, прийнявши опір мікроамперметра 2000 Ом.
7. Результати занести в таблицю.
8. Побудувати графік $\varepsilon = f(T)$.
9. Визначити середнє значення питомої термо-ЕРС.

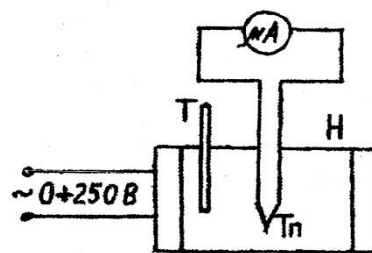


Рис.2

Таблиця

№ вимірювань	Температура		Показання мікроамперметра, мкА	Термо-ЕРС, мкВ	Питома термо-ЕРС, В/К
	холодного спаю, К	гарячого спаю, К			

3. Контрольні запитання

1. Що собою представляє термопара?
2. Яке практичне застосування термопар?

3. Що таке контактний потенціал?
4. Якими причинами обумовлена контактна різниця потенціалів?
5. Що таке питома термо-ЕРС?
6. Навіщо необхідно градувати термопару?

Лабораторна робота № 9-6

ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ І КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Метою роботи є розрахунок ККД джерела в колі постійного струму та внутрішнього опору джерела струму.

Приладдя: амперметр, батарея елементів, магазин опорів.

1. Теоретичні відомості

Під електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму ε розуміють величину, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню по електричному колу одиничного позитивного заряду.

$$\varepsilon = \frac{A_{ст.сил}}{q}$$

У випадку, коли до джерела струму приєднане зовнішнє навантаження, ЕРС можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon = IR + Ir = U + Ir,$$

де U - падіння напруги на навантаженні, що має опір R (закон Ома для ділянки кола); Ir - падіння напруги усередині джерела струму; r - внутрішній опір джерела струму.

У випадку, коли джерело струму замкнуте без зовнішнього навантаження ($R=0$), по колу протікає струм, який називається струмом короткого замикання:

$$I_{к.з.} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Зовнішній ланцюг може складатися не лише з провідника з опором, але ще й з будь-якого пристрою, що споживає енергію від джерела струму; наприклад, електродвигуна постійного струму. У цьому випадку під R потрібно розуміти еквівалентний опір навантаження. Енергія, що виділяється у зовнішньому ланцюгу, може частково або цілком перетворюватися не тільки в тепло, але й в інші види енергії, наприклад, у механічну роботу, виконану електродвигуном.

Тому питання про використання енергії джерела струму має велике практичне значення. Величина спожитої енергії прямо пропорційна напрузі на пристрої, що споживає енергію.

Розглянемо ділянку кола постійного струму, до кінців якої прикладемо напругу U . За час t через переріз провідника проходить заряд Q , при цьому виконується робота :

$$A = QU = IUt \quad (1)$$

Враховуючи закон Ома для ділянки кола, цю формулу можна записати так:

$$A = I^2 R t \quad (2), \quad \text{або} \quad A = \frac{U^2}{R} t \quad (3)$$

Поділивши роботу A на час t , за який вона виконується, одержимо формулу потужності постійного струму

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (4)$$

Якщо на даній ділянці ввімкнене кілька споживачів електроенергії, то формули (1)-(4) мають такий же вигляд, але під R слід розуміти загальний опір кола.

Відношення:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор.}}}{A_{\text{заг.}}} = \frac{P_{\text{кор.}}}{P_{\text{заг.}}} = \frac{U}{E} = \frac{IR}{Ir + IR} = \frac{R}{R + r} \quad (5)$$

називається **коефіцієнтом корисної дії джерела струму**.

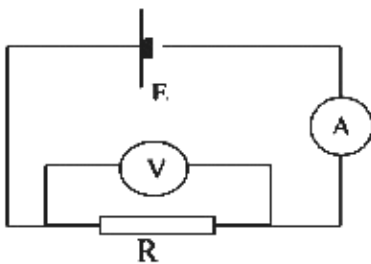


Рис. 1

2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати робочий ланцюг за схемою рис.1.
2. Підключити коло до клем „0 –30В” блоку живлення.
3. Замкнути перемикач, зняти показання вольтметра на джерелі живлення та навантаженні, а також амперметра для п'яти різних положень ручки потенціометра.
4. Розімкнути перемикач і замінити зовнішній опір.
5. Повторити виміри згідно п.2.
6. Розрахувати внутрішній опір джерела і його коефіцієнт корисної дії для різних номіналів опорів.
7. Результати розрахунків і вимірів занести в таблицю.
8. Побудувати графік залежності η від R та I .

Таблиця

№	$R, \text{ Ом}$	$r, \text{ Ом}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$\varepsilon, \text{ В}$	$\eta, \%$
1						
2						
3						

3. Контрольні запитання

1. Дати визначення таке ЕРС?
2. Дати визначення внутрішнього опору?
3. Який струм називають струмом короткого замикання?
4. Як визначається коефіцієнт корисної дії джерела струму?
5. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки кола.
6. Записати закон Ома для повного кола.
7. Як залежить ККД від сили струму?
8. За яких умов у ланцюгу можна одержати максимальну корисну потужність?

З М І Н Н И Й Е Л Е К Т Р И Ч Н И Й С Т Р У М

Лабораторна робота № 10-1

ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ

Мета роботи: опанування експериментального метода визначення індуктивності котушки.

Приладдя: амперметр, вольтметр, котушка, з'єднувальні провідники, осердя.

1. Теоретичні відомості.

Явище виникнення у замкненому контурі електрорушійної сили (ЕРС) при зміні магнітного потоку, що пронизує площу, обмежену контуром, називається електромагнітною індукцією. За законом Фарадея величина ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Φ через поверхню, обмежену контуром:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Знак “–” визначається правилом Ленца: індукційний струм завжди має такий напрямок, що створений ним магнітний потік намагається протидіяти зміні зовнішнього магнітного потоку.

Під час проходження в провіднику змінного струму магнітне поле, що створене цим струмом, теж змінюється, і в провіднику наводиться ЕРС індукції. Виникнення ЕРС індукції внаслідок зміни струму в колі називають явищем самоіндукції. Величина ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни струму:

$$\varepsilon_{e.i} = -L\frac{dI}{dt} \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності L називають індуктивністю контуру. Індуктивність котушки – фізична величина, що чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає при зміні струму на одиницю за одиницю часу.

Провідник має індуктивність в один генрі (1 Гн), якщо при зміні в ньому струму на 1 А за 1 с індукується ЕРС самоіндукції, що дорівнює 1 В.

Відомо ще одне визначення індуктивності: індуктивність контуру чисельно дорівнює магнітному потоку, створеному контуром при силі струму в 1 А. 1 генрі – це індуктивність такого провідника, який створює магнітний потік в 1 вебер (1 Вб) при силі струму в контурі 1 А.

Індуктивність котушки залежить від геометричної форми, розмірів та магнітної проникності середовища μ , що заповнює внутрішню частину котушки (соленоїда):

$$L = \mu \mu_0 n^2 S l, \quad (3)$$

де n – кількість витків на одиницю довжини котушки; S – площа перерізу котушки; l – довжина котушки.

Опір дроту котушки в колі постійного струму r називають активним опором.

Якщо ввімкнути котушку в коло змінного струму, то внаслідок періодичної зміни сили струму в котушці виникає ЕРС самоіндукції. Опір, що обумовлений ЕРС самоіндукції, називають реактивним (індуктивним) опором:

$$X_L = \omega L, \quad (4)$$

де $\omega = 2\pi\nu$ - циклічна частота змінного струму; ν – частота змінного струму (50 Гц); L – індуктивність котушки.

Повний опір контура змінному струму визначають за формулою:

$$Z = \left[r^2 + (\omega L + 1/\omega C)^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Ємнісний опір котушки $X_C = 1/\omega C$ значно малий, тому повний опір котушки можна розрахувати за формулою:

$$Z = \left[r^2 + (\omega L)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Звідси індуктивність котушки

$$L = \frac{(Z^2 - r^2)^{1/2}}{\omega} \quad (7)$$

2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло за схемою рис.1. Визначити активний опір котушки $r = U/I$.
2. Зібрати коло за схемою рис.2.
3. Визначити повний опір котушки в колі змінного струму: а) без залізного осердя, б) з розімкненим осердям, в) зі замкненим осердям, за законом Ома $Z = U_d / I_d$, де I_d та U_d - діючі (ефективні) значення струму та напруги.
4. Розрахувати індуктивність котушки за формулою (7).

5. Результати вимірювань та розрахунків занести в таблицю.

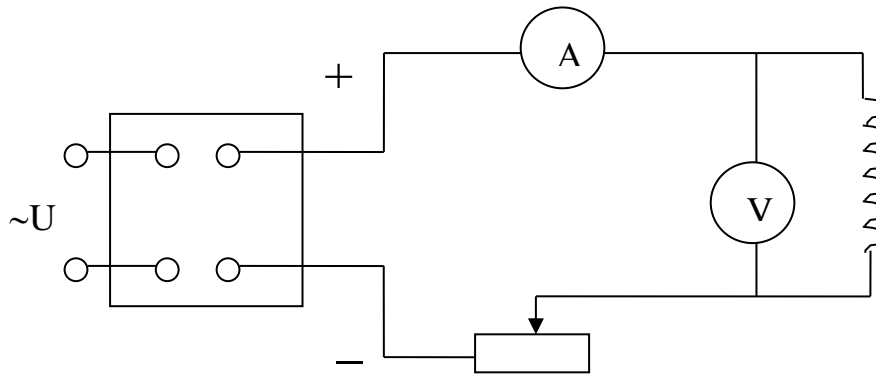


Рис.1

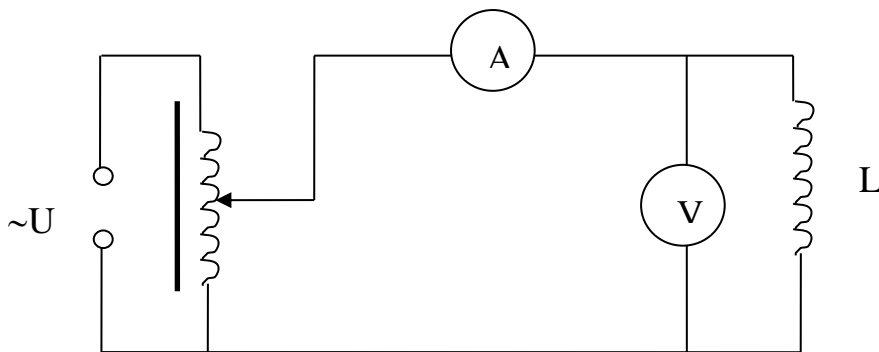


Рис.2

3. Контрольні запитання

1. Навести визначення явища електромагнітної індукції.
2. Що таке ЕРС?
3. Сформулювати закон Фарадея для електромагнітної індукції.
4. Дати визначення явища самоіндукції.

Таблиця

Вид струму	Положення осердя в котушці	№	I, A	U, B	$r, Ом$	$r_{сер}, Ом$	
Постійний	Котушка без осердя	1					
		2					
		3					
Змінний	Котушка без осердя	1	I, A	U, B	$Z, Ом$	$Z_{сер}, Ом$	$L, Гн$
		2					
		3					
	Котушка з розімкненим осердям	1					
		2					
		3					
	Котушка з замкненим осердям	1					
		2					
		3					

5. Сформулювати правило Ленца.
6. Що називають індуктивністю контура? Від чого вона залежить?
7. Одиниці вимірювання індуктивності. Навести визначення.
8. Чому опір котушки в колі змінного струму більший, ніж в колі постійного струму?
9. Від чого залежить повний опір контуру в колі змінного струму?
10. Що називають ємнісним та індуктивним опорами?
11. Чому опір котушки з осердям в колі змінного струму більший, ніж без осердя?

Лабораторна робота №10-2

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: визначення індуктивності котушки, ємності конденсатора та електричного імпедансу.

Приладдя: котушка індуктивності, реостат, амперметр, вольтметр, ключ, набір осередків, конденсатор, міст Уїтстона.

1. Теоретичні відомості

Як відомо, змінне магнітне поле (якими б причинами ці зміни не були викликані) породжує в просторі вихрове електричне поле. Якщо розмістити провідний контур у цьому електричному полі, то у провіднику виникає ЕРС. За законом Фарадея:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad , \quad (1)$$

де Φ – потік індукції магнітного поля.

Нехай джерело змінного струму замкнуте на котушку. Потік індукції магнітного поля Φ пропорційний струму I в ланцюгу:

$$\Phi = LI \quad ,$$

де L - індуктивність котушки. Вона залежить від числа витків, геометричної форми і розмірів котушки, а також від магнітної проникності μ магнетика навколо провідника. Якщо відбувається тільки зміна струму I , а індуктивність котушки не змінюється, то:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

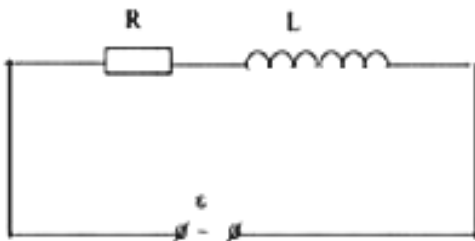


Рис. 1

Звідси індуктивність L чисельно дорівнює електрорушійній силі самоіндукції, наведеної в провіднику при зміні струму на IA на протязі l с.

Якщо число витків і розміри провідника такі, що при зміні струму на IA за l с наводиться ЕРС $\varepsilon = lB$, то його індуктивність дорівнює $l\Gamma_n$.

Розглянемо ланцюг з омичним опором R , індуктивністю L , який містить джерело струму з ЕРС ε (рис.1).

Під R треба розуміти повний омичний опір усього ланцюга. Будемо вважати, що зовнішня ЕРС, прикладена до контуру, змінюється за законом синуса:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad ,$$

де ε_0 – амплітудне значення ЕРС, $\omega = 2\pi\nu$ - циклічна або кругова частота (число повних коливань за 2π секунд); ν - число коливань у секунду.

Правила Кірхгофа встановлені для постійного струму. Але вони справедливі і для квазістаціонарного струму, миттєві значення якого у всіх перетинах ланцюга будуть практично однаковими. Правило Кірхгофа для розглянутого ланцюга запишеться так:

$$IR = \varepsilon + \varepsilon_{\text{самоінд}} \quad (3)$$

де I - струм, що тече у контурі.

Підставляючи в рівняння (3) значення ε і $\varepsilon_{\text{самоінд}}$, маємо:

$$IR = \varepsilon_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt} \quad \text{чи} \quad L \frac{dI}{dt} + IR = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (4)$$

Це рівняння можна розглядати як **узагальнений закон Ома**, у якому член

$L \frac{dI}{dt}$ характеризує спадання напруги на індуктивності L . Тоді ЕРС зовнішнього ланцюга дорівнює сумі падінь напруг на опорі R і індуктивності L .

Частковим розв'язком цього рівняння буде: $I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$,

де I - амплітудне значення струму; φ - початкова фаза, що визначає значення струму I у момент часу $t=0$.

Визначимо амплітудне значення струму I_0 . Для цього знайдемо $\frac{dI}{dt}$ і I з рівняння (4).

звідки
$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} . \quad (5)$$

Отримана формула є **законом Ома для ланцюга змінного струму**, що містить R і L , причому роль опору відіграє величина

$$R_{\Pi} = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} , \quad (6)$$

яка називається повним опором ланцюга. Величина $L\omega$ називається **індуктивним опором** (R_{ind}).

З виразу (6) видно, що при проходженні змінного струму опір ланцюга збільшується за рахунок індуктивного опору.

Розглянемо ланцюг змінного струму, що містить омичний опір R , індуктивність L і ємність C (рис.2).

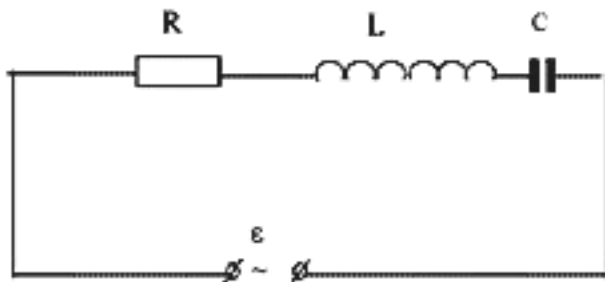


Рис.2

Якщо до обкладок конденсатора підключити джерело змінної напруги, то він буде перезаряджатися й у ланцюзі потече змінний струм. Припустимо, що прикладена змінна ЕРС змінюється за законом: $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$. Тоді відповідно до закону Кірхгофа маємо:

$$IR + U = \varepsilon_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

де IR – різниця потенціалів на омичному опорі; U – різниця потенціалів на ємності; $L \frac{dI}{dt}$ - це ЕРС, що виникає на індуктивності.

Для будь-якого конденсатора справедлива рівність: $Q=CU$, де Q – заряд конденсатора.

За час dt заряд конденсатора зміниться на величину dQ , тоді:

$$dR = Idt, \quad I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt} .$$

Останній вираз можна представити у виді: $\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C}$. Якщо продиференціювати вираз (7) по t і підставити значення $\frac{dU}{dt}$ будемо мати:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t \quad (8)$$

Частковим розв'язком цього рівняння є:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (9)$$

де I_0 - амплітудне значення струму, φ - початкова фаза.

Визначимо амплітудне значення струму I_0 . Для цього, розв'язавши спільно (8) і (9), одержимо остаточно **закон Ома для повного ланцюга змінного струму**:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (10)$$

Знаменник $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ виразу (10) є **повним опором** (імпедансом). У випадку, коли ланцюг не містить ані омичного опору, ані індуктивності ($R=0$, $L=0$), формула приймає наступний вид:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\frac{1}{\omega C}} \quad (11)$$

де $\frac{1}{\omega C}$ - ємнісний опір.

2. Порядок виконання роботи

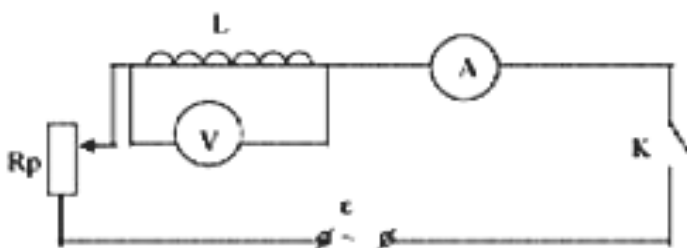


Рис.3

Визначення індуктивності котушки

1. На мосту Уїтстона виміряти омичний опір R досліджуваної котушки.
2. Зібрати електричний ланцюг за рис.3.
3. Реостатом R_p задати різні струми I у ланцюгу і виміряти значення U на самій котушці, що відповідають встановленому струму I .

4. Результати вимірів занести у таблицю:

5. Обчислити повний опір R_n за законом Ома:

Необхідно вимірювати опір R_n при різних струмах (не менше трьох) і за

остаточне значення приймати середнє арифметичне з окремих вимірів.

Таблиця

<i>N₂</i>	<i>R, Ом</i>	<i>I, А</i>	<i>U, В</i>	<i>R_n, Ом</i>	<i>L, Гн</i>	<i>Примітки</i>

Оскільки за даною схемою вимірюється різниця потенціалів безпосередньо на затискках самої котушки, то у виразі (5) під омичним опором треба розуміти опір тільки самої котушки. Підставивши у вираз (5) знайдені значення R_n і R

визначають L по формулі: $L = \frac{\sqrt{R_n^2 - R^2}}{\omega}$.

Дослідження впливу осердя на величину індуктивності

Повторити вимір величини струму I і напруги U і обчислити коефіцієнт самоіндукції L при різних осередках.

Вимір ємності конденсатора

1. Зібрати електричний ланцюг за рис.4.

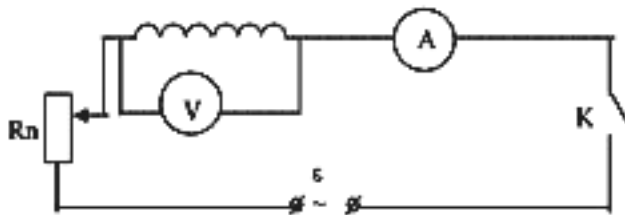


Рис. 4

2. Реостатом встановити у ланцюзі струм I і визначити напругу U на ємності C .

3. Обчислити ємнісний опір по формулі: $R_c = \frac{U}{I}$. R_c визначити для

ряду значень струму і відповідних напруг.

4. За значенням R_c розрахувати ємність конденсатора C :

$$C = \frac{1}{\omega R_c}$$

Визначення імпедансу ланцюга

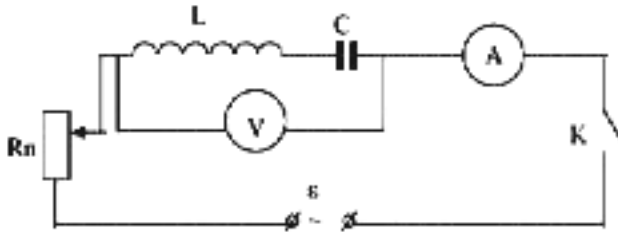


Рис.5

1. Зібрати ланцюг згідно рис.5.
2. Встановити різні значення струму I у ланцюзі і визначити відповідні їм значення напруги U .
3. Визначити повний опір ланцюга, користуючись формулою: $Z = \frac{U}{I}$.

4. Порівняти значення імпедансу,

отримані в результаті дослідів, з його значенням, знайденими за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \text{ де } R, L, C \text{ визначені досвідченим шляхом.}$$

3. Контрольні запитання

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
2. Сформулюйте закон Фарадея.
3. Що називають індуктивністю контуру?
4. Сформулюйте закон Ленца.
5. Виведіть закон Ома для змінного струму.
6. Наведіть формулу періоду власних коливань контуру.
7. Що називають коефіцієнтом трансформації?
8. Як визначити корисну потужність у колі змінного струму?
9. Як зміниться період коливань контуру з плоским повітряним конденсатором, якщо відстань між його пластинами зменшити в k разів?
10. Як зміниться частота коливань у контурі, якщо у k разів зменшити індуктивність котушки і у таке саме число разів зменшити відстань між пластинами плоского конденсатора?

Лабораторна робота №10-3

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТРАНСФОРМАЦІЇ І КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: ознайомлення з роботою трансформатора, визначення коефіцієнта трансформації і ККД трансформатора.

Приладдя: два амперметра змінного струму до 1А, два вольтметра змінного струму до 250В, трансформатор із осердям, реостат на 350 Ом, ключ однополюсний, сполучні провідники.

1. Теоретичні відомості

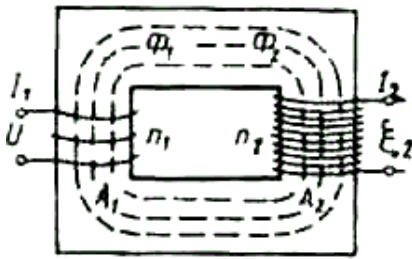


Рис.1

Трансформатор являє собою пристрій, заснований на явищі взаємодукції і призначений для перетворення напруги і сили змінного струму. Він має осердя замкнутої форми з магнітно-м'якого заліза чи магнітно-м'якого феромагнетика, що несе на собі дві обмотки – первинну і вторинну (рис.1).

Кінці первинної обмотки (вхід трансформатора) підключені до мережі змінного струму, а кінці вторинної обмотки (виходи) підключені до споживача електричної енергії. ЕРС індукції, що виникає у вторинній обмотці, пропорційна числу витків у ній, і тому, змінюючи число витків, можна змінювати в широких межах напругу на виході трансформатора.

Розглянемо зв'язок між вхідною U_1 і вихідною U_2 напругами.

Припустимо, що Φ – магнітний потік в осередді. У випадку змінного струму, що змінюється за законом $I=I_0\cos\omega t$, і намагнічування осердя, далекого від насичення, магнітний потік буде також змінюватися по синусоїдальному закону $\Phi=\Phi_0\cos\omega t$, де ω - циклічна частота змінного струму, Φ_0 – максимальне значення потоку. У реальних трансформаторах частина ліній індукції, створюваних первинною обмоткою, виходить із осердя і замикається поза вторинною обмоткою (пунктир на рис.1), утворюючи так званий потік розсіювання.

Однак у гарних трансформаторах потік розсіювання малий у порівнянні з потоком у середині осердя, і тому ми будемо вважати, що той самий потік Φ пронизує обидві обмотки. ЕРС, що виникає в первинній обмотці (ЕРС самоіндукції)

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt} N_1 \quad (1)$$

і ЕРС у вторинній обмотці
$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi}{dt} N_2 \quad (2)$$

де N_1 і N_2 - число витків у первинній і вторинній обмотці відповідно. Застосовуючи до обмоток трансформатора закон Ома для ділянки ланцюга який містить ЕРС, знаходимо напругу на вході трансформатора.

$$U_1 = I_1 r_1 - \varepsilon_1 = I_1 r_1 + \frac{d\Phi}{dt} N_1 \quad (3)$$

і напруга на виході:

$$U_2 = I_2 r_2 - \varepsilon_2 = I_2 r_2 + \frac{d\Phi}{dt} N_2 \quad (4).$$

Тут r_1 і r_2 - опори первинної і вторинної обмоток, а I_1 і I_2 – сили струму в них. Обмежимося випадком розімкнутої вторинної обмотки ($I_2=0$). Далі будемо

вважати (звичайно виконується для всіх технічних трансформаторів), що $I_1 r_1 \ll \varepsilon$.

Тоді, поділяючи почлено рівняння (3) і (4), знаходимо:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} . \quad (5)$$

Відношення $k = \frac{N_2}{N_1}$ називають коефіцієнтом трансформації. Він показує, у скільки разів вторинна напруга більше первинної в режимі холостого ходу.

Якщо трансформатор навантажений (вторинна обмотка замкнута на споживача), то спаданням напруги $I r$ не можна знехтувати в порівнянні з ЕРС індукції, і замість (5) одержуємо більш складне відношення.

Відношення корисної потужності трансформатора до споживаної потужності називається коефіцієнтом корисної дії трансформатора.

$$\text{Корисна потужність} \quad W_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2 , \quad (6)$$

$$\text{споживана} \quad W_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1 , \quad (7)$$

де φ_1 і φ_2 – кути зрушення фаз між відповідними струмами і напругами. Оскільки φ_1 і φ_2 невеликі, то $\cos \varphi_1$ і $\cos \varphi_2$ можна вважати рівними одиниці, тоді вираз для ККД приймає вид:

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} . \quad (8)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора залежить від навантаження: $\eta = f(I_2)$. У сучасних трансформаторах ККД досягає 98 %.

Трансформатор, що утримує обидві обмотки на загальному залізному осередді, уперше винайдений російським ученим П. П. Яблочковим у 1876р. Це відкриття дало можливість застосовувати високу напругу для передачі електроенергії на великі відстані.

Застосування осердя забезпечує зменшення магнітного опору на шляху, по якому замикається основний магнітний потік Φ трансформатора, що зв'язаний з обома його обмотками. Зменшення цього опору досягають за рахунок високої магнітної проникності залізного осердя.

Зменшуючи магнітний опір, ми тим самим значно збільшуємо індуктивний зв'язок між обмотками і створюємо сприятливі умови для передачі енергії у вторинну обмотку.

Пристрій, що споживає енергію (електромотор, лампи накаливання і т.д.) включають до вторинної обмотки трансформатора.

Для зменшення вихрових струмів Фуко і роботи втрати на намагнічування, обумовленої гістерезисом, осередок трансформатора роблять з магнітно-м'яких сортів трансформаторного заліза, виконаного у вигляді окремих пластин,

розділених ізолюючими шарами. Товщина пластин для частоти 50 Гц складає від 0,35 до 0,5мм. Трансформаторне залізо для збільшення питомого опору звичайно містить близько 4% кремнію, що істотно зменшує втрати на вихрові струми.

Трансформатор, виконаний П.П. Яблочковим, а слідом за ним И.Д. Усагіним, мав розімкнуте осердя. Зараз їх роблять замкнутими. За допомогою трансформаторів напругу, яку дає генератор змінного струму, значно підвищують. У нашій країні формується енергетична система з лініями передач змінного струму на напругах 500 000В, 750 000В, 1,5МВ. На місцях споживання електричної енергії послідовним трансформуванням напругу зменшують до потрібної — 220В, 127В і т.д. У підвищувальному трансформаторі напруга зростає, а струм зменшується, а в знижувальному - навпаки. Втрати енергії на трансформаторах не перевищують 2-3 %.

Експериментальна установка

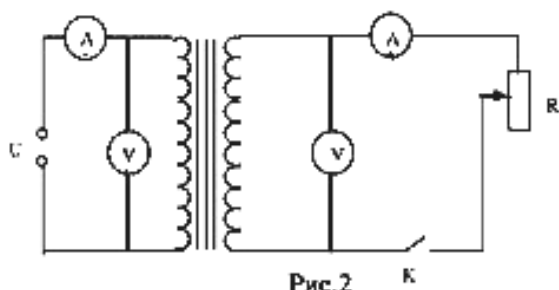


Рис.2

На схемі A_1 і A_2 -амперметри змінного струму до 1А; V_1 і V_2 - вольтметри змінного струму на 250В; Tr - трансформатор із осердям; K - однополюсний ключ. До схеми прикладена змінна напруга 220В частотою 50Гц.

2. Порядок виконання роботи

1. Не підключаючи джерело струму, зібрати електричний ланцюг за рис.2.
2. Не замикаючи ключ K , включити джерело струму і визначити коефіцієнт трансформації за формулою (5).
3. Замкнути ключ K .
4. За допомогою реостата встановити струм навантаження $I_2=0,1$ А та записати показання амперметра та вольтметра.
5. Аналогічно зробити виміри для наступних значень струму навантаження: 0,3; 0,5; 0,7; 0,9А або 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0А.
6. Розрахувати потужність, що підводиться і споживану, відповідно за формулами (6) і (7).
7. Визначити для кожного виміру ККД трансформатора за формулою (8).
8. Результати розрахунків записати в таблицю.

Таблиця

№ n/n	I_1, A	U_1, B	W_1, Bm	I_2, A	U_2, B	W_2, Bm	K	η

3. Контрольні питання

1. В чому полягає явище взаємної електромагнітної індукції?
2. В яких цілях використовують трансформатори?
3. Сформулювати другий закон Фарадея.
4. Які процеси відбуваються в навантаженому трансформаторі?
5. Як визначається коефіцієнт трансформації?
6. Чи можна трансформувати постійний струм?
7. Чому осердя виготовляють з листового заліза, виконаного у вигляді ізолюваних шарів, а не з цілого шматка?
8. З якого матеріалу треба виготовляти осердя трансформатора?
9. Яке значення має замкнута форма осердя?
10. Як буде поводити себе трансформатор, якщо його обмотку ввімкнути до джерела сталої напруги?

МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Лабораторна робота № 11-1

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи: визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі за допомогою магнітного поля струму.

Приладдя: джерело сталого струму на $6 \div 12$ В, амперметр сталого струму, реостат, тангенс-гальванометр (ТГ), перемикач, ключ, провідники.

1. Теоретичні відомості

Земля являє собою природний магніт, полюси якого розташовані приблизно в 300 км від географічних полюсів. Магнітний полюс Землі, розташований на Півночі, зветь Південним магнітним полюсом, а магнітний полюс, розташований на півдні – північним магнітним полюсом. Через магнітні полюси Землі можна провести магнітні меридіани. Перпендикулярно до них проходять магнітні паралелі, тобто кожній точці Землі відповідають не тільки географічні, але і магнітні координати.

Якщо в деякій точці Землі підвісити магнітну стрілку, то вона розташується у напрямку вектора індукції магнітного поля Землі, яке нагадує поле прямого магніту. Силкові лінії цього поля на магнітних полюсах вертикальні, а на магнітному екваторі – горизонтальні. В якій завгодно іншій точці земної поверхні вектор індукції, спрямований по дотичній до силової лінії, складає певний кут з вертикаллю та горизонталлю, тобто вектор індукції магнітного поля Землі має горизонтальну та вертикальну складові.

Магнітна стрілка, яка може обертатись на закріпленій вертикальній осі,

встановлюється в площині магнітного меридіану під дією горизонтальної складової магнітного поля Землі, утворюючи кут з географічним меридіаном. Цей кут називають магнітним схиленням.

Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі виконується за допомогою тангенс-гальванометра. Цей прилад являє собою плоску вертикальну котушку радіусом R з кількістю витків N . В центрі котушки горизонтально розташована коротка магнітна стрілка NS . Якщо розташувати витки тангенс-гальванометра в площині магнітного меридіана Землі, то й стрілка розташується в тій же площині.

Якщо через витки тангенс-гальванометра пропустити сталий струм I , то створюються магнітне поле, вектор індукції якого \vec{B} в центрі котушки спрямований перпендикулярно горизонтальній складовій \vec{B}_0 індукції магнітного поля Землі (рис.1). Магнітна стрілка при цьому відхиляється на кут α .

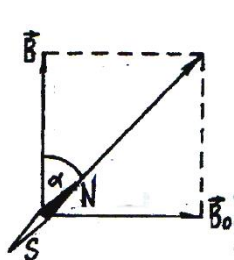


Рис.1

До речі, нагадаємо, що напрям магнітної індукції \vec{B} в центрі кругового витка зі струмом визначається за правилом свердлика.

$$\text{Із рис.1 видно, що } \frac{B_0}{B} = \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

Індукція магнітного поля B у центрі колових витків зі струмом I визначається за формулою:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R} N \quad (2)$$

де R – радіус витка; μ – відносна магнітна проникненість середовища, для повітря $\mu = 1$; μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, N – кількість витків..

Застосувавши (1) та (2), кінцеву розрахункову формулу одержимо у вигляді:

$$B_0 = \frac{\mu\mu_0 IN}{2R} \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис.2).
2. Встановити тангенс-гальванометр в площині магнітного меридіану.
3. Замкнути перемикачі K та K_1 . Реостат при цьому має бути встановлено на максимальний опір.
4. За допомогою реостата r встановити певний струм, записати значення кута α_1 .

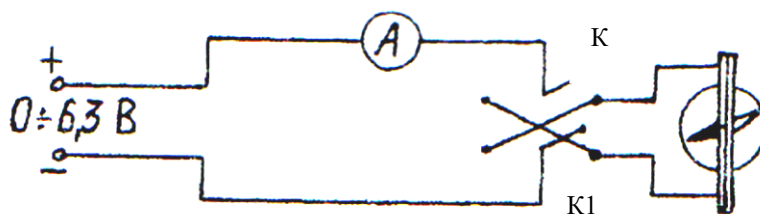


Рис.2.

5. Перемикачем K змінити напрям струму та записати значення кута відхилення стрілки α_2 . Для розрахунків взяти середнє значення α .

Таблиця

№	$R, м$	$N,вт$	$I,А$	$\alpha_1, град.$	$\alpha_2, град.$	$\bar{\alpha}, град.$	$B, Тл$	$B_0, Тл$	$\bar{B}_0, Тл$	$B_0 табл, Тл$
1										
2										
3										
4										
5										

6. Вимірювання провести для п'яти значень струму.

7. Розрахувати для кожного значення струму величину горизонтальної складової магнітного поля Землі та її середнє значення.

8. Результати занести в таблицю. Одержане значення B_0 порівняти з табличним.

3. Контрольні запитання

1. Що таке магнітне схилення?
2. Чому напрями магнітних та географічних меридіанів не співпадають?
3. Що являється джерелом магнітного поля?
4. Дати визначення індукції магнітного поля.
5. Запишіть закон Біо-Савара-Лапласа у диференціальній формі.
6. Напишіть формулу індукції магнітного поля в центрі кругового провідника зі струмом.
7. Як користуватись правилом свердлика?

Лабораторна робота № 11–2 ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ АМПЕРА

Мета роботи: співставити експериментально визначену величину сили Ампера із розрахованою аналітичним шляхом.

Приладдя: провідник, підвіс, постійний магніт, джерело постійного струму, амперметр, електричний ключ.

1. Теоретичні відомості

Навколо будь-якого рухомого заряду, крім електричного поля, існує також і магнітне поле. Електричне поле діє як на рухомі, так і на нерухомі електричні заряди. Магнітне поле діє лише на рухомі в цьому полі електричні

заряди. Щоб охарактеризувати магнітне поле, треба розглянути його дію на певний струм.

Контур зі струмом в магнітному полі повертається, набуваючи рівноважного положення і його позитивна нормаль розміщується певним чином. Магнітна індукція в даному місці магнітного поля визначається максимальним обертальним моментом, що діє на контур з одиничним магнітним моментом або як сила, що діє на дуже маленьку магнітну стрілку, яка сама по собі не створює поле.

Одиниця магнітної індукції - тесла: 1 Тл - магнітна індукція такого магнітного поля, в якому на рамку з магнітним моментом $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ діє максимальний момент сили 1 Н·м.

Лініями магнітної індукції називають такі лінії, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямком вектора \vec{B} в цих точках поля. Лінії магнітної індукції охоплюють провідник зі струмом, який створює поле. Поблизу провідника лінії лежать в площині, що перпендикулярна до провідника. Лінії індукції магнітного поля ні в яких точках не можуть обриватися, вони завжди замкнені.

Напрямок ліній індукції магнітного поля струму визначається за правилом свердлика: якщо вкручувати свердлик за напрямком руху струму в провіднику, то напрямок руху його рукоятки покаже напрям ліній магнітної індукції.

Вигляд ліній магнітної індукції простих магнітних полів показаний на рис.1.

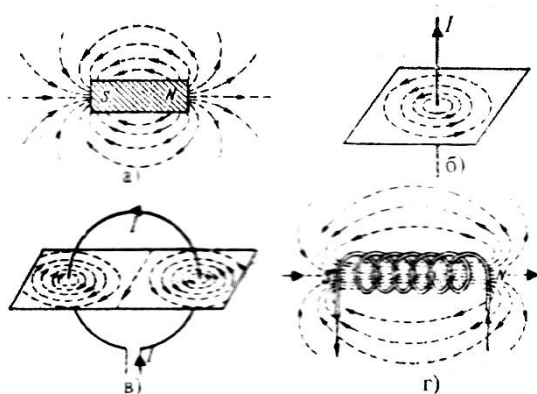


Рис. 1

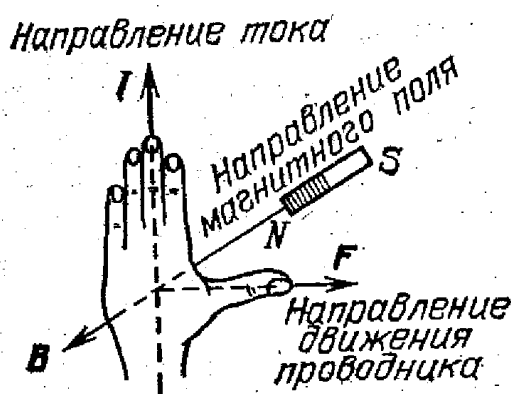


Рис. 2

Лінії індукції постійного магніту виходять із його північного полюса і входять у південний. Північний полюс магніту збігається з тим кінцем соленоїда, з якого струм у витках тече проти стрілки годинника. Магнітне поле колового струму, який є одним витком соленоїда, подібне до поля дуже короткого штабового магніту, що розташований в центрі витка, так щоб його вісь була перпендикулярна до площини витка.

Ампер встановив, що сила $d\vec{F}$, з якою магнітне поле діє на елемент

довжини dl провідника зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, прямо пропорційна до сили струму I в провіднику і до векторного добутку елемента довжини $d\vec{l}$ на магнітну індукцію \vec{B} .

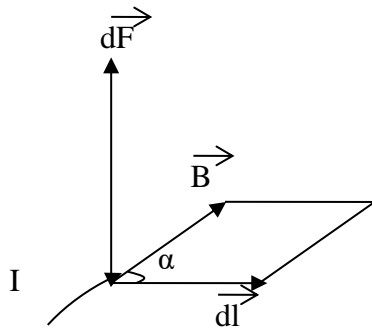


Рис.3

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}] \quad (1)$$

Напрямок сили $d\vec{F}$ можна встановити за правилом векторного добутку і за правилом лівої руки: якщо долоню лівої руки поставити так, щоб у неї входили лінії магнітної індукції, а чотири витягнуті пальці спрямувати в напрямку електричного струму в провіднику, то відставлений на 90° великий палець

покаже напрямок сили, що діє на провідник з боку поля.

Це правило зручне, коли елемент провідника зі струмом перпендикулярний до напрямку магнітного поля. В загальному випадку для визначення напрямку сили Ампера $d\vec{F}$ слід скористатись правилом векторного добутку: вектор $d\vec{F}$ напрямлений перпендикулярно до площини, що утворена векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} так, щоб з кінця вектора $d\vec{F}$ обертання від вектора $d\vec{l}$ до вектора \vec{B} найкоротшим шляхом відбувалося проти годинникової стрілки (рис. 3).

Модуль сили Ампера розраховується за формулою:

$$dF = IBdl \sin \varphi \quad (2)$$

де φ – кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{B} .

Припустимо, що елемент провідника dl із струмом I перпендикулярний до напрямку магнітного поля ($\sin \varphi = 1$), тоді закон Ампера можна записати у вигляді:

$$B = \frac{dF_{\max}}{Idl} \quad (3)$$

Отже, магнітна індукція є силовою характеристикою магнітного поля.

Щоб з'ясувати характер впливу магнітного поля на окрему ділянку ланцюга, по якій тече струм, скористаємося магнітним полем підковообразного магніту. Ланцюг зі струмом складемо так, щоб тільки одна прямолінійна ділянка її виявилася в сильному полі (рис.4). Лише прямолінійна ділянка ланцюга **аб** знаходиться під дією зовнішнього поля, так що сили, які спостерігаються, є силами, з якими магнітне поле діє на прямолінійний струм.

$$F_A = IBl = kI \quad (5)$$

$$F^* = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

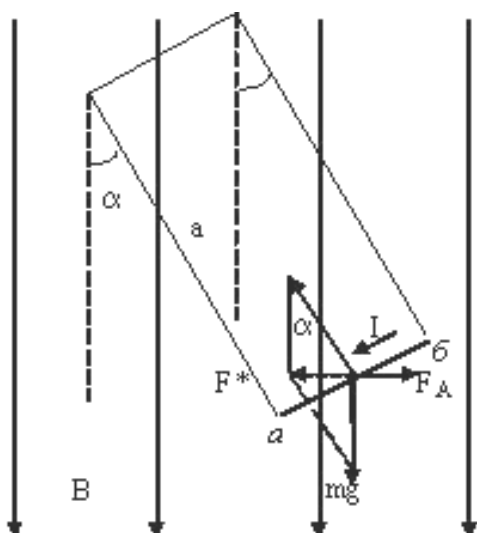


Рис.4

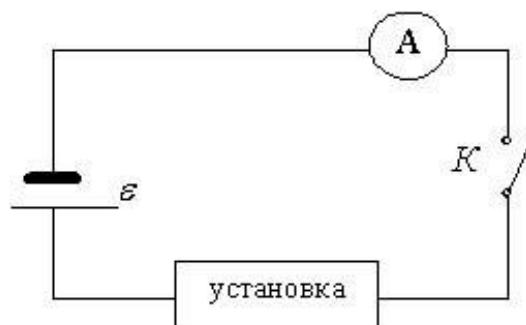


Рис.5

2. Порядок виконання роботи

1. Виміряти довжину провідника l та його масу m , а також довжину підвісу a .
2. Скласти коло за схемою (рис.3).
3. Подати струм і зафіксувати його значення.
4. Виміряти кут відхилення підвісу у стані рівноваги.
5. Змінюючи значення струму та його напрямок повторити пункти 3 та 4 п'ять разів.
6. Змінюючи напрямок струму в провіднику ab (наприклад, за допомогою перемикача K), змінюючи напрямок магнітного поля (наприклад, повертаючи магніт), дослідити напрямок діючої сили.
7. За формулою (6) обчислити значення сили F^* .
8. За значенням константи приладу, вказаною викладачем, розрахувати силу Ампера, що діє на провідник зі струмом.
9. Дані занести в таблицю.

Таблиця

№	m , кг	I , А	L , м	B , Тл	α , град	a , м	F , Н	δ
1								
2								
3								
4								
5								

10. За формулою

$$\delta = \frac{F_A - F^*}{F_A} 100\%$$

визначити відносну похибку дослідів.

Контрольні запитання

1. Що таке магнітне поле і як проявляються його властивості?
2. У чому полягає фізичний зміст магнітної індукції?
3. У яких одиницях вимірюється магнітна індукція?
4. Що таке магнітні силові лінії і які їх властивості?
5. За яким правилом знаходять напрямок вектору магнітної індукції?
6. Що таке один ампер?
7. Сформулювати, при якій умові на провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, буде діяти сила Ампера?
8. Як визначається сила взаємодії двох провідників зі струмом?
9. Від чого залежить напрямок сили взаємодії двох провідників зі струмом (намалювати рисунок)?
10. Що буде відбуватися, якщо змінити матеріал, з якого виготовлений провідник?
11. Як пояснював Ампер причини виникнення магнітного поля штабового магніту?

Лабораторна робота №11-3

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ЗА ДОПОМОГОЮ МАГНЕТРОНА

Мета роботи: визначення відношення заряду електрона до його маси за допомогою аналізу траєкторії руху електронів у електричному та магнітному полі, які діють одночасно.

Приладдя: електронна лампа, соленоїд, міліамперметр, два амперметри, вольтметр, потенціометр, два реостати, ключ.

1. Теоретичні відомості

Магнетроном називається вакуумна лампа, в якій потік електронів керується одночасно електричним і магнітним полями.

Як магнетрон можна використати двохелектродну лампу з циліндричним анодом A і катодом K , яка знаходиться в аксіальному магнітному полі. Поле створюється соленоїдом, який живиться постійним струмом. Соленоїд одягається на балон електронної лампи так, що напрям напруженості магнітного поля (яке створює соленоїд) співпадає з віссю симетрії лампи, вздовж якої розташований катод. При такому розташуванні катода і анода електрони, що випромінюються розжареним катодом, під дією електричного поля рухаються по радіальних траєкторіях при відсутності магнітного поля.

Якщо лампу розмістити в аксіальному магнітному полі, пропустивши струм через соленоїд, то на заряди, що рухаються, буде діяти сила Лоренца

$$F = QBV \sin \alpha \quad (1)$$

де Q - заряд частинок, що рухаються в магнітному полі з індукцією B ;

V - швидкість рухомого заряду;

α - кут, який складає вектор індукції магнітного поля з вектором швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна до швидкості, то роботу вона не виконує і не змінює величину кінетичної енергії зарядженої частинки, а також її швидкості. Магнітне поле спричиняє викривлення траєкторії електронів. При деякому «критичному» значенні індукції магнітного поля $B_{кр}$, електрони не будуть досягати аноду і анодний струм припиниться.

Експеримент по визначенню співвідношення заряду електрона e до його маси m ($\frac{e}{m}$) за допомогою магнетрона полягає в тому, що в лампі встановлюється постійна напруга розжарювання і стала різниця потенціалів між катодом і анодом, тобто створюються умови для постійного анодного струму. Потім включають живлення соленоїда і добиваються припинення анодного струму. Знаючи радіуси циліндрів катода і анода, величину анодної напруги і індукцію «критичного» магнітного поля, при якому припинився анодний струм, можна знайти величину співвідношення $\frac{e}{m}$. Розрахунки дозволяють одержати для цього наступну формулу

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{b^2 \cdot B_{кр}^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2} \quad (2)$$

де U - величина анодної напруги в лампі;

$B_{кр}$ - критична індукція магнітного поля;

a і b – радіуси катода і анода відповідно.

Магнітна індукція $B_{кр}$ соленоїда розраховується за формулою:

$$B_{кр} = \mu_0 \mu n I \quad (3)$$

де μ - магнітна проникність середовища (для повітря $\mu=1$);

μ_0 - магнітна стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

I - сила струму, що йде через соленоїд;

n – число витків на одиницю довжини.

Метод магнетрона виключає необхідність вивчення траєкторії електрона в магнітному полі. Зміною величини індукції магнітного поля B при заданому значенні напруги U досягається така траєкторія електронів, при якій вони не можуть потрапити на анод лампи. Таким чином, дослід зводиться до зняття залежності сили анодного струму I_a від індукції магнітного поля B при сталій

напрузі в анодному колі і колі розжарювання. Різкий спад цієї кривої відповідає критичним умовам роботи магнетрона.

2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схеми, зображені на рис.1 і 2.
2. Після перевірки схеми викладачем увімкнути коло живлення катода, встановивши реостатом R_1 струм розжарювання 1,75А.
3. Увімкнути напругу анодного кола і потенціометром R_2 встановити напругу 160; 180; 200В.
4. Для визначення $V_{кр}$ увімкнути коло соленоїда і реостатом R_3 поступово збільшувати силу струму. Проводячи вимір струму за допомогою амперметра (I_c), слідкувати за спадом анодного струму (I_a) за допомогою міліамперметра.

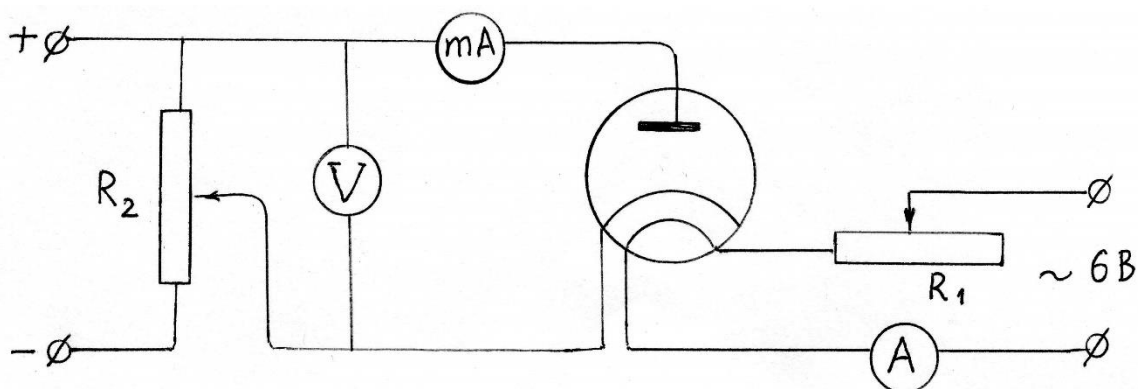


Рис.1. Принципова схема

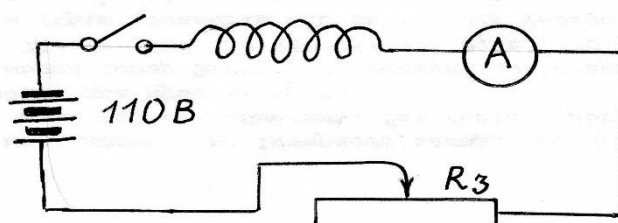


Рис.2. Схема живлення соленоїда

5. Дані занести в таблицю і побудувати характеристики для різних значень напруги U . Слід враховувати, що характеристики не будуть давати вертикального спадання сили анодного струму. Фактично буде мати місце лише крутий спад, який і дозволить визначити $V_{кр}$.

В роботі застосовується лампа 2Ц2С, радіуси електродів якої становлять:

$$a = 0,9 \text{ мм}, b = 9,6 \text{ мм}.$$

6. Обчислити $V_{кр}$ за формулою (3).

7. За формулою (2) визначити питомий заряд електрона $\frac{e}{m}$ для різних значень U .

Перелік посилань

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : навч. посіб. Київ : Техніка, 2001. Т. 2 : Електрика і магнетизм. 452 с.

2. Фізика : методичні рекомендації та завдання для самостійної підготовки студентів до модульно-рейтингового контролю з фізики / В. О. Заблудовський та ін. Дніпропетровськ, 2003. Ч. 2 : Електрика. Оптика. Атомна та ядерна фізика. 36 с.

3. Фізика : методичні рекомендації та завдання для самостійної підготовки студентів до тестового контролю з фізики / В. О. Заблудовський та ін. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. Ч. 3 : Електрика. Магнетизм. 44 с.

Навчально-методичне видання

Штапенко Едуард Пилипович,
Волнянський Дмитро Михайлович,
Гулівець Олексій Миколайович,
Гришечкін Сергій Анатолійович

ЕЛЕКТРИКА. МАГНЕТИЗМ

Навчально-методичні рекомендації до лабораторного практикуму з фізики

Електронне видання

Експертний висновок склала канд. фіз.-мат. наук, доц. Михайлова Тетяна Федорівна

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 692 від 09.02.2024)

В авторській редакції
Комп'ютерна верстка О. М. Гулівець
Фахівець з цифрового видавництва О. М. Гулівець

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 3, 14. Обл.-вид. арк. 2, 02.
Зам. № 4

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

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