

Міністерство освіти і науки України
Кіровоградський державний педагогічний університет
імені Володимира Винниченка

Сазонова О.О., Сальник І.В., Сірик Е.П., Ткачук І.Ю., Царенко О.М.

Лабораторний практикум з курсу загальної фізики

частина 3

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

навчально-методичний посібник

Кіровоград, 2009

ББК 74.265

П69

Сазонова О.О., Сальник І.В., Сірик Е.П., Ткачук І.Ю., Царенко О.М. Лабораторний практикум з курсу загальної фізики: Навчально-методичний посібник. Частина 3. Електрика і магнетизм.–Кіровоград:РВВ КДПУ ім. Володимира Винниченка, 2009. – 108 с.

**Рецензенти: Вовкотруб Віктор Павлович – доктор педагогічних наук,
професор кафедри фізики та методики її викладання;
Ткачук Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент
кафедри загальнотехнічних дисциплін та методики тру-
дового навчання.**

У посібнику описано рекомендації щодо виконання лабораторних робіт фізичного практикуму з електрики і магнетизму. Тематику і зміст робіт узгоджено з галузевим стандартом вищої освіти за напрямом підготовки 6.040203 Фізика* та навчальної програми курсу загальної фізики. / Укладачі: Шут М. І., Горбачук І. Т., Сергієнко В.П. – К.: НПУ, 2005. – 45 с.

При підготовці посібника використано матеріали Фізичного практикуму / за редакцією В.П. Дуценка – К.: Вища школа, 1981; Лабораторного практикума по общей физике/ под ред. Е.М.Гершензона и М.М. Малова. – М.:Просвещение,1985 та Методичних вказівок до лабораторних робіт з курсу загальної фізики. ч.3. Електрика і магнетизм //Укладачі: Волков Л.О., Волчанський О.В., Гамалій В.Ф., Мамонтова Ю.М., Ткачук І.Ю. – Кіровоград: КДПІ, 1997.

Для студентів вищих навчальних закладів, які вивчають курс загальної фізики.

Рекомендовано до друку методичною радою Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка (протокол № 3 від 21 жовтня 2009 року)

© Сазонова О.О., Сальник І.В., Сірик Е.П., Ткачук І.Ю., Царенко О.М.

ЗМІСТ

Загальні положення.....	4
Лабораторна робота № 1. Вимірювання опорів провідників методом місткової схеми.....	20
Лабораторна робота № 2. Визначення внутрішнього опору і перевідних коефіцієнтів стрілочного гальванометра.....	29
Лабораторна робота № 3. Визначення електрохімічного еквівалента речовини та обчислення величини елементарного заряду.....	34
Лабораторна робота № 4. Визначення електрорушійних сил методом компенсації	39
Лабораторна робота № 5. Вивчення вакуумного діода.....	44
Лабораторна робота № 6. Вивчення вакуумного тріода.....	48
Лабораторна робота № 7. Вивчення термопари.....	53
Лабораторна робота №8. Визначення індукції магнітного поля за допомогою балістичного гальванометра.	58
Лабораторна робота №9. Перевірка закону Ома для кіл змінного струму.....	64
Лабораторна робота №10. Ознайомлення з роботою електронного осцилографа та визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки.....	74
Лабораторна робота №11. Вимірювання потужності, що виділяється в колах змінного струму.....	85
Лабораторна робота №12. Вивчення залежності потужності джерела струму від опору навантаження.....	93
Лабораторна робота №13. Визначення електроємності конденсатора за допомогою моста змінного струму	99
Література.....	105
Додатки	106

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

I. Організація лабораторних занять і питання техніки безпеки

Лабораторний практикум курсу загальної фізики (розділ “Електрика і магнетизм”) має на меті:

- експериментально підтвердити справедливість найбільш важливих фізичних закономірностей з електрики і магнетизму;
- показати експериментальні методи визначення окремих, важливих фізичних величин з електрики і магнетизму;
- вдосконалити вміння студентів обробляти результати прямих і непрямих вимірювань.

Підготовку до виконання лабораторної роботи необхідно розпочинати з вивчення теоретичного матеріалу з відповідної теми використовуючи методичні рекомендації та пропоновану літературу. Вивчення приладів і самої експериментальної установки вимагає попередньої практичної роботи з ними безпосередньо за робочим столом під контролем завідуючого лабораторією на самопідготовці.

Виконуючи роботу слід суворо дотримуватись правил безпеки. Треба пам'ятати, що змінний струм порядку 15 мА викликає в тілі людини неконтрольоване скорочення м'язів, а дія струму 25-50 мА поширюється на м'язи грудної клітини, що може призвести до зупинки дихання. Струм порядку 100 мА веде до розладу дії м'язів серця і тому становить найбільшу небезпеку. Опір тіла людини може змінюватись в межах від 500000 до 500 Ом, тому напруга більша 42 В постійного (чи 36 В змінного) струму становить реальну небезпеку ураження людини.

Під час виконання лабораторних робіт з електрики і магнетизму слід дотримуватись таких правил:

- 1) Працювати в лабораторії лише в присутності викладача або

лаборанта.

2) Під час складання електричних схем користуватися лише справними провідниками. Складаючи електричну схему, спочатку сполучають всі елементи, які вмикаються в коло послідовно, а потім ті, що вмикаються паралельно. Джерело струму приєднують до кола в останню чергу.

3) За допомогою коректора встановлюють стрілку кожного вимірювального приладу на нуль і вибирають потрібні межі вимірювання.

4) Вмикати електричне коло і розпочинати роботу можна лише з дозволу керівника занять після перевірки ним (або лаборантом) електричної схеми.

5) Категорично забороняється робити зміни в схемах, ремонтувати прилади чи елементи установки, коли увімкнено джерело струму.

6) Забороняється перевіряти наявність напруги в колі дотиканням хоча б до одного з провідників мережі.

7) При надмірному нагріванні провідників, виникненні запаху горілої гуми чи диму, слід негайно вимкнути електричне коло та повідомити про це викладача (лаборанта).

8) Забороняється залишати без нагляду увімкнену лабораторну установку чи окремі прилади.

9) Після виконання вимірювань провести розрахунок принаймні одного результату і показати його керівникові занять або лаборанту.

10) Після закінчення роботи розібрати схему і привести прилади до стану надійного зберігання.

2. Загальна характеристика електровимірювальних приладів

Електричні величини, такі як сила струму, напруга, опір, електрорушійна сила (ЕРС) і тому подібне, безпосередньо дослідниками сприйматися не можуть. Тому в електровимірювальних приладах досліджувана величина перетворюється в іншу, пов'язану з нею певною функціональною залежністю і доступну для безпосереднього сприйняття спостерігачем. Різноманітні електровимірювальні прилади досить різні за своїм принципом дії та конструкцією.

Прилади з електромеханічним перетворенням. Загальний принцип дії таких приладів (зазвичай – це прилади із стрілочним відліком) полягає в тому, що в приладі є два елементи: струмопровідна частина у вигляді котушки, якою тече досліджуваний електричний струм, і вимірювальний механізм, який взаємодіє з котушкою і в якому вимірювана величина перетворюється в механічну, – в кутове переміщення. Ця друга частина теж може бути котушкою. Один з цих двох елементів виконується рухомим. Кут повороту рухомої частини і є сигналом, що несе інформацію про вимірювану величину.

За типом взаємодіючих елементів і за характером їх взаємодії електровимірювальні прилади з електромеханічним перетворенням діляться на ряд систем, з яких розглянемо тільки три найбільш поширені.

Прилади магнітоелектричної системи. У приладах цього типу досліджуваний струм пропускається через легку рухому котушку, поміщену між полюсами нерухомого постійного магніту (рис. 1). Відомо, що на котушку із струмом в магнітному полі діє сила, що створює обертальний момент – повертає котушку. У вимірювальному механізмі приладу (на рухомій його частині) розміщується пристрій, що створює протидіючий обертальний момент, пропорційний кутові

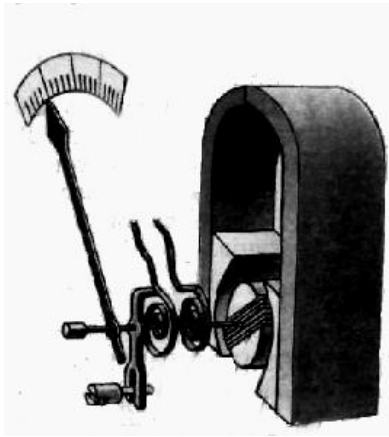


Рис. 1

повороту котушки. За цих умов кут повороту α котушки виявляється пропорційним силі струму I , що протікає нею, тобто $\alpha \sim I$.

При зміні знаку I (тобто напрямку струму) зміниться і напрям відхилення рухомої частини приладу. Тому прилади магнітоелектричної системи можуть застосовуватися тільки для вимірювань в колах постій-

ного струму. З котушкою, прихованою в корпусі приладу, зв'язана стрілка, що ковзає вдовж циферблату, на якому нанесені поділки. Іноді до неї прикріплено дзеркальце і спостерігається відхилення відбитого від нього світла, що ковзає шкалою. На циферблаті приладів магнітоелектричної системи ставиться символ « $\ominus$ » і знак « $\rightarrow$ », вказуючий на те, що прилад призначається для вимірювань в колах постійного струму.

Завдяки високій чутливості магнітоелектрична система використовується для побудови гальванометрів. У найбільш чутливих дзеркальних гальванометрах котушку K підвішують на пружній нитці

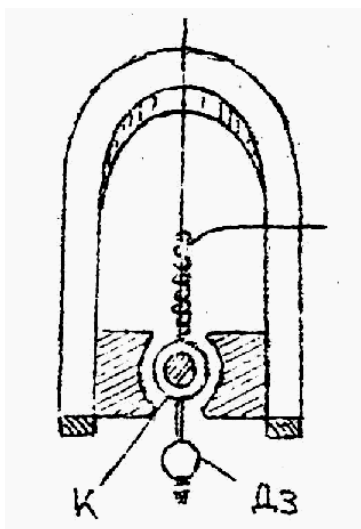


Рис. 2

з фосфористої бронзи (рис.2). Кут повороту котушок визначають за шкалою та світловим зайчиком, що утворюється пучком променів, відбитих від дзеркальця $ДЗ$, що обертається разом із котушкою.

Перевагами магнітоелектричних приладів є висока точність та чутливість ($\sim 10^{11}$ мм/А), рівномірна шкала, порівняно незначний вплив на них зовнішніх полів і температури. Їх недо-

ліками є: придатність тільки для постійного струму, чутливість до перевантажень, складна конструкція.

Прилади електромагнітної системи. У цих приладах використовується взаємодія струмопровідної котушки, цього разу нерухомої, із залізним диском на стрижні, який намагнічується в магнітному полі котушки і втягується в неї (рис. 3). Диск зі стрижнем і є рухомою частиною приладу. З ним пов'язана стрілка, що повертається при русі. Кут відхилення стрілки в приладах електромагнітної системи пропорційний струму в котушці та намагніченості диску. Але сама намагніченість пропорційна струму в котушці. Тому кут повороту стрілки пропорційний квадрату струму в котушці. Завдяки цьому зміна напрямку струму не призводить до зміни напрямку відхилень стрілки, і прилади електромагнітної системи придатні для вимірювань у колах змінного і постійного струму. Оскільки $\alpha \sim I^2$, шкала приладів електромагнітної системи нерівномірна: відстань між поділками шкали на початку менша, ніж в середині та в кінці. На шкалі приладів цієї системи ставиться символ « $\equiv$ » і знак « $\sim$ », вказуючи на те, що ці прилади можна використовувати в колах постійного і змінного струму.

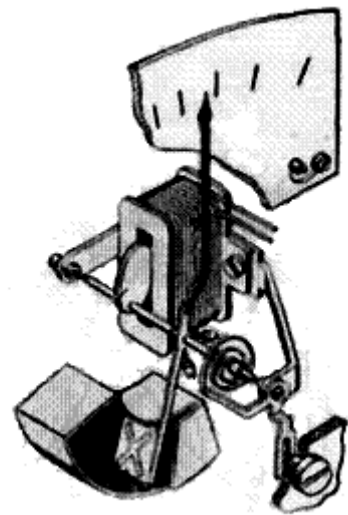


Рис. 3

Перевагами приладів електромагнітної системи є: придатність їх як для постійного, так і змінного струму, простота конструкції, стійкість до перевантажень.

Їх недоліки: мала точність, нерівномірність шкали, залежність показів від зовнішніх магнітних полів. Щоб зменшити цю дію, прилади екранують металевим кожухом.

Прилади електродинамічної системи. Тут використовується електромагнітна взаємодія двох послідовно сполучених котушок, через які проходить досліджуваний струм (рис.4). Одна з них рухома, інша нерухома. При проходженні струму рухома котушка повертається в магнітному полі нерухомої котушки. Разом з нею повертається з'єднана з нею стрілка. До рухомої котушки прикладений протидіючий момент, завдяки якому кут повороту стрілки виявляється пропорційним струму в кожній з котушок, тобто квадрату струму. Зрозуміло, що прилади електродинамічної системи придатні для вимірювань в колах постійного і змінного струму. На шкалах приладів електродинамічної системи ставиться символ « $\equiv$ » і знак « $\sim$ ».

Перевагами електродинамічних приладів є: висока точність, ними можна вимірювати як постійний, так і змінний струм, можна вимірювати потужність.

Їх недоліками є: нерівномірність шкали, залежність показів від зовнішніх магнітних полів, чутливість до перевантажень.

Для описаних вище приладів характерно, що їх покази є безперервною функцією вимірюваної величини: будь-якому значенню вимірюваної величини відповідає певне показання приладу. При безперервній зміні вимірюваної величини безперервно змінюються і покази приладу. Електровимірювальні прилади, покази яких володіють та-

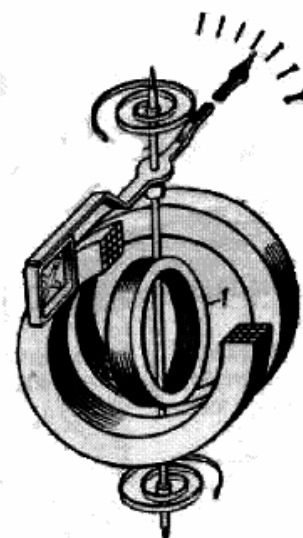


Рис. 4

кою властивістю, називаються *аналоговими приладами*.

Електровимірювальні прилади всіх перерахованих систем виготовляються для вимірювання різних електричних величин – сили струму, напруги, потужності. Не відрізняючись один від одного принципом дії, вони розрізняються, перш за все, значенням опору струмопровідної частини приладу і градуюванням шкали. Розглянемо детальніше електровимірювальні прилади для вимірювання напруги і сили струму. Перші називаються вольтметрами, другі – амперметрами. Ці назви і значаться на шкалах (часто замість слова "вольтметр" ставлять літеру **V**, а замість слова "амперметр" – літеру **A**). Прилади, призначені для вимірювання малих струмів, називаються міліамперметрами або мікроамперметрами, на що вказують відповідні позначки на циферблатах – mA і μA . Аналогічно позначаються мілі- і мікровольтметри – mV та μV . Амперметри, як і вольтметри, реагують на струм, що протікає в котушках їх вимірювальних механізмів.

Якщо потрібно вимірювати силу струму на якійсь ділянці електричного кола, то амперметр повинен бути увімкнений послідовно з цією ділянкою, тому що при послідовному з'єднанні провідників сила струму в них однакова. Проте ясно, що приєднання амперметра в досліджувану ділянку не повинне помітно змінювати силу струму в ньому, оскільки ця величина підлягає вимірюванню. Тому потрібно, щоб опір амперметра був набагато меншим опору тієї ділянки кола, в

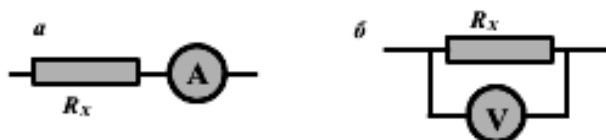


Рис.5

яку він увімкнений. У цьому і полягають особливості амперметрів і їх приєднання (рис.5,*a*).

Вольтметри, призначення яких вимірювати напругу (різницю

потенціалів) повинні, навпаки, під'єднуватись паралельно тій ділянці кола, на кінцях якої потрібно виміряти напругу (рис.5,б), тому що при паралельному з'єднанні провідників напруга на їх кінцях однаково. Але і тут очевидна вимога, щоб приєднання приладу не змінювало по можливості вимірювану напругу. Для цього необхідно, щоб увімкнення вольтметра не змінювало помітним чином силу струму в досліджуваній ділянці: адже $U = IR_x$, де I – сила струму, а R_x – опір ділянки. Тому вольтметр повинен мати опір набагато більше опору відповідної ділянки кола. У найбільш точних вольтметрах опір складає від декількох сотень до тисяч Ом.

Якщо вказані вище вимоги не виконані, то при вимірюваннях це повинно бути враховано, і в результатах вимірювань необхідно зробити відповідні поправки. На деяких приладах значення їх внутрішніх опорів вказані прямо на шкалах. У інших ці дані приведені в паспортах, що додаються до приладів.

Вольтметри і амперметри часто мають декілька меж вимірювань (багатомежні прилади). Це досягається паралельним приєднанням (усередині корпусу) додаткових опорів в амперметрі і послідовним у вольтметрі із струмопровідними котушками вимірювальних механізмів. Для переходу від однієї межі вимірювання до іншої служать або перемикачі, або спеціальні клеми. На тих і інших ставляться відповідні надписи.

Для отримання результату вимірювання фізичної величини в прийнятих одиницях (зазвичай в системі СІ) усі електровимірювальні прилади заздалегідь градууються в одиницях вимірюваної величини.

Існують прилади, які призначені для безпосереднього порівняння вимірюваної величини з величиною, значення якої відоме. Ці прилади електровимірювань називають *приладами порівняння*. Прик-

ладами приладів порівняння є мости постійного і змінного струму та потенціометри. Вони широко застосовуються для вимірювання таких величин, як опір, індуктивність, ЕРС й інші.

У приладах порівняння використовується те, що у разі відсутності струму в якій-небудь ділянці кола (мости) або рівності напруги на яких-небудь ділянках кола (потенціометри), існує певне співвідношення між значеннями вимірюваної величини і еталону. Для встановлення відсутності струму або рівності напруги застосовуються прилади, що отримали назву *нуль-індикаторів*. Коли покази цього приладу дорівнюють нулю, кажуть: "міст урівноважений" та "потенціометр скомпенсований".

Прилади, в яких процеси урівноваження або компенсації проводяться автоматично, називаються відповідно *автоматичними мостами* або *автоматичними потенціометрами*. Ці прилади дозволяють відображати зміну вимірюваних величин в часі на діаграмному папері. Вони застосовуються також для управління різними процесами.

Автоматичні потенціометри і мости відносяться до самописних вимірювальних приладів. Проте вони можуть проводити запис лише величин, що повільно змінюються. Параметри процесів, що відбуваються з великою швидкістю, можуть бути виміряні і записані лише за допомогою електронних осцилографів.

Детально принципи дії мостів, потенціометрів і електронних осцилографів будуть приведені нижче в описах окремих лабораторних робіт.

Прилади з електронним перетворенням. У даний час широко застосовуються цифрові вимірювальні прилади. У цих приладах вимірювана величина перетворюється в дискретні сигнали, що несуть інформацію про вимірювану величину, які, у свою чергу, перетворю-

ються в електричний код. Відповідно до цього коду вимірювана величина представляється на відліковому пристрої в цифровій формі.

Найважливішим елементом цифрового вимірювального приладу є аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Варіантів АЦП існує достатньо багато, їх принцип дії буде розглянуто у відповідних курсах. Основні блоки цифрового вимірювального приладу і їх взаємодія показані на рис. 6.

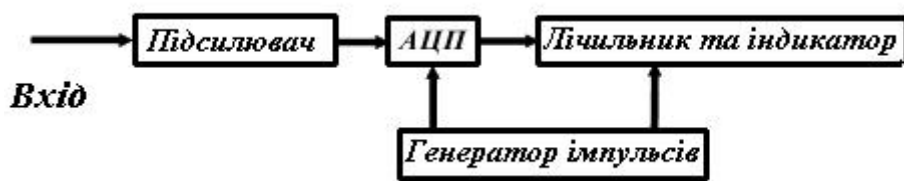


Рис. 6

Вхідний сигнал посилюється підсилювачем настільки, наскільки це необхідно для надійної роботи АЦП. Завдяки цьому досягається висока чутливість приладу. Крім вхідного підсилювача цифрові прилади мають і інші підсилювачі, перш за все, в самому АЦП, а також в інших ланках.

Генератор імпульсів необхідний для вироблення носія проміжного сигналу і для управління програмою роботи. Для цього необхідні також комутаційні і логічні пристрої. Створювані «цифрові одиниці» підраховуються лічильником, і їх число робиться видимим за допомогою індикатора.

3. Особливості розрахунку похибок вимірювань

Чутливість приладу це фізична величина, яка показує зміну лінійного або кутового зміщення покажчика при зміні вимірюваної величини на одиницю:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x},$$

де відповідно: S – чутливість, $\Delta\alpha$ – зміщення покажчика, Δx – зміна вимірюваної величини. Чутливість приладу в різних місцях шкали може бути неоднаковою.

Іноді на приладах вказується величина, обернена до чутливості, – ціна однієї поділки, так звана стала приладу:

$$z = \frac{1}{S} = \frac{\Delta x}{\Delta\alpha},$$

яка показує вимірювану фізичну величину, яка припадає на одну поділку приладу.

Найбільш чутливими електричними приладами є гальванометри. Стала найкращих дзеркальних гальванометрів становить 10^{-9} - 10^{-10} А/мм.

Однією з основних метрологічних характеристик засобів вимірювання є похибка. Основним мірилом якості приладу є зведена похибка, яка показує, яку долю абсолютна похибка виміру $\Delta\alpha$ становить від найбільшого її значення за шкалою приладу $\alpha_{\max}$, тобто:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{\max}}.$$

Класом точності приладу називають зведену похибку приладу, яку виражають у відсотках:

$$\varepsilon_{\text{зв}} = \varepsilon \times 100\% = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{\max}} \times 100\%.$$

Електровимірювальні прилади поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Точнішими є прилади класів 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Вони використовуються головним чином у точ-

них лабораторних вимірюваннях, їх називають *прецизійними*. Менш точними є прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4,0, які називають *технічними*. Клас точності вказується на шкалі приладу або безпосередньо, або номером. Наприклад, другий клас точності може бути позначений: II

або 0,1.

За класом точності приладу визначають відносну похибку вимірюваної фізичної величини і абсолютну похибку, а саме

$$E = \varepsilon_{\text{зб}} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{\text{max}}} \times 100\%, \Delta\alpha = \frac{\varepsilon_{\text{зб}} \alpha_{\text{max}}}{100\%}$$

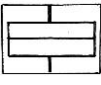
Наприклад, міліамперметр третього класу точності III, тобто $\varepsilon_{\text{зб}} = 0,2\%$ зі шкалою на 500 мА допускає при будь-яких показах на шкалі однакову абсолютну похибку $\Delta\alpha = \pm 0,002 \times 500 \text{ мА} = \pm 1 \text{ мА}$.

Добре, коли шкала приладу рівномірна; умови вимірювання в будь-якому місці такої шкали однакові. Якщо ж шкала нерівномірна, треба вибирати потрібні межі вимірювання, щоб одержати виміри в середині, або в останній третині шкали. Тоді похибка вимірювань буде найменшою.

Кращим є той прилад, дія і покази якого не залежать від зовнішніх впливів, випадкових електричних та магнітних полів, зміни температури тощо.

Для добору потрібних приладів і правильного їх вмикання в електричну схему треба насамперед ознайомитись з основними характеристиками приладу, вказаними на шкалі. В таблиці 1 наведено деякі умовні позначення, які наносять на шкалу вимірювальних приладів.

Таблиця 1

Помітка на шкалі приладу	Що вона означає
1	2
	Магнітоелектрична система
	Електромагнітна система
	Електродинамічна система
	Електродинамічна система з магнітним екраном
	Детекторна система з використанням магнітоелектричного механізму
	Для постійного струму
	Для змінного струму
	Для постійного і змінного струму
	Шкала приладу встановлюється вертикально
	Шкала приладу встановлюється горизонтально
	Шкала приладу встановлюється під таким кутом
	Клас точності 1,5
	Ізоляція приладу випробувана напругою 2кВ

4. Похибки непрямих вимірювань

Похибки непрямих вимірювань визначаються за похибками безпосередньо вимірюваних величин. Безпосередньо вимірювані величини вважатимемо аргументами, а непрямо вимірювані – функціями:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Розглянемо найпростіший випадок. Нехай $y = f(x)$, причому аб-

солютна похибка прямого вимірювання величини x дорівнює $\pm dx$ і зумовлює похибку $\pm dy$. Очевидно:

$$y \pm dy = f(x \pm dx) \quad (2)$$

Розкладаючи праву частину (2) в ряд Тейлора, маємо:

$$y \pm dy = f(x) \pm \frac{df(x)}{dx} dx \pm \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \frac{(dx)^2}{2!} \pm \dots$$

Нехтуючи членами розкладу, до яких dx входить у степені, вищому за перший, дістанемо:

$$y \pm dy = f(x) \pm \frac{df(x)}{dx} dx$$

$$\text{тоді} \quad (3)$$

$$\pm dy = \pm \frac{df(x)}{dx} dx$$

Абсолютна похибка функції одного аргументу дорівнює добутку, похідної функції на абсолютну похибку аргументу. Замінюючи знак диференціала d на знак похибки Δ , вираз (3) можна подати у вигляді формули для знаходження абсолютної похибки:

$$\pm \Delta y = \pm \frac{df(x)}{dx} \Delta x \quad (4)$$

Відносну похибку дістанемо, поділивши обидві частини рівності (4) на значення шуканої величини:

$$E_y = \pm \frac{\Delta y}{y} = \pm \frac{f'(x)}{f(x)} \Delta x \quad (5)$$

Як видно, у правій частині рівності (5) записано диференціал від натурального логарифма цієї функції:

$$E = \Delta(\ln f(x)) \quad (6)$$

Нехай вимірювана нами величина є функцією не одного, а кількох аргументів:

$$y = f(a, b, c) \quad (7)$$

Тоді максимальна абсолютна похибка функції кількох аргументів дорівнює сумі модулів добутку частинних похідних цієї функції на відповідні абсолютні похибки:

$$\pm \Delta y = \left(\frac{\partial y}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial y}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial y}{\partial c} \Delta c \right) \quad (8)$$

Максимальна відносна похибка функції кількох аргументів дорівнює диференціалу натурального логарифму цієї функції, причому береться сума абсолютних значень всіх членів цього виразу:

$$E = \Delta(\ln f(a, b, c)) \quad (9)$$

Приклад: нехай об'єм паралелепіпеда визначається за даними вимірювань його ребер:

$$(a \pm \Delta a), (b \pm \Delta b), (c \pm \Delta c):$$

$$V = abc$$

Щоб знайти максимальну абсолютну похибку обчислення об'єму, запишемо частинні похідні від V за a, b, c

$$\frac{\partial V}{\partial a} = bc, \frac{\partial V}{\partial b} = ac, \frac{\partial V}{\partial c} = ab.$$

Тоді дістанемо вираз для абсолютної похибки:

$$\pm \Delta V = (bc\Delta a + ac\Delta b + ab\Delta c)$$

Для обчислення відносної похибки прологарифмуємо V :

$$\ln V = \ln a + \ln b + \ln c$$

Почленно диференціюючи й переходячи від диференціалів до похибок, дістанемо:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}.$$

5. Вказівки щодо визначення абсолютних та відносних похибок вимірювання фізичних величин

- Абсолютну інструментальну похибку ΔX_{in} визначають або за класом точності приладу, або як половину ціни найменшої поділки.
- Методичну абсолютну похибку ΔX_m визначають як середнє арифметичне похибок кожного з прямих вимірювань.
- Якщо пряме вимірювання здійснюється лише один раз, або при декількох вимірюваннях одержуються однакові значення, то методична похибка приймається наближено рівною інструментальній: $\Delta X_m \approx \Delta X_{in}$.
- Абсолютна похибка прямих вимірювань дорівнює сумі інструментальної і методичної похибок: $\Delta X = \Delta X_m + \Delta X_{in}$.
- На практиці в багатьох випадках легше знайти спочатку відносну похибку вимірювань. Тоді абсолютну похибку вимірювань знаходять як: $\Delta \bar{X} = E \cdot \bar{X}$
- Абсолютна похибка при оформленні наслідків досліджень у графічному вигляді розраховується за розміщенням точок відносно графічної залежності.
- Якщо визначаються певні табличні константи, то доцільно розрахувати абсолютну похибку, яку дає даний метод, як різницю табличного значення і її середнього значення, одержаного в досліді.

ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ ПРОВІДНИКІВ МЕТОДОМ МІСТКОВОЇ СХЕМИ

Мета роботи: 1) ознайомитися з методом містка Уїтстона; 2) виміряти за допомогою містка Уїтстона опір двох котушок; 3) перевірити закон послідовного та паралельного сполучення цих опорів; 4) експериментально одержати криву залежності $R(t)$ для рекомендованого металу; 5) визначити температурні коефіцієнти опору досліджуваного металу.

Прилади і матеріали: 1) джерело ЕРС до 4 В; 2) магазин опорів типу МСР-58; 3) нуль-гальванометр; 4) дві котушки з невідомими опорами; 5) дрітаний опір в термостаті; 6) термометр на 100°C ; 7) електроплитка; 8) реохорд; 9) два ключі (один “натискний”); 10) з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості

Опір провідника $R = \frac{U}{I}$ є фізична величина, яка чисельно дорівнює напрузі, яку треба прикласти, щоб провідником протікав струм рівний одиниці. Опір залежить:

1) від хімічного складу матеріалу, з якого виготовлено провідник, тобто від питомого опору ρ ;

2) від лінійних розмірів провідника, тобто від довжини l та площі поперечного перерізу S :

$$R = \rho \frac{l}{S};$$

3) від температури $R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$, де відповідно R_t , R_0 – опори при температурі t та $t = 0^{\circ}\text{C}$, α, β, γ – температурні коефіцієнти.

Залежність $R(t)$ часто використовується для виготовлення приладів: термометрів опору, болометрів, термісторів.

Для спрощення прийнято виражати опір лінійною функцією

від температури, тобто обраховувати формулою:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

яку можна застосовувати у невеликих інтервалах температур.

Температурний коефіцієнт α змінюється в певній мірі із зміною температури. Особливо помітно змінюється α при високих температурах. Середнє значення α в невеликому інтервалі температур від t_1 до t_2 визначається з формули (1):

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1} \quad (2)$$

Точне ж значення α буде знайдено з (2), коли $R_1 \approx R_2$, тобто $R_2 - R_1 = \Delta R \rightarrow 0$. Тоді

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (3)$$

З формули (3) бачимо, що температурний коефіцієнт α є фізична величина, яка показує відносну зміну опору провідника при зміні температури на 1 К.

З формули (3) також видно, що α при даній температурі t можна визначити з графіка R_t , враховуючи,

що похідна $\frac{dR}{dt} = \frac{dR}{dT}$ виражає значення кутового коефіцієнта дотичної, проведеної до кривої в розглядуваній точці.

Для чистих металів в інтервалі температур 0 – 100°C коефіцієнт α змінюється дуже мало, тому його можна вважа-

ти сталим ($\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$) і температурну залежність опору R_t можна взяти наближено лінійною. Тоді температурний коефіцієнт визнача-

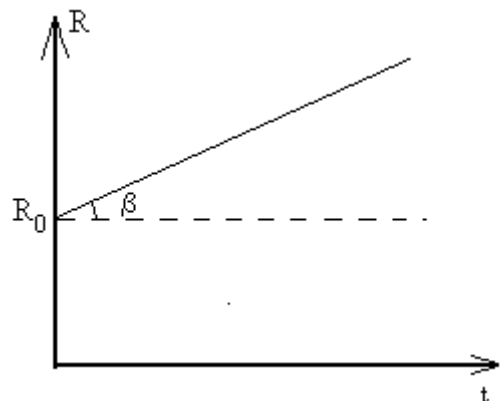


Рис. 1

ється тангенсом кута нахилу прямої, що зображає залежність, до вісі t (рис.1): $\alpha = \operatorname{tg} \beta$

Найчастіше опір провідника визначають за результатами вимірювання струму і напруги (метод амперметра і вольтметра), або методом порівняння опору з еталоном (метод містка).

Перший метод ґрунтується на використанні закону Ома для ділянки кола:

$$R = \frac{U}{I} \quad (4)$$

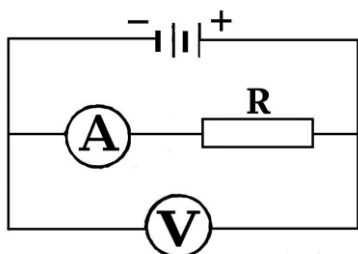


Рис. 2,а

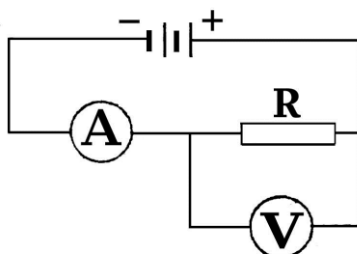


Рис.2,б

Для цього вольтметр і амперметр можуть бути увімкнені в коло за однією із схем, зображених на рис. 2.

В схемі 2 (а) вольтметр вимірює напругу на послідовно з'єднаних резисторі і амперметрі, тому систематична відносна похибка визначення опору без врахування опору амперметра дорівнює

$$\delta = \frac{R_a}{\frac{U}{I} - R_a}, \text{ де } R_a - \text{опір амперметра.}$$

У схемі 2,б амперметром вимірюється струм, який проходить через резистор і вольтметр, тому відносна похибка визначення опору в цьому випадку:

$$\delta = \frac{U}{R_v \cdot I}, \quad (6)$$

де R_v – опір вольтметра.

У місткових схемах вимірювати струм і напругу непотрібно, тому вони дають більш точні результати. В даній роботі використовується один з найпростіших вимірювальних містків – місток Уїтстона, в якому для вимірювання опорів використовується метод порівняння.

Схема містка Уїтстона зображена на рис.3: контур ABCDA складається з чотирьох плечей (AB, BC, CD, DA) і двох діагоналей (ВД і AC). Плечима містка є три відомі опори R_e, R_1, R_2 та четвертий шуканий опір R_x . В діагональ AC для живлення містка ключем K_2 увімкнене джерело постійної напруги ε , у другу діагональ ВД через “натискний” ключ K_1 , вмикається чутливий нуль-гальванометр G . Нуль-гальванометр служить індикатором урівноваження містка і в схемі вмикається лише короткочасно. Місток, таким чином, є складним електричним колом, і може бути ро-

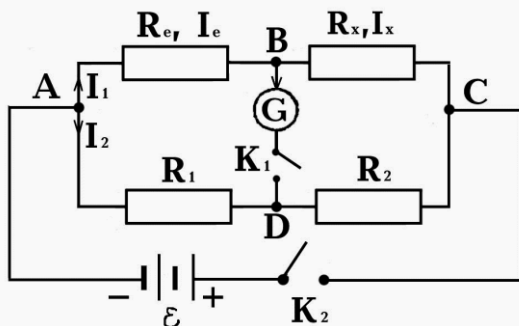


Рис. 3.

зрахований за законами (або правилами) Кірхгофа.

Перший закон: алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює

$$\text{нулю, тобто} \quad \sum_{j=1}^n I_j = 0. \quad (7)$$

Другий закон: алгебраїчна

сума добутків сили струму на опір $(IR)_j$ у замкнутому контурі дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС у цьому контурі:
$$\sum_{j=1}^n (IR)_j = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k \quad (8)$$

Розрахунок значно спрощується, якщо добитись зрівноваження містка, тобто добором опорів R_1, R_2 та R_e досягти такого перерозподілу струмів у плечах містка, щоб потенціали точок В і Д вирівнялись. Про рівність цих потенціалів свідчить відсутність струму в діагоналі ВД, а отже і через гальванометр G .

За законами Кірхгофа для зрівноваженого містка маємо – для вузла В: $I_e = I_x$; для вузла Д: $I_1 = I_2$; для контуру АВДА: $I_e R_e = I_1 R_1$; для контуру ВСДВ: $I_x R_x = I_2 R_2$. Розділивши ліві й праві частини останніх двох рівнянь: $\frac{I_e R_e}{I_x R_x} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2}$ знаходимо, що шуканий опір дорівнює

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_e = n R_e. \quad (9)$$

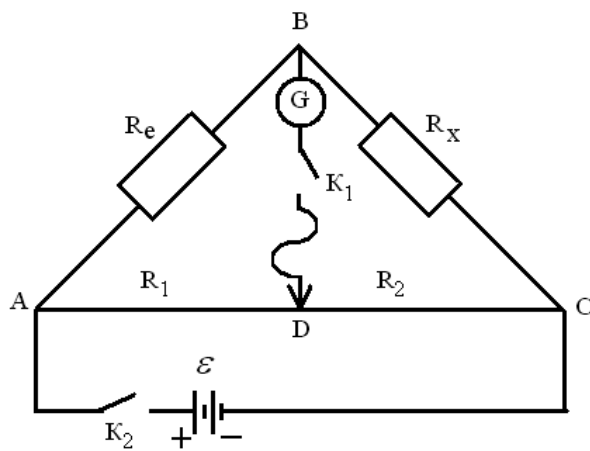


Рис. 4.

Окремим випадком містка Уїтстона є лінійний місток (рис. 4), який використовується в даній роботі. У даній схемі опорами R_1 і R_2 служать плечі реохорда АС з ковзним контактом Д. Враховуючи питомий опір дротини реохорда, довжину його плечей і поперечний переріз дротини, можна записати, що

$$R_1 = \rho \frac{L_1}{S} \text{ і } R_2 = \rho \frac{L_2}{S}.$$

Оскільки для обох плечей ρ і S однакові, то з формули (9) знаходимо, що шуканий опір дорівнює:

$$R_x = \frac{L_2}{L_1} R_e. \quad (10)$$

Еталонний опір R_e підбирається за допомогою магазину опорів з межами від 0,1 до 9999 Ом. Ключ K_1 вмикається натисканням кнопки лише короткочасно.

Хід роботи

Завдання № 1. Виміряти невідомі опори котушок № 1 і № 2.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 3 лінійного містка Уїтстона, в якому R_x - опір котушки № 1.
2. Встановити пересувний контакт Д на середину реохорда АС.
3. Увімкнути спочатку на магазині опорів (R_e) найменший опір $R_e = 1$ Ом.
4. Замкнути ключем K_2 коло джерела ε .
5. На мить увімкнути гальванометр G натискним ключем K_1 . Замітити, в який бік відхиляється стрілка нуль-гальванометра G.
6. Поступово збільшуючи еталонний опір R_e добитись, щоб при замиканні ключа K_1 , нуль-гальванометр не давав відхилення. Це означатиме, що місток Уїтстона зрівноважений. Виміряти L_1, L_2 .
7. Якщо не можна добитись відсутності струму через гальванометр за допомогою магазину опорів (R_e), то цього досягають переміщуючи ковзний контакт Д реохорда.
8. Результати вимірювань R_e, L_1, L_2 записати у звітну таблицю (скласти самостійно).
9. Збільшити R_e на 1-2 Ом і при допомозі ковзного контакту Д знову зрівноважити місток.
10. Зменшити R_e на 1-2 Ом від першого виміру і знову зрівноважити ковзним контактом місток.
11. За формулою (10) обчислити R_x для кожного з трьох вимірювань і розрахувати середнє значення.
12. Обчислити відносну (E) та абсолютну (ΔR_x) похибки:

$$E = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2} + \frac{\Delta R_e}{R_e}; \Delta R_x = E \cdot R_x$$

13. Аналогічні вимірювання проробити для другої котушки.

14. Зробити висновки.

Завдання № 2. Вивчення паралельного і послідовного з'єднання опорів

1. З'єднайте котушки № 1 і №2 послідовно і ввімкніть її у плече містка Уїтстона замість R_x .

2. Виконайте вимірювання у відповідності із завданням № 1 і знайдіть загальний опір двох послідовно з'єднаних котушок № 1 і № 2

3. З'єднайте котушки № 1 і №2 паралельно і знайдіть за допомогою містка їх загальний опір ($R_{\text{парал}}$).

4. Результати вимірювань записати у таблицю (скласти самостійно).

5. Обчислити теоретично загальний опір котушок № 1 і № 2 при послідовному і паралельному їх з'єднанні, використовуючи дані із завдання № 1.

6. Порівняйте теоретичні результати з експериментальними, одержаними у завданні № 2.

7. Зробіть висновки.

Завдання № 3. Дослідження залежності опору металу від температури

1. У місткову схему, що використовувалась в завданні №1, замість невідомого опору ввімкнути провідник, поміщений в термостат.

2. Виміряти опір провідника при кімнатній температурі R_1 так, як це робилось для вимірювання опору котушок.

3. Встановити термостат на електроплитку і подати на неї відповідну напругу.

4. Виміряти опір досліджуваного провідника при різних температурах через кожні 10°C . Вимірювання проводити до 80°C .
5. Результати вимірювань занести до таблиці (скласти самостійно).
6. Побудувати графік залежності $R = f(t)$.
7. Використовуючи дані вимірювань, знайти температурний коефіцієнт опору провідника за формулою (2).
8. Використовуючи графік залежності $R = f(t)$, знайти температурний коефіцієнт опору α .
9. Порівняти одержані результати для відповідних інтервалів температур.
10. Використовуючи таблиці термічних коефіцієнтів опору металів, визначити, з якого металу зроблено досліджуваний провідник (опір).
11. Знайдіть абсолютну та відносну похибку даного методу на даній установці. За дійсне значення треба взяти табличне значення температурного коефіцієнту опору, а за наближене – середнє з виміряних.
12. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Що називають опором провідника? Що є одиницею вимірювання опору провідника в СІ?
2. Що називають провідністю провідника, в яких одиницях вона вимірюється?
3. Чим обумовлено існування опору в металах?
4. Запишіть закон Ома для однорідної ділянки кола, для неоднорідної ділянки кола.
5. Що називають вольт-амперною характеристикою провідника?
6. Запишіть формулу для розрахунку опору провідника циліндричної форми.

7. Що називають питомим опором провідника? Яка одиниця вимірювання питомого опору в СІ? Від чого залежить питомий опір провідника?
8. Що називають питомою провідністю провідника? Яка одиниця вимірювання питомої провідності в СІ?
9. Як змінюється опір металу із збільшенням його температури? Що називають температурним коефіцієнтом опору?
10. Запишіть формули для розрахунку опору послідовного та паралельного з'єднання двох провідників.
11. Сформулюйте правила Кірхгофа.
12. Застосуйте правила Кірхгофа для розрахунку невідомого опору провідника методом містка Уїтстона.
13. В якому випадку місток Уїтстона є зрівноваженим?
14. У якому випадку відношення опорів плечей реохорда можна замінити відношенням відповідних довжин відрізків дротини реохорда?
15. Чому точність вимірювання невідомого опору буде найбільшою у випадку, коли у зрівноваженому містку Уїтстона ковзний контакт буде розташованим на середині реохорда?

ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ І ПЕРЕВІДНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ СТІЛОЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Мета роботи: Ознайомитись з одним з методів вимірювання внутрішнього опору гальванометра та обчислення перевідних коефіцієнтів гальванометра до струму і до напруги.

Прилади і матеріали: 1) стрілочний гальванометр магнітоелектричної системи, 2) два магазини опорів на 9999 Ом, 3) джерело постійного струму, 4) два вимикачі, 5) з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості

Гальванометри – це високочутливі індикатори або вимірювальні прилади, стрілки яких відхиляються на повну шкалу при проходженні через них струмів величиною порядку $10^{-4} \sim 10^{-8}$ А. Тому при вимірюванні їх опорів треба враховувати їх велику чутливість; струм у кілька міліампер може зіпсувати гальванометр.

Усі гальванометри великої чутливості магнітоелектричної системи побудовані на принципі взаємодії між магнітним полем струму і магнітним полем постійного магніту.

У гальванометрах з чутливістю 10^{-8} А/мм і більшою доводиться відмовлятися від використання стрілки для відрахунків величини струму, в зв'язку з тим, що стрілка має велику інерцію, і при її русі виникає значне тертя. Тому в дуже чутливих гальванометрах рухому частину (рамку) підвішують на тонкій дротинці з прикріпленням до неї дзеркальцем для відліку кута повороту рухомої системи.

Якщо гальванометр служить тільки для визначення наявності струму (наприклад у містку Уітстона), то його правильно назвати гальваноскопом. Якщо ж він має шкалу і може служити для вимірювання струму, його називають гальванометром.

Для вимірювання величини струму в амперах необхідно знати

ціну однієї поділки шкали гальванометра, виражену в амперах, тобто його *перевідний коефіцієнт* K_a . Інколи величину K_a неправильно називають “чутливістю” гальванометра. *Чутливість гальванометра* визначається числом поділок шкали, на які відхилиться стрілка гальванометра при проходженні струму в 1 А.

Знаючи внутрішній опір гальванометра R_g і перевідний коефіцієнт K_a , можна визначити ціну однієї поділки його шкали (перевідний коефіцієнт K_B) у вольтах, виходячи з закону Ома:

$$K_B = K_a R_g \quad (1)$$

Внутрішній опір гальванометра необхідно знати також для обчислення шунтів або додаткових опорів.

Для визначення внутрішнього опору гальванометра існує декілька методів. Одним з методів є метод шунта, який дає хороші результати, коли відхилення стрілки гальванометра пропорційне величині струму. В цьому випадку перевідний коефіцієнт K_a – величина постійна. Складемо електричне коло за схемою рис. 1.

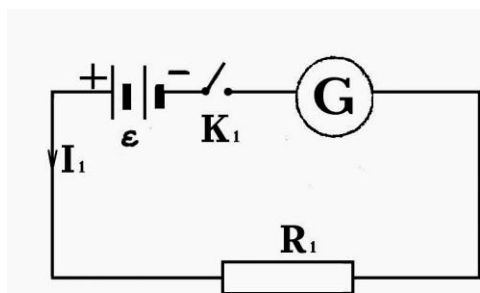


Рис. 1

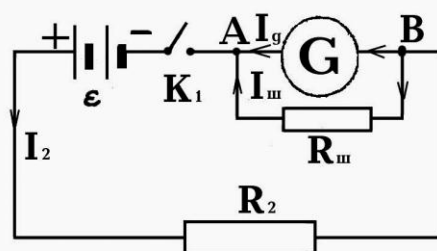


Рис. 2

При замиканні вимикача K_1 колом піде струм I_1 . Якщо знехтувати опорами підвідних провідників і внутрішнім опором джерела, то

$$\varepsilon = I_1 (R_1 + R_g), \quad (2)$$

де ε – ЕРС джерела, R_g – внутрішній опір гальванометра, R_1 – опір магазина. Вводячи перевідний коефіцієнт K_a одержимо:

$$\varepsilon = nK_a(R_1 + R_g), \quad (3)$$

де n_1 – кількість поділок, на які відхилилася стрілка гальванометра.

У цьому рівнянні два невідомих (K_a і R_g), тому необхідно скласти ще одне рівняння з цими невідомими. Таке рівняння можна одержати, якщо змінити режим кола шляхом увімкнення паралельно гальванометру шунта $R_{ш}$, який має відомий опір (рис.2). Нехай у цьому випадку величина струму в колі магазину R_2 буде I_2 , а відхилення стрілки гальванометра – n_2 поділок шкали. Тоді

$$\varepsilon = I_2(R_2 + R_{AB}) \text{ або } \varepsilon = I_2\left(R_2 + \frac{R_g R_{III}}{R_g + R_{III}}\right) \quad (4)$$

Для розгалуженого кола маємо

$$I_2 = I_{III} + I_g, \quad (5)$$

а також

$$\frac{I_{III}}{I_g} = \frac{R_g}{R_{III}} \Rightarrow I_{III} = I_g \frac{R_g}{R_{III}} \quad (6)$$

$$I_2 = I_g + I_g \frac{R_g}{R_{III}} = I_g \left(1 + \frac{R_g}{R_{III}}\right) = K_a n_2 \left(1 + \frac{R_g}{R_{III}}\right) \quad (7)$$

Отже:

$$\varepsilon = K_a n_2 \left(1 + \frac{R_g}{R_{III}}\right) \left(R_2 + \frac{R_g R_{III}}{R_g + R_{III}}\right) \quad (8)$$

Розв'язуючи (3) і (8) відносно K_a і R_g знайдемо:

$$K_a = \frac{\varepsilon}{n_1(R_1 + R_g)} \quad (9)$$

$$\text{і } R_g = \frac{R_{III}(n_1 R_1 - n_2 R_2)}{n_2(R_2 + R_{III}) - n_1 R_{III}}. \quad (10)$$

Якщо є можливість підібрати опори R_1 і R_2 таким чином, що

$n_1 = n_2$, то формула (10) спроститься:

$$R_g = \frac{R_{III}(R_1 - R_2)}{R_2} \quad (11)$$

Хід роботи

1. Ознайомитись з приладами і підготувати таблицю для запису результатів спостережень. Скласти електричне коло за схемою рис. 3.

2. Встановити за допомогою коректора стрілку гальванометра на "0" і виставити на магазині R найбільший опір.

3. Замкнувши вимикач K_1 , підібрати такий опір магазину R_1 , при якому стрілка гальванометра відхилиться на $2/3$ шкали. Зробити відлік відхилення стрілки n_1 і записати опір магазину R_1 . Дослід проробити не менше трьох разів.

4. Встановити на магазині R_{III} опір 10- 20 Ом і замкнути вимикач K_2 .

5. Підібрати на магазині R такий опір R_2 , щоб відхилення стрілки гальванометра також було $\sim 2/3$ його шкали. Виконати відлік відхилення стрілки n_2 і записати значення R_2 .

6. Не змінюючи опір шунта R_{III} дослід повторити не менше трьох разів, результати занести до таблиці.

7. Електрорушійну силу ε акумулятора визначити за допомогою вольтметра з великим внутрішнім опором. Всі результати вимірювань занести до таблиці.

8. Для обчислення значень величин та їх похибок скласти таблицю самостійно.

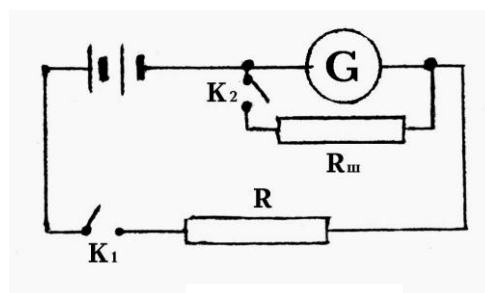


Рис. 3

9. Знайти середнє значення внутрішнього опору гальванометра R_g ; середні значення всіх вихідних величин, знайти похибки і записати кінцевий результат.

10. Використовуючи вихідні дані, обчислити середні значення перевідних коефіцієнтів K_a і K_g .

Похибки K_a і R_g знаходять за формулами:

$$\text{а) } K_a = \frac{\varepsilon}{n_1(R_1 + R_g)}; E = \frac{\Delta K_a}{K_a} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta(R_1 + R_g)}{R_1 + R_g}; \Delta K_a = EK_a;$$

$$\text{б) } R_g = \frac{R_{III}(R_1 - R_2)}{R_2};$$

$$E = \frac{\Delta R_g}{R_g} = \frac{\Delta R_{III}}{R_{III}} + \frac{\Delta(R_1 - R_2)}{R_1 - R_2} + \frac{\Delta R_2}{R_2}; \Delta R_g = ER_g.$$

Контрольні запитання

1. Який вимірювальний прилад називають гальванометром? Які види гальванометрів Вам відомі?
2. Яка будова досліджуваного гальванометра?
3. Що називають чутливістю гальванометра?
4. Що розуміють під внутрішнім опором гальванометра?
5. Що розуміють під перевідним коефіцієнтом гальванометра, вимірюваним в Амперах?
6. Що розуміють під перевідним коефіцієнтом гальванометра, вимірюваним у Вольтах?
7. Запишіть закон Ома для однорідної ділянки кола; для неоднорідної ділянки кола.
8. Запишіть закон Ома для повного кола.
9. Запишіть формули для розрахунку опору послідовного та паралельного з'єднання двох провідників.
10. Сформулюйте правила Кірхгофа.
11. Якою є будова і призначення шунта?
12. Якою є будова і призначення додаткового опору?
13. Чому перед замиканням кола, що містить гальванометр і додатковий опір, реалізований як магазин опорів, встановлюють на останньому максимальний опір?
14. У чому полягає суть методу шунта для визначення внутрішнього опору та перевідних коефіцієнтів гальванометра?
15. Виведіть формули для обрахунку похибок.

Лабораторна робота №3
**ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЕКВІВАЛЕНТА
РЕЧОВИНИ ТА ОБЧИСЛЕННЯ ВЕЛИЧИНИ
ЕЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДУ**

Мета роботи: Ознайомитись з явищами електролітичної дисоціації, електролізу; використовуючи явище електролізу; визначити електрохімічний еквівалент міді; обчислити величину елементарного заряду.

Прилади і матеріали: 1) мідний вольтметр, 2) лабораторний випрямляч В-24, 3) реостат (33 Ом, 3 А), 4) амперметр, 5) вимикач, 6) з'єднувальні провідники, 7) шматок наждачного паперу, 8) технічні важільні терези з набором важків, 9) секундомір.

Короткі теоретичні відомості

Речовини, молекули яких у розчині розпадаються на іони, називаються електролітами. Такий процес розпаду молекул називається електролітичною дисоціацією. До електролітів відносять водні розчини солей, кислот, лугів, а також розплавлені солі. Електричний струм в електролітах обумовлений рухом позитивних і негативних іонів під дією зовнішнього електричного поля. Тому провідність електролітів, на відміну від електронної провідності в металах, називають іонною, а електроліти провідниками другого роду. Проходження постійного струму через електроліти супроводжується виділенням складових частин цих речовин на електродах. Це явище називається *електролізом*.

Якщо ввести в електроліт два електроди, з'єднані з полюсами джерела постійної напруги, то під дією електричних сил іони в розчині почнуть рухатись до електродів: до аноду будуть рухатись від'ємні іони (аніони), до катоду – додатні іони (катіони).

Досягнувши електродів, іони розряджаються: аніони віддають аноду електрони, катіони сприймають електрони від катоду. Наприклад, молекули мідного купоросу $CuSO_4$ дисоціюють на позитивні іо-

ни Cu^{++} і негативні іони SO_4^{--} : $\text{CuSO}_4 \leftrightarrow \text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$.

Крім цього розчин має також водневі H^+ і гідроксильні OH^- іони води. Йони міді Cu^{++} розряджаються легше ніж іони H^+ , тому при проходженні струму через електроліт на катоді буде відбуватися виділення міді: $\text{Cu}^{++} + 2e \rightarrow \text{Cu}$.

Іони SO_4^{--} важче розряджаються, ніж іони OH^- , тому на аноді розряджаються іони гідроксилу і виділяється кисень: $2\text{OH}^- - 2e \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. Іони SO_4^{--} з іонами H^+ утворюють біля аноду розчин сірчаної кислоти $\text{SO}_4^{--} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$.

Якщо анод виготовлений з міді, то розряд іонів відбувається тільки біля катоду, а біля аноду, навпаки, іони металу переходять в розчин внаслідок реакції міді з сірчаною кислотою. В цьому випадку замість виділення кисню буде відбуватись перехід з аноду в розчин іонів Cu^{++} . Отже, електроліз CuSO_4 при мідному аноді зводиться до переносу міді з аноду на катод. В той же час кількість мідного купоросу в розчині залишається незмінною. Закони електролізу відкрив 1833 року М. Фарадей.

1 закон Фарадея: Маса речовини, яка виділилась на електроді, пропорційна величині заряду q , що пройшов через електроліт, тобто

$$M = kq = kIt, \quad (1)$$

де I – величина струму, що проходить через електроліт, t – час проходження струму, k – електрохімічний еквівалент речовини.

Електрохімічний еквівалент показує, яка кількість речовини виділяється на електроді при проходженні через електроліт одиниці кількості електрики.

2 закон Фарадея: Електрохімічні еквіваленти речовин пропор-

ційні їх хімічним еквівалентам

$$k = \frac{CA}{z}, \quad (2)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, A – атомна маса (для міді $A=63,54 \times 10^{-3}$ кг/моль), z – валентність речовини (для міді $z=2$). Величина A/z називається *хімічним еквівалентом речовини*. Отже,

$$M = C \frac{A}{z} q = C \frac{A}{z} It \quad (3)$$

При виділенні одного кілограм-еквівалента речовини ($M = \frac{A}{z}$) кількість електрики, яка проходить через електроліт дорівнює

$$q = It = \frac{1}{C} = F. \quad (4)$$

Величина $F = 1/C$ називається *числом Фарадея*. Це число показує, який заряд переноситься одним кілограм-еквівалентом речовини. Тому

$$M = \frac{1}{F} \frac{A}{z} It. \quad (5)$$

В одному кіломолі будь-якої речовини міститься однакове число атомів: $N_a = 6,023 \times 10^{26}$ кмоль⁻¹ (число Авогадро). Тоді маса одного йона (масами відірваних від атома електронів нехтуємо) дорівнює

$$m = \frac{A}{N_a}. \quad (6)$$

Якщо заряд одного іона рівний Ze , де e – заряд електрона, Z – валентність, то заряд, який переносять n іонів буде:

$$q = nZe, \quad (7)$$

а маса речовини, яка виділиться на електроді, буде рівна

$$M = nm. \quad (8)$$

$$\text{Отже,} \quad M = \frac{m}{Ze} q = \frac{A}{NZe} q . \quad (9)$$

Порівнюючи вирази (5) і (9) бачимо, що

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{z} = \frac{A}{NZe} . \quad (10)$$

$$\text{Звідки} \quad F = \frac{A}{kZ} \quad (11)$$

Заряд одновалентного іона чисельно дорівнює заряду електрона. Тому заряд електрона можна знайти за формулою:

$$e = \frac{F}{N_a} = \frac{A}{ZNk} \quad (12)$$

Хід роботи

1. Скласти схему згідно з рис.1. Встановити силу струму $0,5 \div 0,6$ А.

2. Вийняти катодну пластинку, ретельно обчистити її з обох боків.

3. Визначити масу катодної пластинки m_1 .

4. Встановити електрод на місце в електролітичну ванну. Одночасно з вмиканням кола, пустити секундомір. Пропускати струм постійної величини протягом 20-30 хв.

5. Вимкнути одночасно коло і секундомір. Висушити і зважити катод. Знайти масу міді, що виділилась як різницю мас катода після проходження струму (m_2) і до проходження струму (m_1).

6. Результати для обчислення електрохімічного еквівалента міді занести в таблицю:

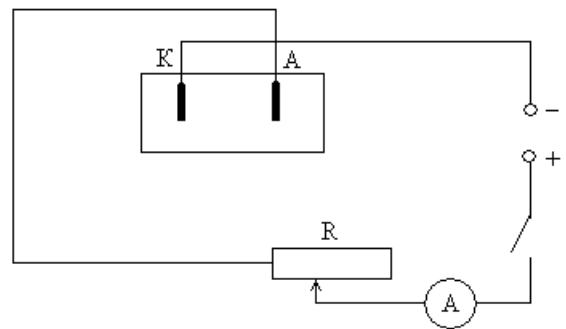


Рис.1.

№ п/п	m_1 , кг	m_2 , кг	Δm , кг	$M=m_2 - m_1$, кг	ΔM , кг	I , А	ΔI , А	t , °С	Δt , °С	k , кг/Кл	Δk , кг/Кл	E_k , %

Таблиця для обчислення числа Фарадея і елементарного заряду:

№ п/п	A , кг/моль	Z	N_a 1/моль	k , кг/Кл	Δk , кг/Кл	F , Кл/ моль	ΔF , Кл/ моль	e , Кл	Δe , Кл	E_F , %	E_e , %

7. Обчислити абсолютну і відносну похибку шуканих величин.

Контрольні запитання

1. Які речовини називають електролітами? Наведіть приклади.
2. Що обумовлює існування електричного струму в електролітах?
3. Який тип провідності є характерним для електролітів?
4. Надайте класифікацію провідників за типами провідності.
5. Яке фізичне явище називають електролізом?
6. Що називають катодом, анодом, катіоном, аніоном?
7. Сформулюйте і поясніть закони Фарадея для електролізу.
8. Дайте означення електрохімічного еквівалента речовини, в яких одиницях він вимірюється в СІ? хімічного еквівалента речовини, в яких одиницях він вимірюється в СІ?
9. Що таке валентність речовини?
10. Що називають числом Фарадея, в яких одиницях воно вимірюється в СІ?
11. Що називають числом Авогадро, в яких одиницях воно вимірюється в СІ?
12. Чому дорівнює табличне значення величини елементарного заряду вимірюваного в СІ?
13. Який зв'язок між числом Фарадея, хімічним еквівалентом і електрохімічним еквівалентом речовини?
14. У чому полягає суть розглядуваного методу з вимірювання електрохімічного еквіваленту речовини та величини елементарного заряду?

Лабораторна робота № 4
**ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНИХ СИЛ МЕТОДОМ
КОМПЕНСАЦІЇ.**

Мета роботи: ознайомитись з одним із поширених методів вимірювання ЕРС, провести вимірювання ЕРС декількох елементів методом компенсації.

Прилади і матеріали: 1) стрілочний “нульовий” гальванометр, 2) реохорд, 3) джерело струму з ЕРС 4,5В, 4) нормальний елемент, 5) два ключі (один з них натискний), 6) досліджувані елементи, 7) з'єднувальні ізольовані провідники.

Короткі теоретичні відомості

Якщо в електричному полі переміщувати електричний заряд, то сили поля виконують роботу. Величина, що чисельно дорівнює роботі сил електростатичного поля при переміщенні одиничного додатного електричного заряду (питома робота) з однієї точки поля в іншу, називається *різницею потенціалів* між цими точками $\varphi_1 - \varphi_2$ і дорівнює

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dL, \quad (1)$$

де E – напруженість електростатичного поля.

Під дією електростатичних сил позитивний заряд переміщується від більш високого до менш низького потенціалу, при цьому його потенціальна енергія зменшується. Робота електростатичних сил поля при переміщенні заряду замкненим контуром дорівнює нулю.

Електричні заряди переміщуються також під дією сил неелектростатичного походження, які називаються сторонніми силами. Такі сили діють, наприклад, в акумуляторі, гальванічному елементі, динамо-машині. Під дією сторонніх сил позитивний заряд переміщується від менш низького до більш високого потенціалу, а потенціальна енергія збільшується. Величина, чисельно рівна питомій роботі сторон-

ніх сил замкненим контуром L , називається *електрорушійною силою* (ЕРС). Вона дорівнює:

$$\mathcal{E} = \int E dL, \quad (2)$$

де E – напруженість поля сторонніх сил. Робота з переміщення заряду замкненим контуром виконується лише сторонніми силами, а на окремих ділянках кола як сторонніми, так і електростатичними силами. Величина, чисельно рівна сумі питомих робіт електростатичних і сторонніх сил, називається *електричною напругою*. Отже,

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (3)$$

За законом Ома $U = IR$, де I – сила струму, R – електричний опір ділянки кола, тому в загальному випадку маємо

$$IR = U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}. \quad (4)$$

Останнє співвідношення є узагальненим законом Ома. Звідки

$$\mathcal{E} = IR + \varphi_2 - \varphi_1. \quad (5)$$

Різниця потенціалів $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ може бути виміряна вольтметром, тому ЕРС елемента завжди відрізняється від напруги, виміряної вольтметром на величину IR .

Отже, для вимірювання ЕРС вольтметром необхідно, щоб в момент вимірювання струм в елементі дорівнював нулеві $IR = 0$. Це можливо здійснити використовуючи вольтметр з дуже великим опором, якщо його приєднати до клем джерела струму при розімкненому зовнішньому колі. Але і в цьому випадку в колі буде існувати струм.

Для точніших вимірювань застосовують компенсаційний метод, який зводиться до порівняння ЕРС даного джерела і еталонного джерела. Цей метод полягає в тому, що вимірювана ЕРС урівноважується (компенсується) відомою напругою, при цьому струм через до-

сліджуване джерело рівний нулю. Принцип дії компенсаційної схеми можна пояснити, користуючись рис. 1.

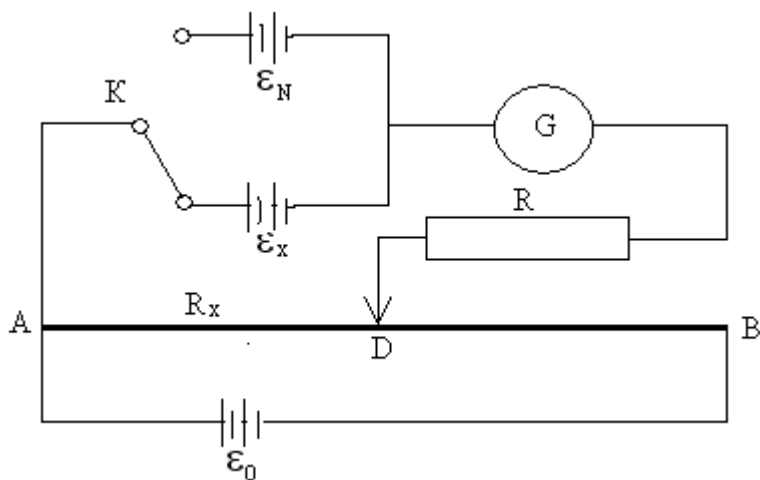


Рис. 1

Допоміжна батарея ε_0 з ЕРС, яка перевищує ЕРС досліджуваного елемента, підтримує постійний струм в колі реохорда АВ. Досліджуване джерело ЕРС ε_x одним полюсом приєднане до точки А, а другим через гальванометр G і резистор R до рухомого контакту реохорда D. Компенсація ЕРС можлива тільки в тому випадку, коли допоміжна батарея і досліджуваний елемент увімкнені однойменними полюсами назустріч один одному. Напруга на реохорді більша, ніж ε_x тому завжди можливо підібрати ділянку реохорда AD довжиною L_x з опором R_x , щоб напруга на ньому дорівнювала ε_x . При цьому струм через гальванометр буде дорівнювати нулю. У зрівноваженому таким чином колі згідно закону Кірхгофа для контуру AD ε_x А можна записати

$$\varepsilon_x = IR_x \quad (6)$$

Для того, щоб виключити з рівняння (6) струм, замість невідомого елемента вмикають в коло нормальний елемент Вестона з відомою ЕРС $\varepsilon_N = 1,01830$ В. При цьому компенсація відбувається при новому положенні рухомого контакту D (при довжині $AD = L_N$ і опорі ділянки R_N). Умова компенсації виразиться рівнянням

$$\varepsilon_N = IR_N. \quad (7)$$

З рівнянь (6) і (7), враховуючи, що ($R_x = \rho \frac{L_x}{S}$, а $R_N = \rho \frac{L_N}{S}$),

маємо:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_N \frac{R_x}{R_N} = \varepsilon_N \frac{L_x}{L_N}. \quad (8)$$

Таким чином, вимірювання ЕРС зводиться до вимірювання довжин ділянок реохорда L_x і L_N . В цьому методі гальванометр використовується не для вимірювання струму, а для встановлення його відсутності. На цьому методі засновано будову приладів для вимірювання ЕРС, які називаються потенціометрами.

Хід роботи

1. Скласти установку згідно схеми (рис.2), не приєднуючи джерел струму до того часу, поки установка не буде перевіреною.

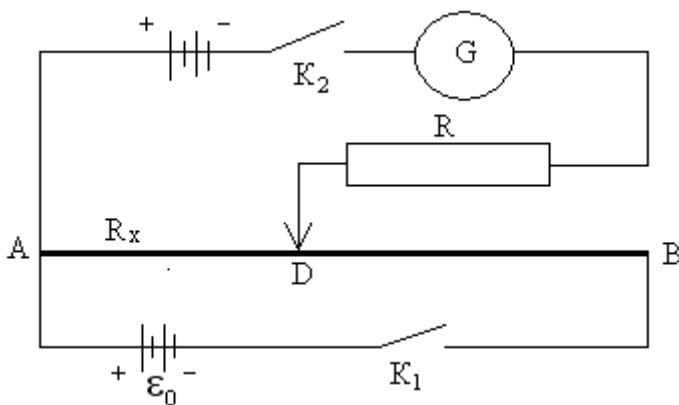


Рис. 2

2. Увімкнути в коло гальванометра нормальний елемент.

3. Замкнути за допомогою ключа K_1 спочатку коло акумулятора, а потім коло елемента і, переміщуючи ковзний контакт реохорда, досягти відсутності струму.

4. Визначити за положенням ковзного контакту довжину відрізка $AD=L_N$. Дослід повторити не менше трьох разів. Щоб уникнути поляризації елемента, замикання кола елемента повинно тривати якомога менший час.

5. Увімкнути в коло гальванометра один з досліджуваних елементів і знайти довжину відрізка $AD=L_x$, при якому струм в колі гальванометра буде відсутній.

6. Провести вимірювання з усіма елементами.

7. Результати вимірювань записати до звітної таблиці. Провести обрахунки ЕРС досліджуваних елементів і похибок вимірювань.

№ п/п	ε_N , В	L_N , м	ΔL_N , м	L_x , м	ΔL_x , м	ε_x , В	$\varepsilon_{x \text{ сер}}$, В	$\Delta \varepsilon_x$, В	E , %

Контрольні запитання

1. Що називають потенціалом електричного поля, які одиниці його вимірювання в СІ? Що називають різницею потенціалів?
2. Запишіть рівняння зв'язку між потенціалом та напруженістю електричного поля.
3. Чому робота електростатичних сил з переміщення електричного заряду вздовж замкнутого контура дорівнює нулю?
4. Що називають постійним електричним струмом?
5. У чому полягає відмінність між електричним полем постійних струмів і кулонівським полем статичних зарядів?
6. Записати умову замкненості ліній постійного струму.
7. Якими є умови існування струму у колі?
8. Що називають електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму, в яких одиницях вона вимірюється в СІ?
9. Яку ділянку кола називають неоднорідною?
10. Записати закон Ома для замкнутого кола; для неоднорідної ділянки кола.
11. У чому різниця між напругою та ЕРС?
12. Сформулюйте правила Кірхгофа.
13. Обґрунтуйте суть компенсаційного методу з вимірювання ЕРС.
14. Що являє собою нормальний елемент Вестона, яку роль він відіграє у досліджуваному компенсаційному методі?
15. Поясніть чому важливо, щоб ЕРС допоміжного джерела була більшою, ніж ЕРС кожного з досліджуваних елементів?

Лабораторна робота № 5 **ВИВЧЕННЯ ВАКУУМНОГО ДІОДА**

Мета роботи: Ознайомитись з будовою і дією двохелектродної лампи та визначити її основні параметри.

Прилади і матеріали: 1) двохелектродна лампа, 2) випрямляч типу ВУП на 250 В, 3) реостат, 4) вольтметр на 300 В, 5) міліамперметр на 60 мА, 6) з'єднувальні провідники, 7) вимикачі.

Короткі теоретичні відомості

Дія вакуумних ламп (діодів та тріодів) заснована на проходженні струму у вакуумі і ґрунтується на явищі термоелектронної емісії.

Явище термоелектронної емісії полягає у випромінюванні електронів нагрітими металами. В процесі хаотичного руху всередині металу окремі вільні електрони набувають кінетичної енергії, більшої від роботи виходу електрона з металу. Такі електрони вириваються (емітують) з металу і утворюють навколо нього “електронну хмаринку”. Емісія електродів зростає в міру нагрівання металу.

Між катодом і анодом (рис. 1) створюється електричне поле, під дією якого і відбувається напрямлений рух електронів, тобто електричний струм у вакуумі.

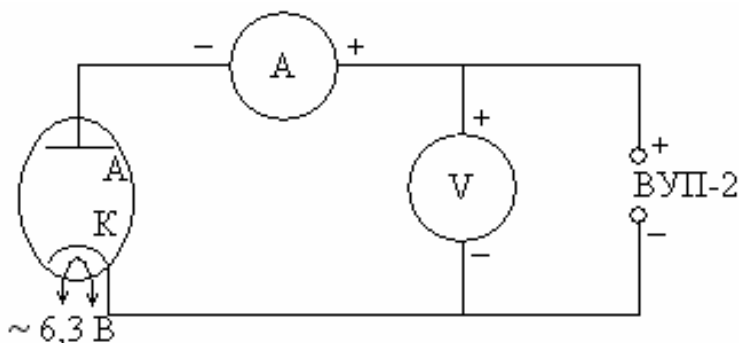


Рис. 1

У діоді використовується катод непрямого розжарення. Цим катодом є провідник з тугоплавкого металу (вольфраму, молібдену тощо), покритого оксидом

лужноземельних металів (BaO , SrO , CaO), що мають досить малу роботу виходу електронів ($1,1 \div 1,4 \text{ eV}$). Оксидний катод має форму цилін-

ндра, всередині якого знаходиться нитка розжарення. Робоча температура становить у сучасних оксидних катодів $770 \div 930^\circ\text{C}$ при $j_H \approx 10^4 \text{ А/м}^2$. Зниження температури розжарення катода забезпечує їхню значну економічність щодо споживання електричної енергії, збільшує термін роботи ламп та стабільність її параметрів. Анод має вигляд співвісного циліндра, розміщеного навколо катода. Струм у колі буде тільки тоді, коли на анод подано позитивний потенціал відносно катода. При зміні полярності струму не буде. Цим підтверджується те, що носіями струму через вакуум є саме електрони.

Основні характеристики діода.

1. *Вольт-амперна характеристика діода.* Якщо при сталій температурі катода збільшувати напругу між катодом анодом, то анодний струм через лампу зростатиме за досить складною залежністю (рис. 2). Але виявляється, що при певному значенні анодної напруги $U_a = U_H$ всі електрони досягають анода і струм більше не зростатиме. Такий максимальний струм називається *струмом насичення*. Струм насичення зростає зі збільшенням температури катод. Вищезгадана залежність струму від напруги називається анодною вольт-амперною характеристикою діода. При невеликих значеннях напруги струм зростає за законом ЛенгмюраЧайльда-Богуславського (так званий закон «трьох других»): $I_a = kU_a^{3/2}$, де k – коефіцієнт пропорційності,

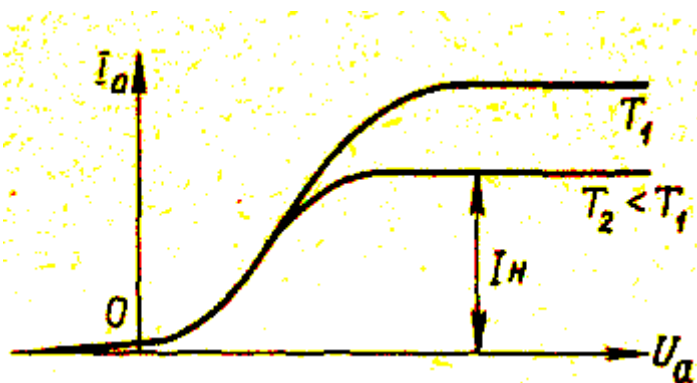


Рис. 2

який залежить від форми і розмірів електродів лампи.

2. *Густина термoeлектронного струму насичення j_H .* Емісійну здатність матеріалу катода ви-

значає густина термоелектронного струму насичення, що характеризує максимальну кількість електронів, які можуть покинути метал з одиниці поверхні за одиницю часу.

Згідно з квантовою теорією густина струму насичення визначається формулою Річардсона-Дешмена:

$$j_H = DT^2 e^{\frac{A}{KT}},$$

де $A = e\phi$ – робота виходу; D – стала, яка не залежить від роду матеріалу.

3. Основні параметри діода.

а) Крутизна характеристики S – це відношення приросту анодного струму ΔI_a до приросту анодної напруги (рис. 3) при сталій температурі катода.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad (1)$$

б) Внутрішній опір діода R_i – це відношення приросту анодної напруги ΔU_a до приросту анодного струму ΔI_a при сталій температурі катода:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad (2)$$

Потужність, яка розсіюється на аноді, визначається із співвідношення:

$$P_a = I_a U_a \quad (3)$$

Хід роботи

1. Скласти коло згідно рис. 1, дотримуючись полярності.
2. Приєднати нитку розжарення катода до спеціального гнізда на ВУП – “6,3 В”.
3. Збільшуючи анодну напругу через 20 В, зафіксувати покази міліамперметра. Дані занести до таблиці. Стежити, щоб анодний

струм досяг максимуму.

I_a , мА										
U_a , В										

4. Побудувати вольт-амперну характеристику діода:

$$I_a = f(U_a).$$

5. Вибрати прямолінійну ділянку на характеристиці і побудувати характеристичний трикутник (рис. 3). Визначити за ним крутизну характеристики та внутрішній опір діода за формулами (1) та (2).

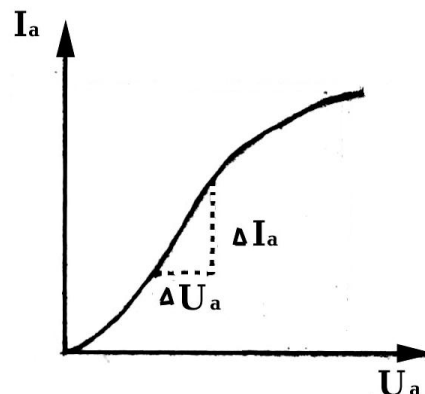


Рис. 3

Контрольні запитання

1. Яка будова і принцип дії вакуумного діода?
2. Яке фізичне явище називають термоелектронною емісією?
3. Яку роль відіграє „електронна хмаринка“, що утворюється біля катоду внаслідок термоелектронної емісії?
4. Як впливає температура катода на його емісійні властивості?
5. Що називають роботою виходу електрона з металу, в яких одиницях вона вимірюється?
6. Від чого залежить значення струму насичення для вакуумних діодів?
7. Що є достатньою умовою потрапляння електронів до аноду?
8. Чи буде працювати вакуумний діод, якщо на анод подати негативний потенціал? Чому?
9. Означте основні характеристики діода: вольт-амперну та густину термоелектронного струму насичення тощо.
10. Записати та пояснити закон «трьох других».
11. Що називають струмом насичення?
12. Чим визначається термоелектронний струм насичення?
13. Записати та пояснити формулу Річарсона-Дешмена.
14. Означте основні параметри діода.
15. Яке практичне використання вакуумних діодів?

Лабораторна робота №6
ВИВЧЕННЯ ВАКУУМНОГО ТРІОДА

Мета роботи: Ознайомитись з будовою трьохелектродної лампи, дослідити основні характеристики тріода та визначити його параметри.

Прилади і матеріали: 1) трьохелектродна лампа типу 6P8C, 2) випрямляч типу ВУП на 250 В, 3) випрямляч на 4 В, 4) реостат, 5) вольтметр з межами вимірювання $0 \div 300$ В, 6) міліамперметр з межами вимірювання $0 \div 30$ мА, 7) вимикач, 8) вольтметр з межами вимірювання $0 \div 3$ В, 9) з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості

Для підсилення змінного струму чи напруги часто використовують трьохелектродну лампу – тріод. Дія цієї лампи ґрунтується на явищі термоелектронної емісії (див. роб. №5).

Тріоди відрізняються своєю будовою від діодів. У тріодах між анодом і катодом розміщується третій електрод, який дістав назву керуючої сітки. Між сіткою і катодом прикладається так звана сіткова напруга. Оскільки сітка розміщена ближче до катода і певною мірою “екранує” вплив анода на катод, то незначна зміна потенціалу на ній досить сильно впливає на величину анодного струму. Отже, якщо на сітку подати навіть невеликий позитивний потенціал – електрони прискорюватимуться, і навпаки, навіть незначний негативний потенціал гальмуватиме електрони. При деякому негативному значенні потенціалу електрони практично не досягатимуть анода лампи. В цьому випадку кажуть, що *лампа заперта*.

У тріоді анодний струм є функцією двох напруг – анодної U_a і сіткової U_c . Напруги U_a і U_c можуть змінюватись незалежно одна від одної.

Характеристики і параметри тріода. 1. Нехай $U_c = \text{const}$, тоді $I_a = f(U_a)$. Графік функції $I_a = f(U_a)$ (рис. 1) називають анодною

статичною характеристикою триода. Внутрішній опір лампи R_i визначається як $R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_c}$.

Індекс U_c вказує на незмінність сіткової напруги. Різними сталими значеннями U_c відповідають різні анодні характеристики.

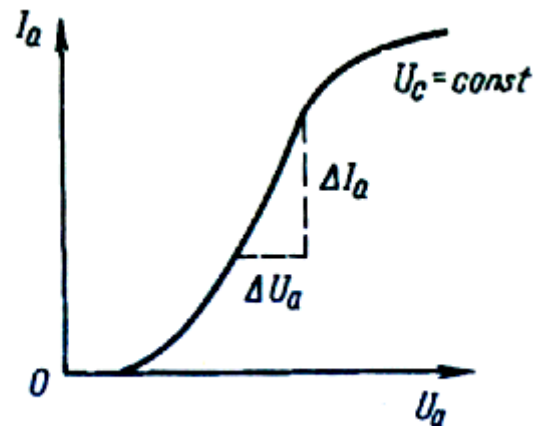


Рис. 1.

2. Нехай $U_a = const$, тоді $I_a = f(U_c)$. Графіки, які визначають залежність анодного струму I_a від напруги на сітці U_c при сталій анодній напрузі ($U_a = const$), називаються сітковими статичними характеристиками лампи (рис. 2).

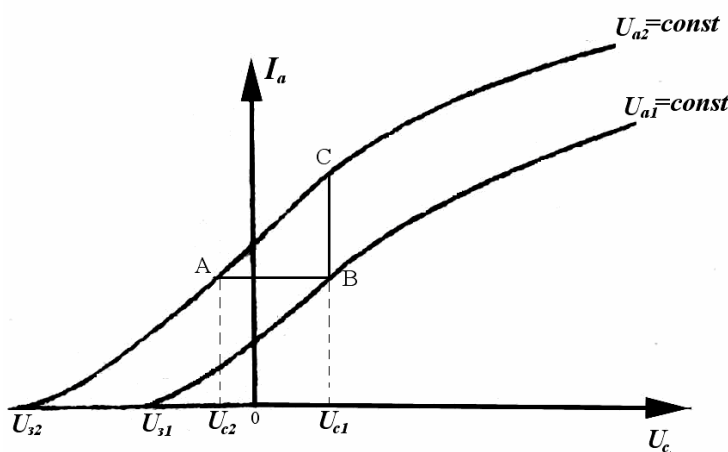


Рис.2

Для різних анодних напруг U_a запірний потенціал (U_3) різний. Для більших анодних напруг запірний потенціал – більший. Тому для різних анодних напруг можна дістати так звану сім'ю сіткових характеристик.

Для визначення параметрів лампи методом трьох точок потрібно на прямолінійній ділянці двох сіткових характеристик побудувати характеристичний трикутник ABC (рис. 2). Сторона AB визначає зміну напруги на сітці лампи ΔU_c , BC – зміну анодного струму ΔI_a при

$$U_a = \text{const}.$$

Крутість сіткової характеристики є показником ступеня підсилення лампи і визначається як тангенс кута нахилу характеристики. Вона дорівнює відношенню зміни анодного струму до зміни сіткової напруги при сталій анодній напрузі.

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \right)_{U_a} = \frac{CB}{AB} \quad (1)$$

Внутрішній опір лампи – відношення приросту анодної напруги до викликаного ним приросту анодного струму (при сталій напрузі на сітці лампи).

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_c} = \frac{U_{a1} - U_{a2}}{BC} \quad (2)$$

Коефіцієнт статистичного підсилення μ дорівнює відношенню зміни анодної напруги ΔU_a до зміни напруги на керуючій сітці при сталому анодному струмі:

$$\mu = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \right)_{I_a} = \frac{U_{a2} - U_{a1}}{U_{c2} - U_{c1}}, \quad (3)$$

індекс I_a вказує на те, що анодний струм сталий.

Величина, обернена до коефіцієнта підсилення, називається *проникністю лампи* D :

$$D = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

Хід роботи

I. Скласти коло за схемою рис. 3, дотримуючись полярності.

2. Встановити анодну напругу 80 В. Потенціометром R добитись найменшого значення сіткової напруги та анодного струму. Потім, збільшуючи напругу на сітці через 0,5 В, записати значення анодного струму, підтримуючи постійним значення анодної напруги.

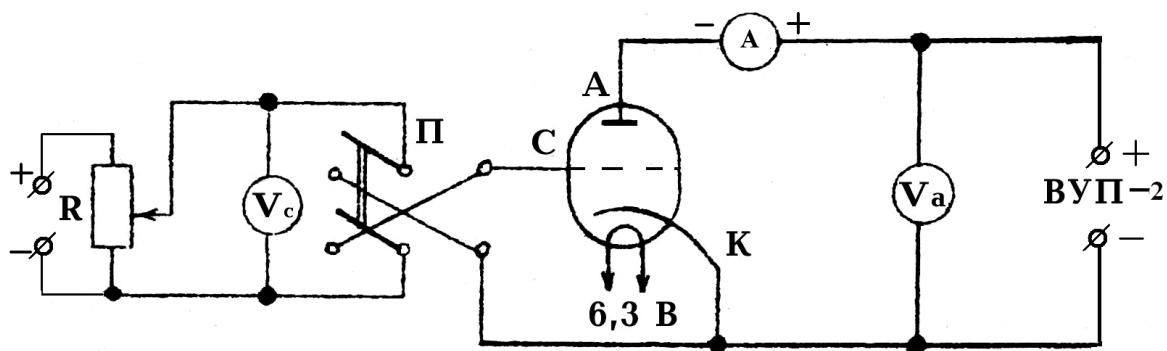


Рис. 3

3. Змінити знак потенціалу на сітці на протилежний, перекинувши перемикач П в інше положення. Виконати пункт № 2.

4. Пункти №2 і №3 виконати також при значенні анодної напруги 120 В.

5. Результати вимірювань занести до таблиці.

$U_a=80\text{ В}$	I_a, mA										
	$U_c, \text{В}$										
$U_a=120\text{ В}$	I_a, mA										
	$U_c, \text{В}$										

6. Подати на керуючу сітку невеликий позитивний потенціал – 2,5 В.

7. Змінюючи анодну напругу від 0 до 130 В через кожні 5 ÷ 10 В та підтримуючи незмінний потенціал на сітці, виміряти значення анодного струму.

8. Результати вимірювань занести до таблиці.

$U_c = 2,5\text{ В}$	I_a, mA										
	$U_a, \text{В}$										

9. На міліметровому папері побудувати графіки $I_a = f(U_c)$ та $I_a = f(U_a)$.

10. З графіків сіткових характеристик визначити за формулами (1), (2), (3) параметри лампи. Визначити також їх абсолютні та відносні похибки.

Примітка. Розглянуті характеристики належать до так званого статичного режиму роботи лампи, тобто такого, коли в анодному колі немає навантаження. При наявності анодного навантаження параметри лампи і режим її роботи називають динамічними.

Контрольні питання

1. Яка будова і принцип дії вакуумного тріода?
2. Як впливає температура катода на його емісійні властивості?
3. Що називають роботою виходу електрона з металу, в яких одиницях вона вимірюється?
4. Що є достатньою умовою потрапляння електронів до аноду?
5. Для чого до складу вакуумного тріода входить сітка?
6. Чи буде працювати вакуумний тріод, якщо на анод подати негативний потенціал?
7. Чим відрізняється вакуумний тріод від вакуумного діода?
8. Що розуміють під статичним та динамічним режимами роботи лампи?
10. Означте основні характеристики тріода.
11. Що розуміють під анодною статичною характеристикою тріода? під сітковою статичною характеристикою тріода?
12. Що називають струмом насичення? Чим визначається термоелектронний струм насичення?
13. Як визначають коефіцієнт статичного підсилення лампи?
14. Що називають проникністю лампи?
15. Як визначити параметри лампи за її сітковими статичними характеристиками?

ВИВЧЕННЯ ТЕРМОПАРИ

Мета роботи: Визначити для термопари залежність ТЕРС від різниці температур її спаїв, залежність диференціальної постійної від температури; проградувати гальванометр у колі термопари для використання його як шкали термоелектричного термометра.

Прилади і матеріали: 1) термопара, 2) гальванометр, 3) електроплитка, 4) два калориметри, 5) два термометри, 6) штатив для закріплення одного спаю термопари в пробірці у вертикальному положенні.

Короткі теоретичні відомості

Термопара представляє собою прилад, що складається з двох різних за хімічним складом провідників, кінці яких спаяні і один з

провідників розірваний для ввімкнення термопари в коло (рис. 1).

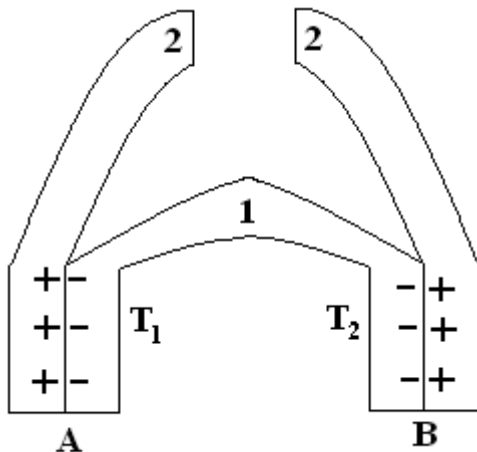


Рис. 1

Відомо, що в місці контакту двох різних за хімічним складом провідників виникає контактна різниця потенціалів $\Delta\varphi$, яка обумовлена різними концентраціями вільних електронів (n_1 і n_2) і різними роботами виходу електронів (A_1 і A_2) з цих металів.

Покладемо, що концентрації $n_1 < n_2$, а робота виходу електронів $A_1 > A_2$. Згідно класичній теорії вільні електрони можна розглядати як електронний газ, тиск якого $P = n_e kT$, де k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура.

Завдяки різниці концентрацій електронів у металах виникне різниця тисків, електрони почнуть дифундувати з другого металу в перший. Виникне дифузійний струм, у результаті чого перший метал заряджатиметься негативно, а другий позитивно.

Якщо $A_1 > A_2$, то електронам легше вирватися з другого металу, ніж з першого, і дифузія найбільш швидких електронів з другого металу в перший буде більша, ніж з першого в другий. Тому в другому металі не вистачатиме деякої кількості електронів і він зарядиться позитивно, а в першому металі з'явиться надлишок електронів, і він зарядиться негативно. Отже, це буде другою причиною виникнення на стику металів контактної різниці потенціалів.

Електричне поле, що виникне в приконтактній області, створить зустрічний потік електронів, тобто струм провідності. В стані термодинамічної рівноваги дифузійний струм компенсуватиметься струмом провідності. Різниця потенціалів, що виникає при цьому (максимальна при даній температурі) називається контактною різницею потенціалів $\Delta\varphi$, яка на основі класичної електронної теорії провідності визначається співвідношенням:

$$\Delta\varphi = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

При однаковій температурі спайів ($T_1 = T_2$) маємо: $\Delta\varphi_A = \Delta\varphi_B$. Це означає, що напруга між спаями

$$U = \Delta\varphi_A - \Delta\varphi_B = 0.$$

Якщо ж $T_2 > T_1$, $\Delta\varphi_B > \Delta\varphi_A$:

$$U = \Delta\varphi_B - \Delta\varphi_A = \frac{k(T_2 - T_1)}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = \alpha(T_2 - T_1) \quad (2)$$

Різниця потенціалів U , що виникає при цьому, називається термоелектрорушійною силою (ТЕРС) $\varepsilon = U = \alpha(T_2 - T_1)$, де α – постійна термопари:

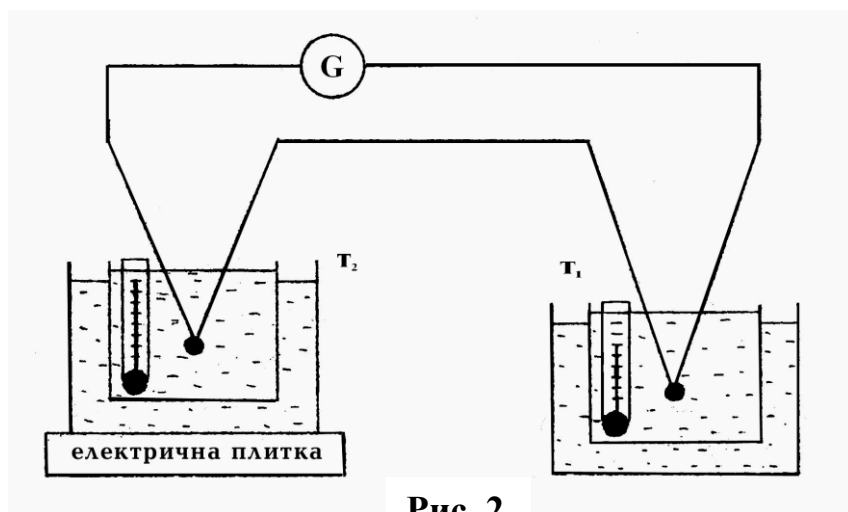
$$\alpha = \frac{\varepsilon}{(T - T_1)} \quad (3)$$

Постійна термопар α – це фізична величина, яка показує, яка термоелектрорушійна сила створюється термопарою при різниці температур її спаїв на один градус.

Постійна термопар залежить від роду металів, що утворюють термопару і від температури, в інтервалі якої визначається постійна термопар. Тому для практичного використання термопар визначальне значення має диференціальна стала.

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} \approx \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} \quad (4)$$

Термопар знаходять широке застосування для вимірювання температури – термоелектричні термометри. Так, наприклад, мідь-



константанові термопар чи залізно-константанові, вимірюють температури до 500-800°C, а платино-іридієві вимірюють температури до 1700°C.

Хід роботи

Завдання №1. Визначити для термопар залежність $\varepsilon = f(\Delta T)$.

1. Зібрати схему згідно рис.2. Спаї термопар разом з термометрами знаходяться у внутрішніх посудинах (пробірках). В ці посудини наливо масло (але можна також залити дистильовану воду).

2. Налити у зовнішні посудини воду при кімнатній температурі.

3. Визначити покази гальванометра при кімнатній температурі.

4. Увімкнути електроплитку в електромережу і, нагріваючи воду в калориметрі, знімати покази гальванометра через кожні 10 °С.

5. Виконати 5-7 вимірів при різних температурах, але не підвищуючи температуру спаю вище 90°С.

6. Знаючи ціну поділки гальванометра, за струмом ($I = Gn$) та опором гальванометра R_g і термопари R_T на основі закону Ома для повного кола розрахувати ТЕРС:

$$\varepsilon = Gn(R_g + R_T)$$

7. Результати вимірювань занести до таблиці, яку скласти самостійно.

8. На міліметровому папері побудувати графік залежності $\varepsilon = f(\Delta T)$, де $\Delta T = T_2 - T_1$.

9. Зробити висновки.

10. За графіком $\varepsilon = f(\Delta T)$ визначити величину диференціальної сталої α , як тангенс кута нахилу прямої, що зображає залежність, до вісі Т: $\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta(\Delta T)}$.

Завдання №2. Побудувати графік залежності диференціальної сталої термопари від температури.

1. Побудувати графік залежності $\alpha = f(T_2)$.

2. Зробити висновки.

Завдання № 3. Проградувати гальванометр для використання його як шкали термоелектричного термометра.

1. За даними завдання №1 побудувати графік залежності $n = f(T_2)$, вважаючи що $T_1 = \text{const}$, n – число поділок, на яке відхиля-

ється стрілка гальванометра.

Вказівки і рекомендації.

1. Опір R_g гальванометра, ціна поділки вказані на шкалі гальванометра. Опір R_T термопарі вказаний на самій термопарі.

2. При побудові графіку $n = f(T_2)$ початок координат змістити в точку з температурою, що відповідає температурі холодного спаю термопарі.

5. У завданні №2 переведіть температуру з $^{\circ}\text{C}$ у K .

Контрольні запитання

1. Що розуміють під контактним явищем?
2. Перерахуйте відмінності контактних явищ в металах та напівпровідниках?
3. Що називають контактною різницею потенціалів двох металів?
4. Чим обумовлене виникнення контактної різниці потенціалів двох металів?
5. Чим відрізняється внутрішня та зовнішня контактні різниці потенціалів, як вони визначаються?
6. Що являє собою термопара?
7. Отримайте формулу для розрахунку контактної різниці потенціалів термопарі, використавши статистичний розподіл Больцмана для мікрочастинок за їх енергіями.
8. Що називають термоелектрорушійною силою, в яких одиницях вона вимірюється?
9. Якими ще методами, крім досліджуваного в даній роботі, можна виміряти термоелектрорушійну силу?
10. Який фізичний зміст постійної термопарі, від чого вона залежить?
11. Що називають диференціальною сталою термопарі, в яких одиницях вона вимірюється?
12. Для чого рекомендують занурювати спаї термопарі в масло?
13. Як за результатами вимірювань виконаної лабораторної роботи можна встановити, з яких металів виготовлена досліджувана термопара?
14. Де на практиці знайшла своє застосування термопара?
15. Які переваги й недоліки термоелектричних термометрів?

ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Мета роботи: Дослідити залежність магнітної індукції між полюсами електромагніту від величини сили струму через обмотку електромагніту при постійному зазорі між полюсами. Дослідити залежність магнітної індукції від величини зазору між полюсами електромагніту при постійному струмі через електромагніт.

Прилади й матеріали: 1) електромагніт, 2) балістичний гальванометр, 3) вимірювальна котушка, 4) реостат, 5) випрямляч ВСШ-6 (джерело постійного струму), 6) міліамперметр на 150 мА, 7) вимикач, 8) з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості

Розглянемо коло, яке складається з балістичного гальванометра 1 (рис. 1) і вимірювальної котушки 2, яка поміщена в магнітне поле електромагніту 3. В коло живлення електромагніту увімкнені потенціометр R , амперметр і вимикач K .

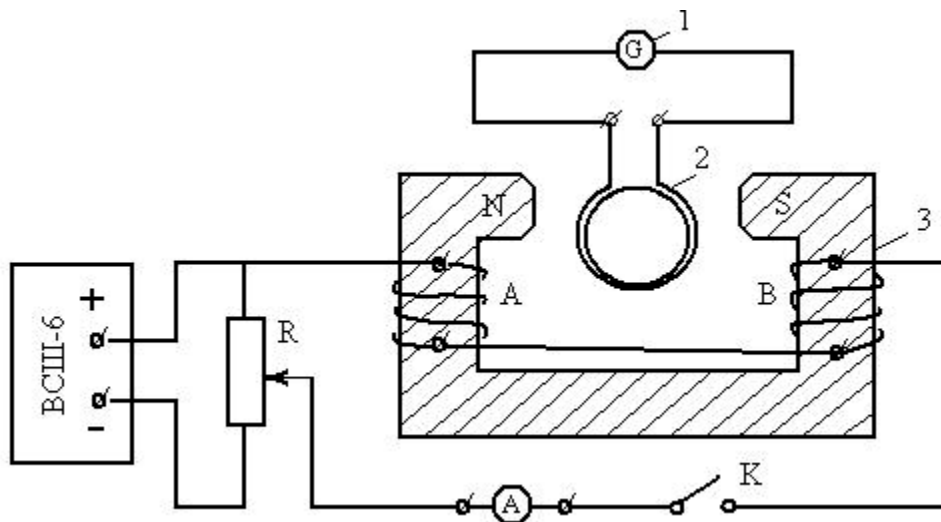


Рис. 1.

Коли замкнути вимикач K і через обмотку електромагніту пропустити постійний струм, то через певний час в зазорі між полюсами електромагніту встановиться постійне магнітне поле з індукцією $\vec{B}$. Вимірювальна котушка 2 знаходиться в цьому постійному магнітному

полі. Оскільки магнітне поле буде постійним ($\frac{dB}{dt} = 0$), то, згідно закону Фарадея, в котушці не виникатиме ЕРС індукції і струму в колі гальванометра не буде.

Якщо ж розімкнути вимикач К в колі живлення електромагніту, то струм в електромагніті спадатиме за час τ від деякого значення i до нуля. Одночасово і магнітна індукція в зазорі між полюсами теж буде (за цей самий час τ) зменшуватися від $\vec{B}$ до нуля. Гальванометр в цей час покаже наявність струму, – це пов'язано з тим, що всяка зміна магнітного потоку через вимірювальну котушку 2, у відповідності з законом Фарадея, викличе в ній виникнення ЕРС індукції, яка рівна

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

де Φ – потік магнітної індукції через всі N витків вимірювальної котушки.

Позначивши через S площу витка котушки, одержимо для потоку магнітної індукції через площину перпендикулярну до вектора індукції магнітного поля:

$$\Phi = NSB \quad (2)$$

Підставивши (2) у рівність (1), маємо:

$$\varepsilon_{ind} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

У свою чергу вимірювальну котушку можна розглядати як таку, що складається з чисто омичного та індуктивного опорів. За законом Ома ЕРС індукції буде дорівнювати сумі спадів напруг на омичному та індуктивному опорах кола. Спад напруги на індуктивному опорі чисельно рівний ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon' = L \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

а на омичному:

$$\varepsilon'' = (R + R_g) i. \quad (5)$$

Таким чином закон Ома для повного кола матиме вигляд:

$$-NS \frac{dB}{dt} = (R + R_g) i + L \frac{di}{dt}, \quad (6)$$

де L – індуктивність, R – омичний опір витків котушки, R_g – опір гальванометра.

Проінтегруємо рівняння (6) за часом від моменту вимкнення електромагніту ($t = 0$) до повного зникнення струму ($t = \tau$):

$$-NS \int_0^\tau \frac{dB}{dt} dt = (R + R_g) \int_0^\tau i dt + \int_0^\tau L \frac{di}{dt} dt. \quad (7)$$

За час τ величина індукції магнітного поля змінюється від $\overline{B}$ до 0, а сила струму в колі гальванометра спочатку зросте від 0 до i , а потім спаде від i до 0. Вираз $\int_0^\tau i dt = q$ визначає заряд, що протікає через гальванометр за час τ . Тому вираз (7) можна переписати у вигляді:

$$-NS \int_B^0 dB = (R + R_g) q + \int_0^0 L di, \quad (8)$$

звідки

$$B = \frac{(R + R_g)}{NS} q. \quad (9)$$

При відомих параметрах вимірювальної котушки ($N = 200$ вит., $S = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $R = 17 \text{ Ом}$) і відомому опорі гальванометра ($R_g = 30 \text{ Ом}$), завдання вимірювання магнітної індукції $\overline{B}$ полягає в

знаходженні заряду q . Знаючи балістичну постійну гальванометра ($\beta = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/под}$) заряд q можна визначити, вимірявши кількість поділок відхилення "зайчика" гальванометра при короткочасному проходженні струму в колі гальванометра: $q = \beta \cdot n$.

Установку, яка використовується в лабораторній роботі, зібрано згідно схеми, зображеної на рис.1. Електромагніт складається з двох котушок А і В від універсального трансформатора з осердями. Котушки з'єднуються між собою так, щоб струм у них був направлений взаємнопротилежно. В цьому випадку осердя будуть різними полюсами електромагніту. В зазорі між полюсами електромагніту магнітне поле досліджується за допомогою вимірювальної котушки 2, яка з'єднана з балістичним гальванометром 1.

Балістичний гальванометр застосовується для вимірювання заряду, що протікає в колі гальванометра за час τ .

Хід роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, вказаною на рис.1. Виявити наявність світлового "зайчика" на шкалі гальванометра.
2. Встановити "зайчик" гальванометра на нульову поділку шкали.
3. Встановити зазор між полюсами електромагніту $l=2 \text{ см}$.
4. Замкнути вимикач К і за допомогою реостату встановити силу струму, що протікає через електромагніт $I=120 \text{ мА}$.
5. Різко вимкнути струм через електромагніт вимикачем К. Визначити відхилення "зайчика" за шкалою гальванометра (записати число поділок n).
6. Змінюючи силу струму в колі електромагніту від 120 мА до

60 мА через кожні 10 мА, визначати відхилення "зайчика" для кожного значення струму.

5. Для кожного значення струму відхилення зайчика визначають 6-7 разів. Результати вимірювань занести до таблиці:

6. Побудувати графічну залежність $B = f(i)$ при постійному зазорі між полюсами електромагніту. Врахувати, що $B = \frac{(R + R_g)}{NS} \beta n$.

7. Встановивши постійний струм через котушки електромагніту ($I=120$ мА), визначити залежність індукції магнітного поля в зазорі між полюсами електромагніту від величини цього зазору. Починаючи з відстані 20 мм, збільшують зазор на кожні 5 мм до 50 мм і визначають відхилення "зайчика" за методикою, викладеною в п.5.

8. Для кожного значення зазору між полюсами електромагніту вимірювання відхилення "зайчика" провести 6-7 разів. Результати занести до таблиці.

$l=2$ см=const				$I=120$ мА=const		
№	I , А	n , под	B , Тл	l , мм	n , под	B , Тл

9. Побудувати графічну залежність $B = f(l)$ при $I = \text{const}$.

Контрольні запитання

1. Що називають індукцією магнітного поля, в яких одиницях її вимірюють?
2. Яка фізична величина визначає роботу електричних сил над одиничним точковим зарядом, який внесений у поле замкненим контуром?
3. Чому дорівнює робота магнітної складової сили Лоренца з переміщення електричного заряду?
4. Яка зі складових магнітної сили виконує роботу з переміщення електричного заряду у провіднику поміщеного перпендикулярно до

зовнішнього магнітного поля?

5. Яка фізична суть явища електромагнітної індукції?
6. Назвіть основні причини, що можуть обумовлювати явище електромагнітної індукції?
7. Що називають магнітним потоком, в яких одиницях його вимірюють?
8. Сформулюйте закон електромагнітної індукції Фарадея.
9. Сформулюйте правило Ленца для закону електромагнітної індукції Фарадея.
10. Яка фізична суть явища самоіндукції?
11. Що називають індуктивністю контуру, в яких одиницях її вимірюють в СІ?
12. Як розрахувати потік магнітного поля для явища самоіндукції?
13. Записати закон електромагнітної індукції Фарадея для явища самоіндукції.
14. Якою є будова і принцип дії балістичного гальванометра, чим принципово він відрізняється від звичайного гальванометра?
15. У чому полягає суть розглядуваного методу з визначення індукції магнітного поля?

Лабораторна робота №9
**ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ КІЛ
ЗМІННОГО СТРУМУ**

Мета роботи: навчитися вимірювати активний опір та індуктивність котушки, ємність конденсатора та перевірити закон Ома для змінного струму.

Прилади і матеріали: 1) котушка індуктивності з секціями на 1200, 2400 та 3600 витків, 2) два конденсатори (на 4 і 6 мкФ), 3) лабораторний автотрансформатор (ЛАТР), 4) амперметр для змінного струму ($i_{\max} = 1 \text{ A}$), 5) вольтметр для змінної напруги (до 150 В), 6) вимикач, 7) місток Р-333 для вимірювання опорів.

Короткі теоретичні відомості

Змінним електричним струмом називається такий струм, сила і напруга якого змінюються за величиною і напрямком. У промисловій мережі струм представляє собою періодичну функцію часу, яку можна з достатнім наближенням прийняти за синусоїдальну, а частота його, згідно з прийнятими в СНД стандартами, становить 50 Гц. Такий струм називається *технічним* або *квазістаціонарним*, оскільки довжина його електромагнітної хвилі досить велика порівнянно з довжиною провідників кола.

За наявності активного опору R (рис. 1) у колі синусоїдальної ЕРС ($\varepsilon = \varepsilon_{\max} \sin \omega t$) виникає струм, який за фазою співпадає з ЕРС на ділянці кола R і величина якого визначається за відомим законом Ома:

$$i = \frac{\varepsilon_m}{R} \sin \omega t = i_m \sin \omega t, \quad (1)$$

де ε_m , i_m – амплітудні значення сили струму і ЕРС в колі.

На ділянці кола, яка містить активний опір R і індуктивність L (рис.2) під дією змінного струму в котушці виникає ЕРС самоіндукції, яка приводить до зменшення струму $i = i_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$, і до зсуву фаз

між струмом і ЕРС (струм буде відставати за фазою від ЕРС на кут φ).

Загальний опір в колі збільшується:

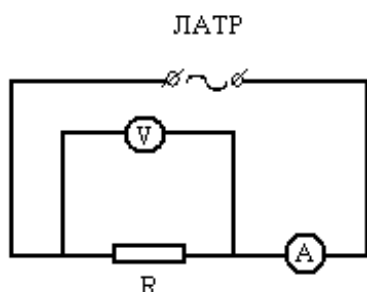


Рис. 1.

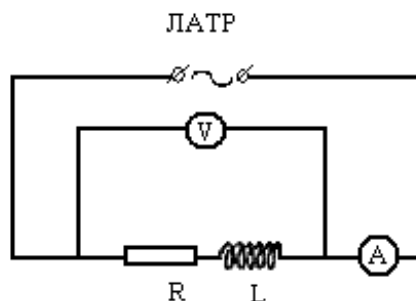


Рис. 2.

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

де $\omega L = X_L$ – індуктивний опір, R – активний опір кола і котушки. Тоді

$$i_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}. \quad (3)$$

Зсув фаз між струмом та напругою в цьому випадку визначається формулою: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}.$ (4)

При наявності активного опору і ємності (рис.3) в колі синусоїдальної ЕРС виникає струм, який за фазою випереджає напругу на ділянці кола:

$$i = i_{\max} \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

$$\text{де } i_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(C\omega)^2}}}, \quad \text{а } \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{RC\omega}. \quad (6)$$

У цьому випадку конденсатор C чинить *реактивний опір* X_C .

Величина $X_C = \frac{1}{C\omega}$ називається *ємнісним опором*.

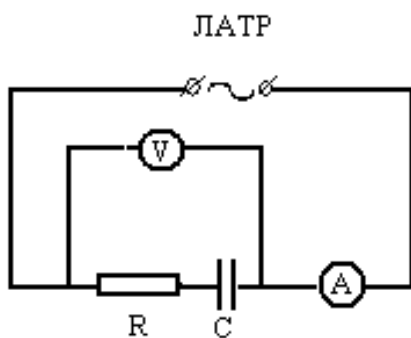


Рис. 3

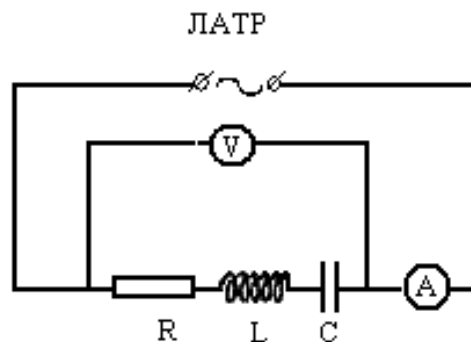


Рис. 4

Цей опір виникає внаслідок того, що заряд конденсатора $q = CU$ неперервно змінюється, тому що змінюється напруга. Сила струму буде тим більша, чим більша ємність конденсатора і чим частіше відбуватиметься перезарядка, тобто чим більша частота змінного струму.

Розглянемо коло змінного струму, яке складається з послідовно увімкнених омичного опору R , індуктивності L та ємності C (рис.4). При дії в колі синусоїдальної ЕРС ($\varepsilon = \varepsilon_{\max} \sin \omega t$) виникає сила струму $i = i_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$. Закон Ома для повного кола змінного струму запишеться:

$$i_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

де $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ – повний опір електричного кола змінного струму, $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ – реактивний опір кола.

Між силою змінного струму та напругою в колі має місце зміщення за фазою φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (7)$$

Виникнення зміщення за фазою між силою струму і напругою на ділянці кола змінного струму, що містить в собі активний, індуктивний і ємнісний опори, можна показати за допомогою векторної діаграми (рис. 5). Оскільки однаковим для всіх опорів R , X_L , X_C на ділянці кола є сила струму i , то побудови векторної діаграми слід розпочати з вектора сили струму $\vec{i}$. Відкладемо цей вектор на осі абсцис. Оскільки напруга на активному опорі співпадає за фазою зі струмом, то на цій же осі відкладаємо й амплітудне значення напруги на активному опорі $U_R = iR$.

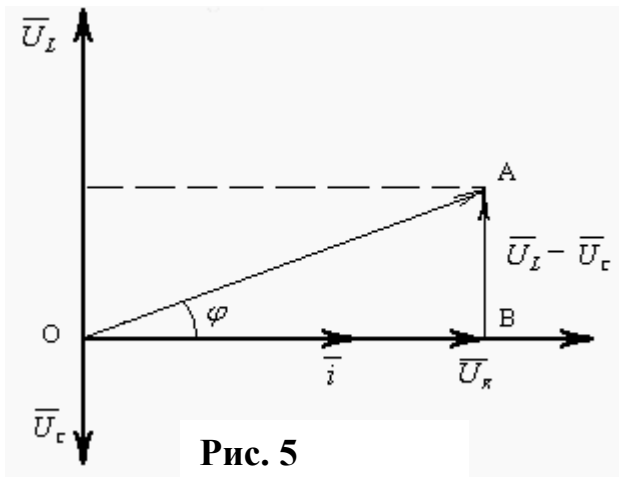


Рис. 5

Напруга на чисто індуктивному опорі випереджає струм за фазою на кут $\varphi = \frac{\pi}{2}$, а тому амплітудне значення напруги на індуктивності відкладемо на осі ординат, вгору: $U_L = i\omega L$.

Напруга на ємнісному опорі відстає за фазою від струму на кут $\varphi = \frac{\pi}{2}$, тому значення цієї напруги відкладемо вниз на осі ординат: $U_C = \frac{i}{\omega C}$.

З векторної діаграми видно, що напруги на індуктивності та на ємності знаходяться в протифазі. Їх різниця $(\vec{U}_L - \vec{U}_C)$ дає вектор $\vec{BA}$. Загальна напруга в колі $\vec{U}$ є векторною сумою векторів $\vec{U}_R$ і $\vec{BA}$, і визначається вектором $\vec{OA}$. Кут φ в трикутнику OAB виражає зсув фаз між струмом і напругою в даному колі змінного струму.

Максимальні значення сили струму i_m і напруги U_m пов'язані з

ефективними значеннями сили струму i_{ef} і напруги U_{ef} , які вимірюються електровимірювальними приладами, такими співвідношеннями:

$$i_{ef} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}; U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Ефективне (діюче) значення сили змінного струму дорівнює силі постійного струму, який в даному колі створює енергетичний ефект, що дорівнює, ефектові, створюваного змінним струмом.

Для ефективних значень сили струму і напруги закон Ома має вигляд:

$$i_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (9)$$

де R – це сума всіх активних опорів ділянок кола, в тому числі індуктивності, на кінцях якої вимірюється напруга.

Хід роботи

Завдання № 1. Вимірювання активного опору окремих секцій котушки.

1. За допомогою містка постійного струму Р–333 виміряти опір окремих секцій котушок (1200, 2400 і 3600 витків).
2. Замкнути клема 1 і 2 (рис.6) за допомогою перемички, при цьому автоматично замикаються клема 3 і 4.
3. Перемикач 3 містка встановити в положення "МВ".
4. Підключити вимірювальний опір R_x (секцію котушки) до клем 2 і 3. Встановити перемикач плеч відношень Π_5 на множник 0,01.
5. Встановити на чотирьох декадах ($\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$) порівнюва-

льного плеча нульовий опір. Натисніть і зафіксуйте кнопку "Вкл.Г" і переходьте до вимірювання опору R_x , натискуючи кнопку "Грубо".

6. Зрівноважте схему (стрілку гальванометра встановіть на нулю) ручками перемикачів $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$. Починати слід з перемикача Π_1 . Натисніть кнопку "Точно" і повністю зрівноважте місток.

7. Обрахуйте опір за формулою: $R = nR_n$, де n – множник, встановлений на декаді плеч співвідношень Π_5 (у нашому випадку $n = 0.01$), R_n – загальний опір, встановлений на декадах $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$.

8. Після закінчення вимірювань потрібно обов'язково віджати кнопки "Вкл.Г", "Грубо", "Точно".

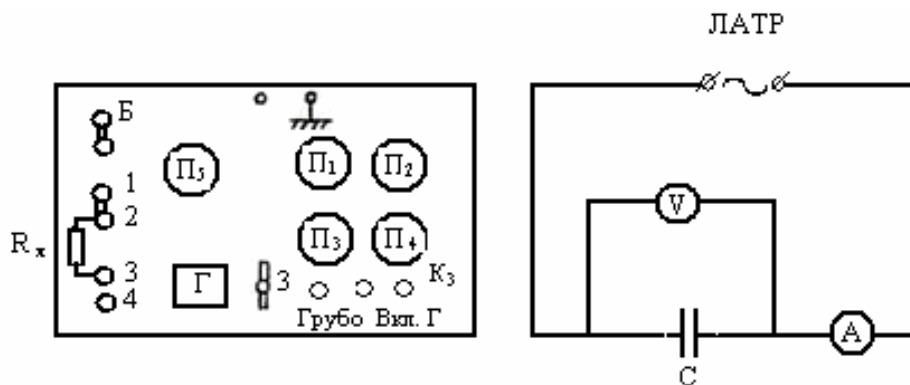


Рис. 6.

Рис. 7.

Завдання № 2. Визначення індуктивностей секцій котушки.

1. Зібрати коло згідно рис.2, де під L розуміють різні секції котушки, R – активний опір дроту, з якого виготовлена котушка. Активний опір секцій котушки вимірюється згідно завдання 1. Джерелом напруги є регулятор напруги (ЛАТР), увімкнений в промислову мережу ($\nu = 50 \text{ Гц}$, $\omega = 2\pi\nu = 314 \text{ с}^{-1}$). В початковий момент вимірювання напруга на ЛАТРі повинна бути мінімальною (вивести ЛАТР на нуль).

2. Після перевірки складеної схеми, увімкнути ЛАТР в мережу. Для кожної секції котушки виміряти напругу при трьох значеннях си-

ли струму. Одержані дані занесіть до таблиці 1.

3. За формулами: $Z_L = \frac{U}{I}$; $L = \sqrt{\frac{Z_L^2 - R^2}{\omega^2}}$ розрахувати L для ко-

жної секції котушки та обрахувати абсолютну та відносну похибку вимірювання індуктивностей секцій котушки. При обчисленні абсолютних похибок Δi , ΔU використати клас точності приладів:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{Z\Delta Z + R\Delta R}{Z^2 - R^2} + \frac{\Delta \omega}{\omega}, \text{ де } \Delta Z = \frac{U\Delta i + i\Delta U}{i^2}$$

Таблиця 1.

Секції	R , Ом	ΔR , Ом	U , В	ΔU , В	i , А	Δi , А	Z_L , Ом	ΔZ_L , Ом	L , Гн	ΔL , Гн	$L_{сер}$, Гн
1200 витк											
1.											
2.											
3.											
2400 витк											
1.											
2.											
3.											
3600 витк											
1.											
2.											
3.											

Завдання № 3. Визначити ємності окремих конденсаторів і загальну ємність конденсаторів при їх послідовному і паралельному сполученнях.

1. Зібрати електричне коло у відповідності з рис.7.

2. Після перевірки схеми увімкніть ЛАТР у мережу, виміряйте напругу на конденсаторі при трьох значеннях струму. Вимкнути ЛАТР, замінити конденсатор у схемі і знову провести аналогічні операції. Результати вимірювань занести до таблиці 2.

3. Аналогічні операції провести при послідовному і паралельному з'єднанні конденсаторів. Результати вимірювань теж занести до

таблиці 2.

4. Розрахувати ємнісний опір $X_C = \frac{U}{i}$ та ємність кожного конденсатора (C_1, C_2), ємність при послідовному сполученні $C_{\text{посл}}$, при паралельному сполученні конденсаторів $C_{\text{пар}}$. Як робочу формулу можна використати: $C = \frac{i}{\omega X_C}$.

5. Розрахувати абсолютну і відносну похибку вимірювання ємностей $C_1, C_2, C_{\text{посл}}, C_{\text{пар}}$. Для обчислення $\Delta i, \Delta U$, використати клас точності приладів.

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta \omega}{\omega}.$$

Таблиця 2.

№		i, A	$\Delta i, A$	U, B	$\Delta U, B$	$X_C, \text{Ом}$	$\Delta X_C, \text{Ом}$	C, Φ	$\Delta C, \Phi$	$C_{\text{сер}}, \Phi$
C_1	1.									
	2.									
	3.									
C_2	1.									
	2.									
	3.									
$C_{\text{посл}}$	1.									
	2.									
	3.									
$C_{\text{пар}}$	1.									
	2.									
	3.									

Завдання № 4. Перевірити закон Ома для кола змінного струму.

1. Скласти схему відповідно до рис.4; активний опір R та індуктивність котушки L взяти ті, які були визначені в завданні №1 і №2. Рекомендується взяти секцію 1200 витків, та конденсатор $C=6$ мкФ, ємність якого була визначена в завданні №3.

2. Після перевірки схеми, впевнившись, що ЛАТР виведений на нуль, подати у схему напругу. Виміряти три різних значення на-

пруги і відповідні їм значення сили струму в колі. Обрахувати середнє значення повного опору: $Z_{вим} = \frac{U}{i}$.

3. Перевірка закону Ома зводиться до порівняння опору ділянки кола, розрахованого за показами амперметра і вольтметра в пункті

(2) $Z_{вим}$ з розрахунком за формулою: $Z_{теор} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$.

4. Результати вимірювань і обчислень занести до таблиці 3, зробити висновки.

Таблиця 3.

№	i , А	U , В	$Z_{вим}$, Ом	R , Ом	L , Гн	C , Ф	$Z_{теор}$, Ом	$\frac{Z_{вим} - Z_{теор}}{Z_{вим}}$, %
1. 2. 3. сер								

Контрольні запитання

1. Що розуміють під змінним електричним струмом?
2. Яка фізична суть явища самоіндукції?
3. Записати закон електромагнітної індукції Фарадея для явища самоіндукції.
4. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки кола та для повного кола.
5. Що називають коефіцієнтом самоіндукції, вказати одиниці його вимірювання у системі СІ?
6. Зобразити ділянку електричного кола, в якому проходить змінний струм і який має омичний опір, індуктивність та ємність, означити ці фізичні величини, вказати одиниці їх вимірювання.
7. Який опір провідника називають активним, індуктивним, ємнісним, як їх зображають в колах змінного струму, як розраховують, пояснити механізм їх виникнення, в яких одиницях вони вимірюються та яким типам навантажень відповідають?
8. Який опір провідника називають реактивним?
9. Чому дорівнює загальний опір ділянки змінного струму, що

- містить активний та індуктивний опори?
10. Чому дорівнює загальний опір ділянки змінного струму, що містить активний та ємнісний опори?
 11. Чому дорівнює загальний опір ділянки змінного струму, що містить послідовно з'єднані активний, індуктивний та ємнісний опори?
 12. Чим може бути обумовлений спад напруги в колах змінного струму?
 13. Що називають ефективним значенням струму й напруги в колах змінного струму, з яким із миттєвих значень вказаних характеристик вони пов'язані?
 14. У чому суть методу векторних діаграм для розрахунків параметрів кіл змінного струму.
 15. Виведіть робочі розрахункові формули вимірюваних у роботі фізичних величин, а також формули для обрахунку їх похибок.

Лабораторна робота № 10
**ОЗНАЙОМЛЕННЯ З РОБОТОЮ ЕЛЕКТРОННОГО
ОСЦИЛОГРАФА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО
ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ЗА ДОПОМОГОЮ
ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТРУБКИ**

Мета роботи: Ознайомитися з будовою і роботою електронного осцилографа та визначити за допомогою нього питомий заряд електрона.

Прилади і матеріали: 1) осцилограф типу ОЕШ навчальний; 2) випрямляч типу ВСА-111К; 3) амперметр до 5А; 4) кільцева котушка; 5) двохполюсний перемикач; 6) реостат.

Короткі теоретичні відомості

Електронний осцилограф є універсальним електровимірювальним приладом з широкими межами застосування. За його допомогою можна вивчати протікання різних електричних процесів у часі, а також функціональну залежність між такими процесами.

Сучасні методи дозволяють перетворювати змінні фізичні величини в пропорційні їм електричні напруги, тому осцилограф може

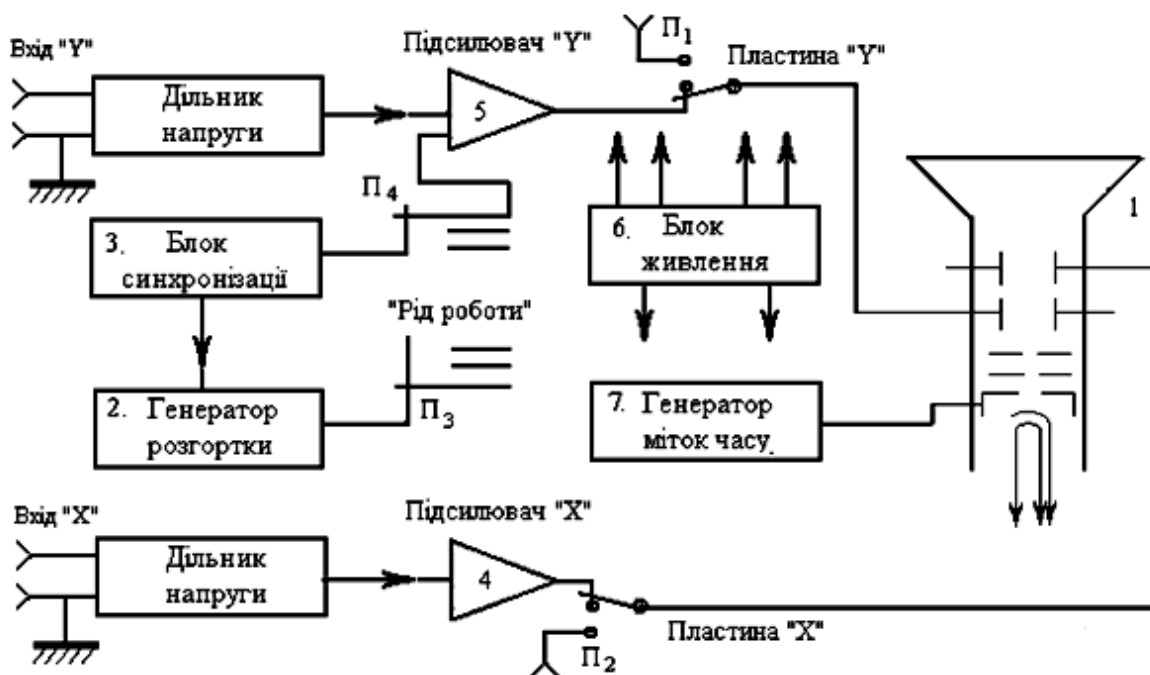


Рис.1

застосовуватися для вивчення функціональних залежностей між будь-якими фізичними величинами: механічними, світловими, тепловими і т.п.

Блок схему осцилографа наведено на рис. 1. Осцилограф складається з електронно-променевої трубки 1, генератора розгортки 2, блока синхронізації 3, двох підсилювачів 4 і 5, блока живлення 6. Для калібрування масштабу часу в деяких типах осцилографів є генератор міток часу 7.

Вимірювальним елементом електронного осцилографа є електронно-променева трубка, всередині якої утворюється електронний пучок, що падає на екран трубки. Розрізняють два типи трубок: з електростатичним фокусуванням електронного пучка і з магнітним фокусуванням. В трубках першого типу для фокусування й відхилення електронного променя застосовується електричне поле, а в трубках другого типу – магнітне поле. В осцилографах застосовуються трубки з електростатичним відхиленням, в той час як трубки з магнітним відхиленням застосовуються, як правило, в телевізійних пристроях.

Спрощену схему електронно-променевої трубки наведено на рис. 2. На ньому дано і найпростішу схему керування електронним пучком. Основними характеристиками електронно-променевої трубки є чутливість, яка коливається в межах 0,1-1 мм/В; область лінійності; швидкість переміщення світної плями на екрані, при якій ще спостерігається світіння; розміри екрана; прискорювальна напруга; час тривалості післясвітіння.

Трубка являє собою скляну колбу, із якої відкачано повітря до високого вакууму. Усередині неї змонтована електронна гармата і дві пари взаємно перпендикулярних відхиляючих пластин. Внутрішня поверхня передньої стінки колби покрита флуоресціюючою речови-

ною та виконує роль екрану.

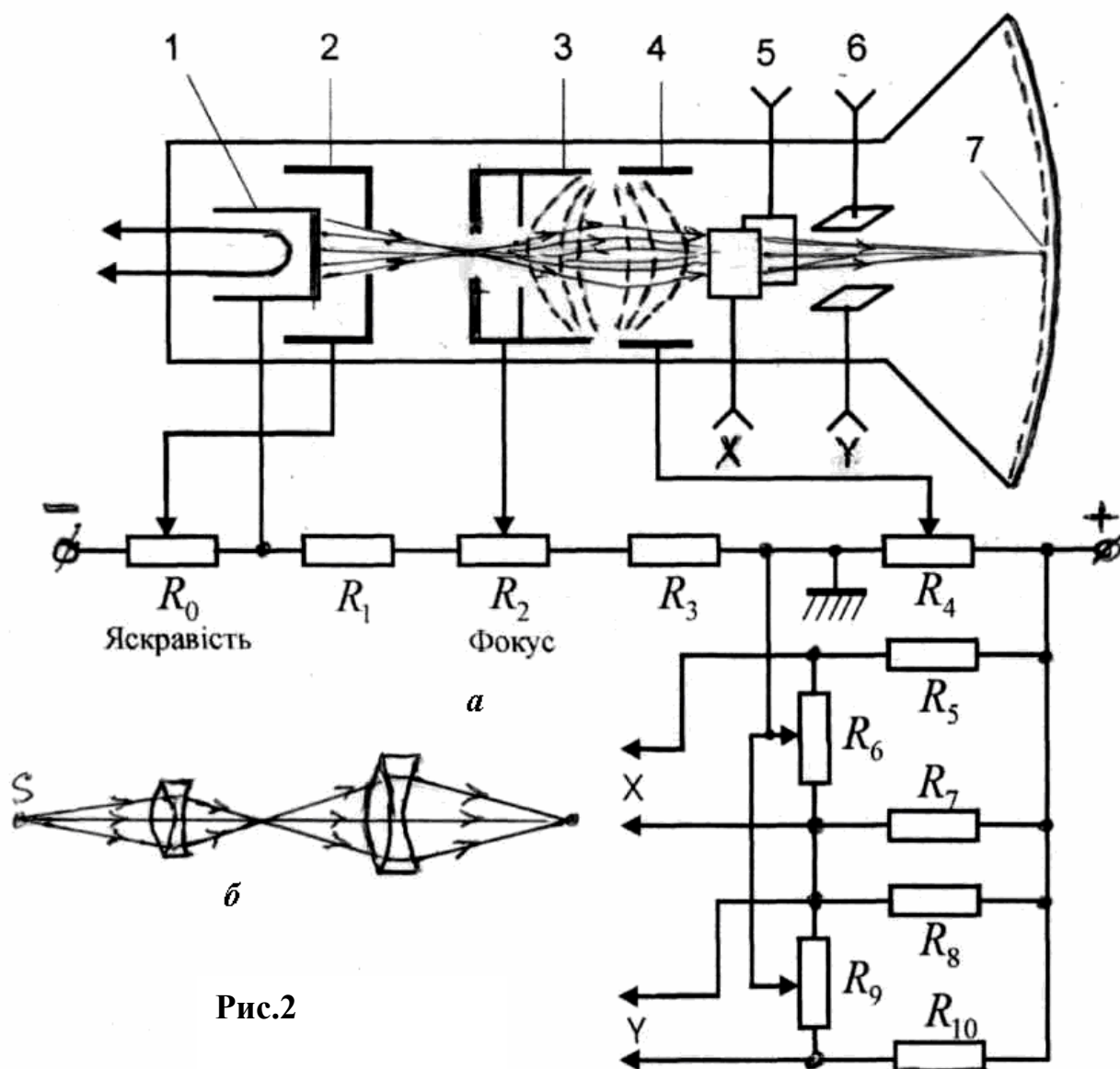


Рис.2

Для випромінювання електронів лише в одному напрямку катод 1 виготовляється у вигляді невеликого металевого циліндра з окремим покриттям із торця. Металевий циліндр, насаджений на фарфорову трубку, всередині якої розміщено підігрівну спіраль. Розігріта спіраль випромінює електрони, внаслідок явища термоелектронної емісії. Напруга, що подається на катод спричиняє рух електронів в певному напрямі. Керування електронним пучком здійснюється подільником напруги, до складу якого входять резистори R_0 , R_1 , R_2 , R_3 ,

R_4 . Керуючий електрод 2 призначений для регулювання кількості електронів в електронному пучку (регулятор яскравості R_0).

Потенціал керуючого електрода негативний відносно катода. Додаткове фокусування (регулятор R_2 – "фокус") електронного пучка і його прискорення здійснюється за допомогою двох циліндричних анодів; першого 3 і другого 4. Підстроювальний резистор R_4 дає змогу встановити потенціал другого анода таким, що дорівнює потенціалу пластин при невідхиленому промені на екрані осцилографа. Другий анод 4 має вищий порівняно з першим потенціал. Внаслідок цього між анодами створюється електричне, фокусуюче для електронів, поле. Повна напруга, яка подається на анод, для звичайних осцилографів коливається в межах 500–5000 В.

Таким чином, фокусування електронного пучка здійснюється електричними полями різної конфігурації, що створюються електродами 3 і 4 у різних місцях трубки. На рис.2 (а) суцільними лініями показані траєкторії електронів, а штрихованими – екіпотенціальні лінії електричного поля, що виникають при подачі напруги на анод трубки.

Дія електричних полів на електронний пучок аналогічна дії оптичних лінз на світловий пучок, тому електронно-оптичній системі гармати можна поставити у відповідність еквівалентну оптичну схему (рис.2 (б)).

Система пар відхиляючих пластин 5 і 6, розташованих взаємно перпендикулярно, призначена для відхилення пучка електронів у вертикальному (6) та горизонтальному (5) напрямках. Зміщення пучка здійснюється подачею на вертикально та горизонтально відхиляючі пластини напруги відповідно від подільників (R_8, R_9, R_{10}) і (R_5, R_6 ,

R_7). Опори R_5 і R_7 дорівнюють один одному, тому при середньому положенні повзунка резистора R_6 (на панелі осцилографа – це регулятор "Зміщення X") потенціал на обох пластинах "X" буде однаковий і промінь не зміщується. При зміщенні повзунка резистора потенціал однієї з пластин зменшується, другої – збільшується на таку саму величину. Між пластинами виникає поле, яке і відхиляє промінь у горизонтальній площині.

Аналогічно відбувається і відхилення променя у вертикальній площині (регулятор R_9 на панелі осцилографа – „Зміщення Y”). Величина зміщення залежить як від значення напруги, прикладеної до пластин, так і від швидкості руху електронів.

Наприклад, якщо одна і з напруг пропорційна змінній величині "X", а друга – величині "Y", то на екрані осцилографа світна пляма описуватиме деяку функцію $f(x, y)$ в прямокутній системі координат. Так, для одержання фігур Ліссажу треба до обох пар пластин підвести синусоїдальні напруги різної частоти.

Екран електронно-променевої трубки 7 являє собою внутрішню поверхню передньої частини трубки, яка покрита тонким шаром люмінофора (наприклад, сульфідом цинку), здатного світитися в точці, в яку попадає пучок електронів.

Чутливість саме електронно-променевої трубки незначна, тому для дослідження слабких сигналів осцилографи мають підсилювачі на входах "X" і "Y". Підсилювачі характеризуються рівномірною частотною характеристикою (тобто незалежністю коефіцієнта підсилення від частоти, широкою смугою пропускання частот – від десятків герц до сотень кілогерц або навіть кількох мегагерц). Коефіцієнт підсилення плавно регулюється за допомогою резистора. Оскільки будь-

який підсилювач має обмежений діапазон частот, то в осцилографах, як правило, передбачається подача сигналу безпосередньо на відхиляючі пластини електронно-променевої трубки (перемикачі Π_1 і Π_2 на рис.1). Вхідні гнізда пластин розташовані на тильній частині кожуха приладу.

Важливим елементом осцилографа є генератор розгортки. Його призначення – забезпечити рівномірну розгортку електронного пучка на екрані електронно-променевої трубки. Як правило, напруга розгортки, яка використовується в осцилографах, змінюється в часі за лінійним законом (в окремих випадках за синусоїдальним). Тому гене-

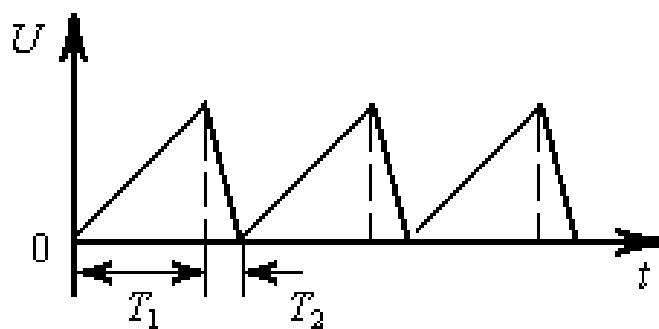


Рис.3.

ратор розгортки забезпечує змінну напругу пилкоподібної форми (рис.3).

Ця напруга характерна тим, що протягом досить великого проміжку часу T_1 зростання напруги пропорційне часу, спад же напруги відбувається за час T_2 ($T_2 \ll T_1$). Тому електронний пучок відхиляється в одному напрямі зліва направо пропорційно часу (прямий або робочий хід). При зворотному ході промінь гаситься і на екрані спостерігається лише прямий хід. Якщо період розгортки великий, то рух світної точки добре помітний на екрані. При малому періоді світний рух дуже часто повторюється, і око людини вже не може розрізнити переміщення променя – на екрані спостерігається неперервна лінія.

Період розгортки можна плавно регулювати ручкою "Частота плавно". Режим роботи встановлюється перемикачем Π_3 "Рід роботи".

Досліджуваний сигнал подається на вертикальні пластини, а на горизонтальні пластини подається пилкоподібна напруга. Якщо частота досліджуваної напруги дорівнює f , а частота напруги розгортки f_0 , то на екрані дістаємо певну криву досліджуваного сигналу. Зображення досліджуваного сигналу на екрані нерухоме тоді, коли частоти досліджуваного сигналу і пилкоподібної напруги кратні одна одній. При невиконанні цієї умови зображення на екрані буде рухомим.

Для узгодження частоти досліджуваного сигналу з частотою генератора розгортки застосовується синхронізація частоти генератора розгортки, яка здійснюється від частоти стабільного джерела напруги. Синхронізація може здійснюватися безпосередньо від напруги мережі, від частоти зовнішнього джерела, від частоти внутрішнього джерела напруги (для цього кожен осцилограф має перемикач $П_4$ "Синхронізація").

Живлення осцилографа здійснюється від спеціального блоку, до складу якого входить цілий ряд пристроїв, що забезпечують нормальну роботу всіх систем.

Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно-променевої трубки

Питомим зарядом електрона називається відношення заряду до його маси e/m . Визначити питомий заряд електрона можна, досліджуючи його рух в поперечних електричному й магнітному полях. Нині відомо багато різних методів вимірювання питомого заряду електрона. Найпростішими є такі, що ґрунтуються на відхиленні пучка електронів у магнітному полі.

У даній роботі відношення e/m визначається методом елект-

ронно-променевої трубки. На рис.4 наведено принципову схему даного методу.

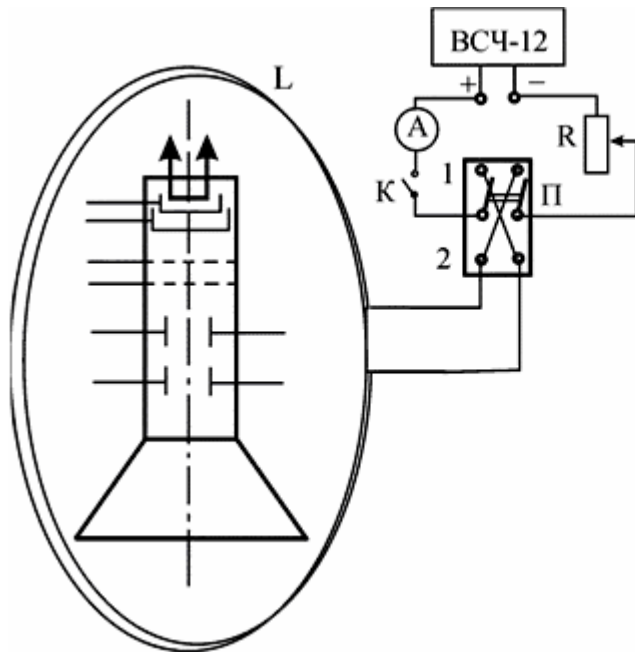


Рис. 4

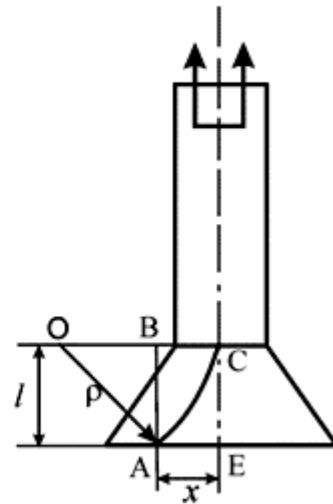


Рис. 5

На електрон, який рухається в однорідному магнітному полі, діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (1)$$

При відсутності магнітного поля в області електронно-променевої трубки, електрони рухаються до екрана прямолінійно. Якщо замкнути вимикач K , то траєкторія руху електронів під впливом магнітного поля котушки L буде вже криволінійною. Індукція магнітного поля в центрі колової котушки, яка складається з n витків.

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{ni}{2R}, \quad (2)$$

де R – радіус витка котушки L ; i – сила струму в котушці; n – кількість витків.

Оскільки роль доцентрової сили тут виконує сила Лоренца, то при взаємно перпендикулярних напрямках швидкості електрона і індукції магнітного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$) маємо:

$$F_{\text{л}} = F_{\text{доц}}; \quad e v B = \frac{m v^2}{\rho}, \quad \text{або} \quad \frac{e}{m} = \frac{v}{\rho B}, \quad (3)$$

де ρ – радіус кривизни траєкторії руху електронів.

Визначивши v^2 із закону збереження енергії для руху електрона всередині трубки (згідно з яким потенціальна енергія електрона $W_n = eU$, якою він володіє біля катоду, повністю переходить в кінетичну енергію $W_k = \frac{m v^2}{2}$, коли він долітає до анода), тобто

$$eU = \frac{m v^2}{2}, \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}, \quad (4)$$

де U – різниця потенціалів між катодом і анодом, та, підставивши в рівняння (3), дістанемо: $\frac{e}{m} = \frac{2U}{\rho^2 B^2}$, або з урахуванням (2)

$$\frac{e}{m} = \frac{8UR^2}{\rho^2 \mu^2 \mu_0^2 i^2 n^2}. \quad (5)$$

Як визначається радіус кривизни траєкторії ρ , видно з рис.5:

$OB = \sqrt{\rho^2 - l^2}$, $OB = \rho - x$. Прирівнявши праві частини, маємо:

$$\rho^2 - x^2 = \rho^2 - 2\rho x + x^2, \quad \rho = \frac{x^2 + l^2}{2x}, \quad \text{де } x - \text{зміщення світної плями на}$$

екрані осцилографа під дією магнітного поля. Підставивши значення ρ в формулу (5), остаточно маємо:

$$\frac{e}{m} = \frac{32UR^2 x^2}{\mu^2 \mu_0^2 i^2 n^2 (x^2 + l^2)}. \quad (6)$$

Хід роботи

Завдання №1. Вивчення роботи електронного осцилографа

1. Навчитись виконувати такі операції:

а) дістати на екрані нерухому світну точку та лінію (нерухому

яскраву світну точку не рекомендується довго тримати на одному місці екрана, оскільки екран може вигоряти);

б) переміщувати точку вертикально, горизонтально, регулювати яскравість точки, фокусувати її;

в) регулювати ступінь підсилення вертикального і горизонтального входів осцилографа.

Завдання №2. Визначення питомого заряду електрона за допомогою електронно - променевої трубки

1. Скласти схему за рис.4.

2. Включити осцилограф. Встановити світну пляму на екрані осцилографа в центрі координатної сітки. Перемикач П поставити в положення "1". Реостат R – на найбільший опір.

3. Замкнути вимикач K та визначити за координатною сіткою екрану осцилографа зміщення „Х” світної плями. Дослід виконати при струмах 3, 4, 5 А, який встановлювати за допомогою реостата R .

4. Розрахунок e/m провести за формулою (6). Напругу на анод електронно-променевої трубки для осцилографів типу ОЕШ (осцилограф електронний шкільний) можна взяти 2000 В, відстань $L = 0,29$ м.

5. Перевести перемикач П в положення „2” і виконати вимірювання, як в п.3.

6. Визначити середнє значення величини e/m та підрахувати абсолютну та відносну похибки (як для непрямих вимірювань). Результати всіх вимірювань та обчислень занести до таблиці, яку скласти самостійно.

Контрольні запитання

1. Який фізичний прилад називають електронним осцилографом?
2. Якими є будова і принцип дії електронно-променевої трубки?
3. У чому полягає принципова відмінність між електронно-променевими трубками з електростатичним та магнітним фокусуванням?
4. Означте основні характеристики електронно-променевої трубки.
5. Назвіть основні блоки осцилографа та їх призначення.
6. Яким є принцип роботи генератора розгортки?
7. Що називають індукцією магнітного поля, в яких одиницях її вимірюють?
8. Чому дорівнює індукція магнітного поля колового лінійного струму в його центрі?
9. Чому дорівнює індукція магнітного поля колового лінійного струму на його вісі?
10. Чому дорівнює індукція магнітного поля на вісі соленоїда?
11. Чому дорівнює робота магнітної складової сили Лоренца з переміщення електричного заряду?
12. Які сили діють на електрон, що рухається в однорідному магнітному полі?
13. Якою буде траєкторія руху електрона, якщо він влітає в однорідне магнітне поле під довільним кутом до ліній індукції цього поля?
14. Якою буде траєкторія руху електрона, якщо він влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярне до ліній індукції цього поля?
15. Що враховують магнітні проникності μ і μ_0 , який їх фізичний зміст?

Лабораторна робота №11
**ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ, ЩО ВИДІЛЯЄТЬСЯ В
КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ І ЗСУВУ ФАЗ МІЖ
СИЛОЮ СТРУМУ І НАПРУГОЮ**

Мета роботи: ознайомлення з методом вимірювання активної потужності і зсуву фаз між силою струму і напругою в різних колах змінного струму.

Прилади і матеріали: 1) вимірювальний комплект К-50, 2) лампа розжарення (300 Вт), 3) лабораторний автотрансформатор (ЛАТР), 4) магазин ємностей, 5) котушка індуктивності (з секціями 1200, 2400 і 3600 витків), 6) з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості

Розглянемо потужність, що виділяється в колі змінного струму. Миттєве значення потужності змінного струму дорівнює добутку миттєвих значень напруги і сили струму:

$$P(t) = U(t) \cdot i(t), \quad (1)$$

де $U(t) = U_m \cos \omega t$, $i(t) = i_m \cos(\omega t - \varphi)$.

У різні моменти часу миттєве значення потужності має різну величину, та за значенням дорівнюватиме нулеві в ті моменти, коли рівні нулю $i(t)$, чи $U(t)$. Тому частіше використовують значення потужності за період. Перетворимо вираз (1) таким чином:

$$P(t) = i_m \cdot U_m \cos(\omega t - \varphi) \cdot \cos \omega t = i_m \cdot U_m (\cos^2 \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cos \omega t \cdot \sin \varphi),$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{\omega T} \int_0^T i_m \cdot U_m (\cos^2 \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cos \omega t \cdot \sin \varphi) d(\omega t).$$

Враховуючи, що за період середні значення $\cos^2 \omega t = \frac{1}{2}$, а $\sin \omega t \cos \omega t = 0$, одержимо:

$$P(t) = \frac{1}{2} i_m \cdot U_m \cos \varphi \quad (2)$$

Введемо позначення:

$$i = \frac{i_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Величини i і U називають *ефективними* або *діючими* значеннями сили струму і напруги, на відміну від амплітудних значень i_m і U_m .

Ефективне значення сили змінного струму дорівнює силі постійного струму, який на даній ділянці кола створює тепловий ефект, що рівний ефекту, що створюється даним змінним струмом. Ефективні (діючі) значення струму і напруги в колі вимірюються амперметрами і вольтметрами.

Враховуючи діючі значення сили змінного струму і напруги, вираз для середньої за період потужності змінного струму можна записати у вигляді:

$$P(t) = i \cdot U \cos \varphi, \quad (4)$$

де множник $\cos \varphi$ називають *коефіцієнтом потужності*.

Розглянемо векторну діаграму для ділянки кола змінного струму, що містить в собі активний, індуктивний і ємнісний опори, (рис.1).

Вздовж осі абсцис відкладемо значення струму i . Оскільки напруга на активному опорі співпадає за фазою зі струмом, то на цій же осі відкладемо й амплітудне значення напруги на активному опорі $U_R = iR$.

Напруга на індуктивному опорі випереджає струм за фазою на кут $\varphi = \frac{\pi}{2}$ — і тому амплітудне значення напруги на індуктивності відкладемо вздовж осі ординат — вгору: $U_L = i \cdot \omega L$. Напруга на ємнісному опорі відстає за фазою від струму на $\varphi = \frac{\pi}{2}$, тому значення цієї

напруги відкладемо вниз на осі ординат: $U_C = \frac{\bar{i}}{\omega C}$.

З векторної діаграми видно, що напруги на індуктивності та на

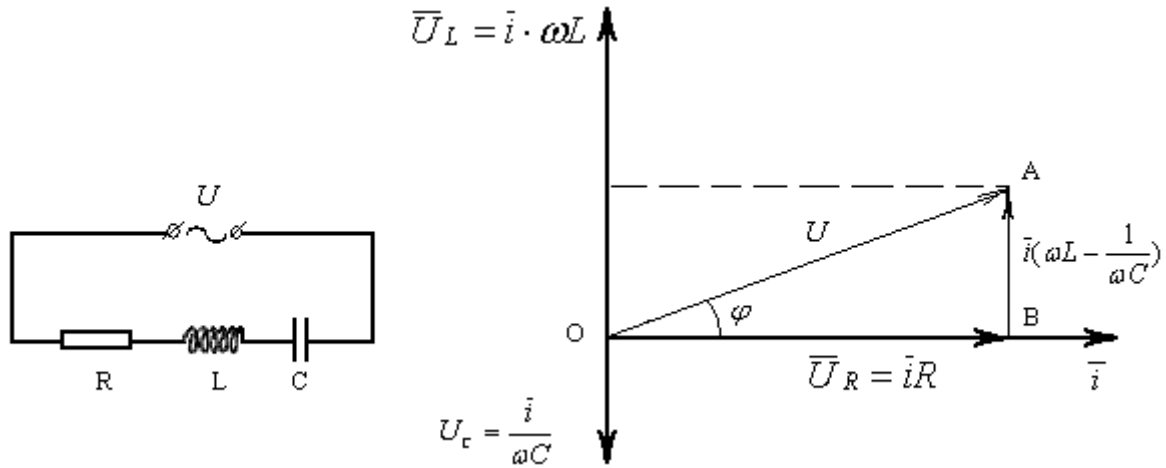


Рис. 1

ємності знаходяться в протифазі. Їх різниця $(i \cdot \omega L - \frac{i}{\omega C})$ дає вектор $\overrightarrow{BA}$. Загальна напруга в колі U визначається вектором $\overrightarrow{OA}$. Кут φ в трикутнику OAB виражає зсув фаз між струмом і напругою в даному колі змінного струму. Формула (2) показує, що потужність, яка виділяється в колі змінного струму, залежить не тільки від сили струму і напруги, а також і від зсуву фаз між ними.

Найбільшого значення потужність досягає при зсуві фаз, рівному нулю ($\varphi = 0$), що має місце при повністю скомпенсованому реактивному опорі ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$, $X_{\text{реак}} = 0$).

Якщо зсув фаз дорівнює $\varphi = \frac{\pi}{2}$, то середнє значення потужності за період виявляється рівним нулю. Це відбувається тому, що енергія, яка постачається джерелом за одну чверть періоду, повертається назад в джерело у другій чверті періоду за рахунок електромагнітної

енергії самоіндукції. Цей випадок має місц тільки за умови рівності нулю активного (омічного) опору кола ($R = 0$), що практично ніколи не виконується.

Якщо $\cos \varphi$ має значення, суттєво менше за одиницю, то для передачі заданої потужності при даній напрузі генератора потрібно збільшувати силу струму, що приведе або до виділення джоулевої теплоти, або потребуватиме збільшення поперечного перерізу провідників.

Тому на практиці завжди намагаються збільшити $\cos \varphi$, найменш допустиме значення якого для промислових установок складає 0,85.

Якщо експериментально визначити P , U , i , то $\cos \varphi$ можна визначити із співвідношення:

$$\cos \varphi = \frac{P}{iU} \quad (5)$$

Знаючи P , U , i , можна обрахувати також повний опір кола:

$$Z = \frac{U}{i} \quad (6)$$

Активний опір визначатиметься як:

$$R = \frac{P}{I^2} = Z \cos \varphi, \quad (7)$$

а реактивний як

$$X = Z \sin \varphi. \quad (8)$$

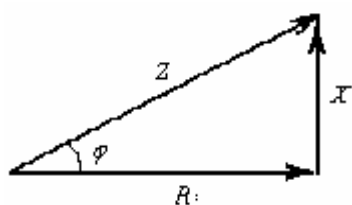


Рис. 2

Активний, реактивний і повний опори у колі змінного струму пов'язані між собою як сторони характеристичного трикутника опорів. Він одержується з трикутника напруг, якщо відповідні напруги розділити на

силу струму i (рис.2).

В роботі використовується вимірювальний комплект К-50, що призначений для вимірювання активної потужності, напруги і струму в колах трифазного струму.

У даній роботі він використовується для аналогічних вимірювань в колах однофазного струму. На рис. 3 представлена електрична схема цього комплекту. Величини i і U вимірюються за допомогою амперметра і вольтметра. Вони проградуйовані за діючим значенням струму і напруги. Середнє значення активної потужності P вимірюється ватметром.

Електродинамічний ватметр складається з двох котушок – нерухомої, котра вмикається послідовно із споживачем електроенергії як амперметр ("струмова") та рухомої, що через додатковий опір вми-

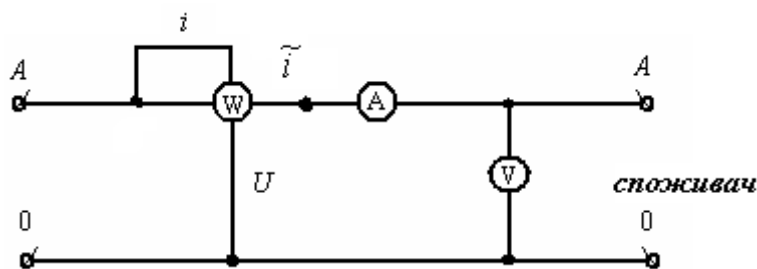


Рис. 3.

кається паралельно споживачу, як вольтметр ("вольтова").

Цими котушками проходять струми: $\tilde{i}$ – струм через струмову котушку та споживач, i –

струм через вольтову котушку, пропорційний напрузі U .

Нехай через споживач тече струм із зсувом фази φ відносно напруги, що подається на нього.

$$U = U_m \sin \omega t, \quad \tilde{i} = \tilde{i}_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Струм у вольтовій котушці, завдяки великому активному додатковому опору, співпадає за фазою з поданою напругою:

$$U = U_m \sin \omega t, \quad i = i_m \sin \omega t = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$$

Миттєвий обертальний момент, що діє на рухому котушку:

$$M = i \cdot \tilde{i} \cos \alpha = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \tilde{i}_m \sin(\omega t + \varphi) \cos \alpha = \\ = \frac{1}{R} U_m \tilde{i}_m \cos \alpha \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_m}{R} \tilde{i}_m \cos \alpha [\cos \varphi - \cos^2(\omega t + \varphi)].$$

Середнє за період значення моменту електродинамічних сил, що діють на рухому котушку

$$\overline{M} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \cdot \frac{U_m}{R} \tilde{i}_m \cos \alpha [\cos \varphi - \cos^2(\omega t + \varphi)] dt, \text{ тоді} \\ \overline{M} \approx U \tilde{i} \cos \varphi \cos \alpha,$$

де α – кут між площиною рухомої котушки та вектором магнітної індукції B , створюваної нерухомою котушкою.

Із умови рівності моментів M і M' (M' – момент сил пружин, що утримують рамку (котушку), $M' = k\alpha$, де k – жорсткість пружини) при рівновазі випливає, що при α , близькому до нуля: $P \cong U \tilde{i} \cos \varphi$

Клеми вольтової і струмової котушки, які потрібно з'єднати разом, позначені зірочкою.

Для навантаження в колі змінного струму пропонується: лампа розжарення (220 В, 300 Вт), котушка індуктивності з осердям, магазин ємностей.

Хід роботи

Завдання 1. Вимірювання активної потужності, що виділяється змінним струмом на різних навантаженнях.

1. Зібрати електричне коло за схемою, зображеною на рис.4, де Z – одне із навантажень, зображених на рис.5.
2. Визначити ціну поділки кожного з приладів.
3. Встановити ЛАТР на мінімальну напругу.

4. Виміри провести для всіх видів навантаження Z , представ-

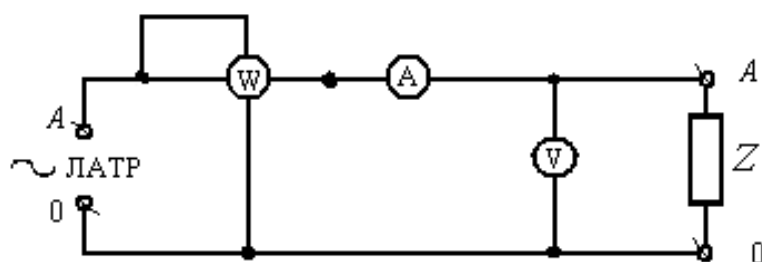


Рис. 4

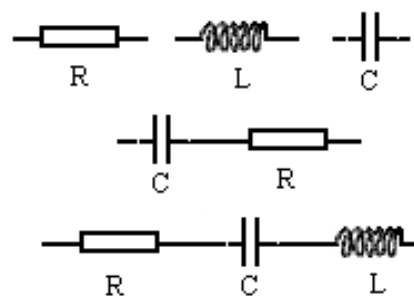


Рис. 5

лених на рис. 5; котушки на 1200 та 2400 витків увімкнути спочатку без осердя, а потім з осердям. У вимірюваннях з ємністю використовуйте магазин ємностей, встановлений на 40 мкФ.

5. Всі навантаження вивчаються при трьох різних значеннях струму. Силу струму змінюють за допомогою ЛАТРа.

6. Знайдіть $\cos \varphi$, активний опір R для всіх випадків за формулами (5) і (7). Результати вимірювань і обчислень (P , U , $\tilde{i}$, $\cos \varphi$) для кожного навантаження внесіть до таблиці 1.

7. Розрахуйте відносну і абсолютну похибку вимірювань для R і $\cos \varphi$. При визначенні абсолютних похибок ΔU , $\Delta \tilde{i}$, ΔP скористайтесь класом точності приладів.

Таблиця 1.

Навантаження	$\tilde{i}$, А	$\Delta \tilde{i}$, А	U , В	ΔU , В	P , Вт	ΔP , Вт	R , Ом	ΔR , Ом	$\cos \varphi$	$\Delta \cos \varphi$

Завдання 2. Знайти повний і реактивний опір кожного з навантажень.

1. Використовуючи формули (6) і (8), знайти повний і реактив-

ний опір для кожного з навантажень. Результати вимірювань і обчислень занести до таблиці 2.

2. Розрахувати відносну і абсолютну похибку вимірювання Z і X .

Таблиця 2.

Навантаження	$\sin \varphi$	$\Delta \sin \varphi$	Z , Ом	ΔZ , Ом	X , Ом	ΔX , Ом

Контрольні запитання

1. Що розуміють під змінним електричним струмом?
2. Зобразити ділянку електричного кола змінного струму, який має омичний опір, індуктивність та ємність, означити ці фізичні величини, вказати відповідні одиниці вимірювання.
3. Який опір провідника називають активним, індуктивним, ємнісним, як їх зображають в колах змінного струму, як розраховують, пояснити механізм їх виникнення, в яких одиницях вони вимірюються та яким типам навантажень відповідають?
4. Який опір провідника називають реактивним?
5. Чому дорівнює загальний опір ділянки змінного струму, що містить послідовно з'єднані активний, індуктивний та ємнісний опори?
6. Чи буде витрачатись енергія змінного струму в колі, що містить тільки реактивний опір?
7. Що називають ефективним значенням струму й напруги в колах змінного струму, з яким із миттєвих значень вказаних характеристик вони пов'язані?
8. Що розуміють під потужністю, що виділяється в колі змінного струму, в яких одиницях вона вимірюється в СІ?
9. Що називають коефіцієнтом потужності?
10. У чому суть методу векторних діаграм для розрахунків параметрів кіл змінного струму.
11. Зобразьте векторні діаграми для ділянок кола, що вивчаються в роботі.
12. Що означає зсув фаз між силою струму відносно діючої напруги?
13. Яке найменше допустиме значення $\cos \varphi$ в промислових установках?
14. Виведіть формулу для визначення середньої за період потужності кола змінного струму.
15. Який принцип дії електродинамічного ватметра?

Лабораторна робота №12
**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ
ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ВІД ОПОРУ НАВАНТАЖЕННЯ**

Мета роботи: дослідити залежність корисної і повної потужності джерела струму від опору навантаження.

Прилади і матеріали: 1) вольтметр типу М-45, 2) міліамперметр типу М-252, 3) магазин опору типу Р-33, 4) ключ, дві акумуляторні батареї, 5) з'єднувальні ізольовані провідники.

Короткі теоретичні відомості

Розглянемо коло постійного струму (рис.1), де ε — ЕРС джерела, r — його внутрішній опір, R — опір зовнішньої частини кола (навантаження). При замиканні ключа K , згідно закону Ома в замкнутому колі маємо:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (1)$$

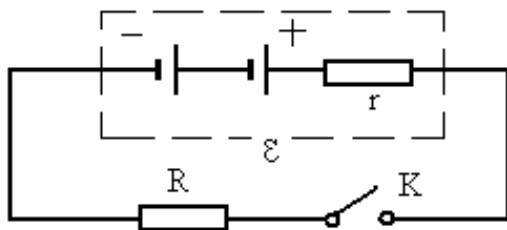


Рис. 1

Потужність, яка витрачається джерелом, частково виділяється на зовнішній частині кола (корисна потужність), і частково на внутрішньому опорі (втрата потужності).

Корисна потужність, яка виділяється на навантаженні R , визначається як:

$$P_k = UI = I^2 R = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} R = \varepsilon^2 \frac{R}{(R + r)^2} . \quad (2)$$

Нехай ми хочемо одержати в зовнішній частині кола максимальну потужність $P_{\max}$, яка можлива при даному джерелі, і для цього змінюємо зовнішній опір R . Значення $R = R_m$, яке відповідає максимальній потужності, одержимо, якщо продиференціюємо вираз P_k за R і прирівняємо першу похідну до нуля (дослідження функції на екстремум). Це дає:

$$\frac{\partial P_k}{\partial R} = \varepsilon^2 \frac{r^2 - R_m^2}{(r + R)^4} = 0 \quad (3)$$

звідки, враховуючи, що r і R завжди додатні, одержимо:

$$R_m = r \quad (4)$$

Отже потужність, яка виділяється на зовнішній частині кола (корисна потужність), досягає найбільшого свого значення, якщо опір зовнішньої частини кола рівний внутрішньому опорі джерела. При цьому струм в колі дорівнює половині струму короткого замикання

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{2r}, \quad (5)$$

а найбільш можливе значення потужності джерела:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4r}. \quad (6)$$

При практичному використанні джерел струму важлива не тільки потужність, але і їх коефіцієнт корисної дії (к.к.д). Коли джерело працює на зовнішнє коло, то струм протікає також всередині джерела, а тому деяка потужність витрачається на виділення теплоти всередині джерела. Ця потужність має чисельне значення:

$$P_i = I^2 r, \quad (7)$$

тоді повна потужність джерела:

$$P = I^2 R + I^2 r = I^2 (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} (R + r) = \frac{\varepsilon^2}{R + r}; \quad P = \varepsilon I. \quad (8)$$

Тому ККД джерела (η) дорівнює:

$$\eta = \frac{P_k}{P} = \frac{U}{\varepsilon} \quad (9)$$

Оскільки завжди $U \leq \varepsilon$ то і $\eta < 1$. Розглянемо більш детально як залежить P і η від струму I , що відбирається від джерела. Корисну потужність P_k можна представити в такому вигляді:

$$P_k = P - P_i = I\varepsilon - I^2 r \quad (10)$$

Потужність у зовнішній частині кола P_k змінюється із зміною струму i за параболічним законом; P_k має нульове значення якщо:

$$I(\varepsilon - rI) = 0. \quad (11)$$

Це дає два значення струму: $I_1 = 0$ та $I_2 = \frac{\varepsilon}{r}$. Перший розв'язок відповідає розімкнутому колу ($R \gg r$), а другий – короткому замиканню ($R \ll r$).

Залежність ККД від сили струму виражається залежністю:

$$\eta = \frac{P_k}{P} = \frac{I\varepsilon - I^2 r}{I\varepsilon} = 1 - \frac{Ir}{\varepsilon}. \quad (12)$$

ККД досягає найбільшого значення ($\eta = 1$) у випадку розімкнутого кола, а потім зменшується за лінійним законом, перетворюючись

в нуль при короткому замиканні.

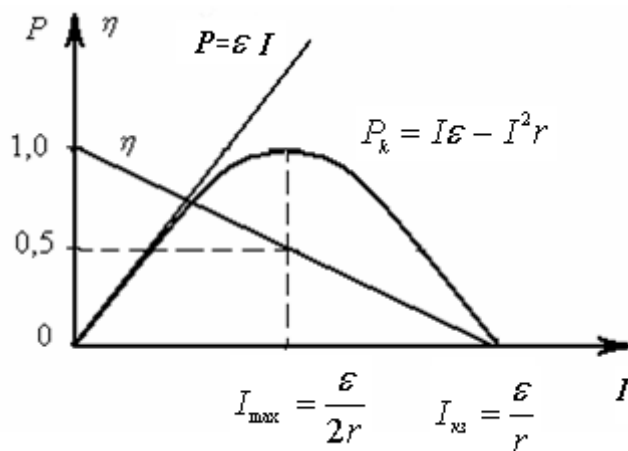


Рис. 2.

Залежність P , P_k і η від сили струму i зображена графічно на рис.2. Як бачимо, умови одержання найбільшої корисної потужності P_k і найбільшого ККД η несумісні.

Коли P_k досягає найбільшого

значення, сила струму рівна $\frac{\varepsilon}{2r}$, а ККД $\eta = \frac{1}{2}$, або 50%. Коли ж η близький до одиниці, корисна потужність мала порівняно з максимальною потужністю $(P_k)_{\max}$, яку б могло розвинути дане джерело.

У силових електричних установках важливою вимогою є оде-

ржання високого ККД. А для цього повинно бути:

$$\frac{Ir}{\varepsilon} = \frac{Ir}{(R+r)I} = \frac{r}{R+r} \ll 1, \quad (13)$$

тобто внутрішній опір r джерела повинен бути малим порівняно з опором R навантаження. При цьому потужність P_i , що виділятиметься всередині джерела, буде малою порівняно з корисною потужністю P_k на навантаженні.

Як видно з формул (2) і (8), корисна і повна потужності, що виділяються в колі, залежать від струму, який у свою чергу залежить від зовнішнього опору R .

Знаючи е.р.с. джерела ε , силу струму в колі i та напругу на зовнішньому опорі R , можна, змінюючи R , знайти залежності $P_k = f(R)$ і $P = f(R)$.

Хід роботи

1. Для одержання експериментальних кривих $P_k = f(R)$ і $P = f(R)$ складіть коло за схемою рис.3. У цьому колі за джерело е.р.с. беруть в одному випадку два лужні акумулятори, з'єднані послідовно (завдання №1), а в другому – сполучені паралельно (завдання №2).

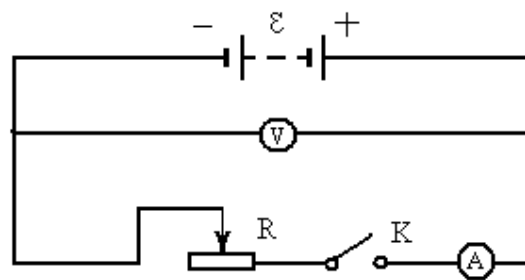


Рис.3

2. Змінюючи зовнішній опір R (магазин опорів), потрібно вибрати таке R , щоб одержати не менше двадцяти значень сили струму. Вимірювання поблизу максимуму потужності $(P_k)_{max}$ проводяться частіше, ніж далеко від нього.

Завдання №1. Дослідити залежність повної і корисної потуж-

ності від навантаження R (тобто від зовнішнього опору) для двох джерел, сполучених послідовно. Результати вимірювань і обрахунків запишіть в таблицю.

ε , В	R , Ом	i , А	U , В	$P = i\varepsilon$, Вт	$P_k = Ui$, Вт	η

Побудуйте графік залежностей $P_k = f(R)$, $P = f(R)$ і $\eta = f(R)$.

Завдання 2. Проведіть ті ж самі вимірювання і обрахунки для кола з попередніми джерелами, але з'єднаними паралельно.

Результати вимірювань занесіть в таблицю, аналогічну попередній. Побудуйте графіки залежностей $P_k = f(R)$, $P = f(R)$ і $\eta = f(R)$.

Контрольні запитання

1. Запишіть та сформулюйте закон Ома для повного кола.
2. Запишіть та сформулюйте правила Кірхгофа.
3. Як знайти опір ділянки кола постійного струму при паралельному та послідовному з'єднаннях провідників?
4. Які одиниці вимірювання опору та питомого опору провідника?
5. Що розуміють під повною та корисною потужністю в електричному колі?
6. Виведіть умову максимуму корисної потужності.
7. Як пов'язані між собою максимальні, повна і корисна потужності для даного джерела струму?
8. Який ККД кола при максимальній корисній потужності?
9. Яке значення має сила струму при максимальній корисній потужності?

10. Як обрахувати е.р.с. і внутрішній опір батареї з двох однакових джерел, сполучених послідовно?
11. Як обрахувати е.р.с. і внутрішній опір батареї з двох однакових джерел, сполучених паралельно?
12. Чому при зміні зовнішнього опору R (магазину опорів) змінюється сила струму в колі?
13. Як залежить P і η від сили струму I , що відбирається від джерела?
14. Наскільки побудовані Вами графіки залежностей $P_k = f(R)$, $P = f(R)$ і $\eta = f(R)$ співпадають з теоретичними (рис.2).
15. Користуючись результатами вимірювань, проведених при виконанні даної роботи, знайдіть внутрішні опори джерел струму, вважаючи їх однаковими.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ МІСТКА ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: ознайомитись із принципом роботи місткової схеми Уїтстона; використовуючи місток змінного струму навчитись знаходити невідомі електроємності та перевірити закони послідовного і паралельного сполучень конденсаторів.

Прилади і матеріали: 1) магазин ємностей Р-513, 2) осцилограф Н3013, 3) вольтметр, 4) понижувальний трансформатор, 5) реохорд, 5) реостат, 6) вимикач, 7) конденсатори невідомої ємності, 8) з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Електрична ємність відокремленого провідника чисельно дорівнює величині заряду, який необхідно надати провіднику, щоб збільшити його потенціал на одиницю: $C = \frac{\Delta Q}{\Delta \varphi}$. Електроємність відокремленого провідника залежить від його геометричних розмірів, форми, діелектричної проникності середовища.

За одиницю електроємності в системі СІ приймається фарада (Ф), тобто електроємність такого провідника, в якому заряд в 1 Кл змінює його потенціал на 1 В.

Пристрої, що мають завдяки спеціальному розташуванню і формі провідників велику ємність при достатньо малих розмірах, називаються конденсаторами. Простим є плоский конденсатор, що складається з двох пластин провідника, розділених шаром діелектрика. Як діелектрик використовуються повітря, парафіновий папір, слюда та ін. За цією ознакою конденсатори називають повітряними, паперовими, слюдяними тощо. Конденсатори можуть мати досить різну форму: плоску, циліндричну, сферичну. За величиною електроємності конденсатори виготовляються сталої або змінної ємності.

Електрична ємність конденсатора визначається відношенням заряду однієї із його обкладинок до різниці потенціалів між ними:

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

Для забезпечення необхідної електроємності конденсатори з'єднуються в групи паралельно, або послідовно. Результуюча ємність знаходиться за законами:

$$C_{\text{парал}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2)$$

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (3)$$

Місток Уїтстона. Для вимірювання опорів провідників широкого застосування набули методи, в основу яких покладена схема, яка називається місток Уїтстона (рис.1) – схема, що складається з чотирьох резисторів. У діагональ моста АС вмикається джерело струму ε , а в діагональ моста ВD – чутливий гальванометр.

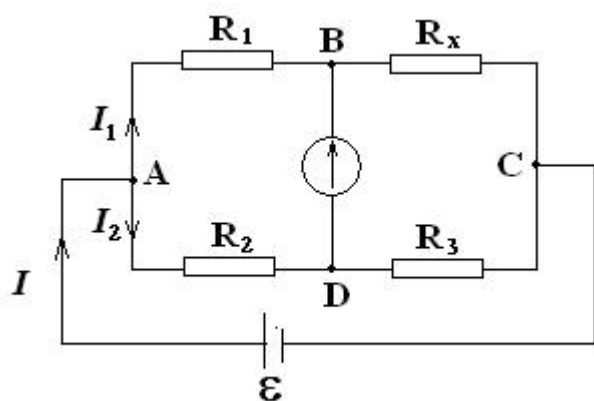


Рис.1.

При вимірюванні опору R_x , опори R_1 , R_2 , R_3 підбирають так, щоб струм через гальванометр дорівнював нулю. Тоді через провідники R_x і R_3 проходять відповідно струми I_x і I_2 . На основі другого правила Кірхгофа для контурів ABDA і BCDB можна записати рівняння:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0;$$

$$I_1 R_x - I_2 R_3 = 0.$$

Звідки дістаємо

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3} \Rightarrow R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (4)$$

Визначення електроємності конденсатора за допомогою містка Уітсона. Для визначення ємності конденсатора може бути використана схема містка змінного струму (рис.2). Джерелом змінної напруги може бути понижувальний трансформатор або звуковий генератор.

Падіння потенціалів на ділянках АБ і БВ відбувається головним чином між обкладками конденсаторів C_x і C_0 . Якщо потенціали точок Б і Д однакові, то нехтуючи впливом сполучних дротів і позначивши різницю потенціалів на ділянці АБ через U_1 і на ділянці БВ через U_2 , із формули (1) можна отримати:

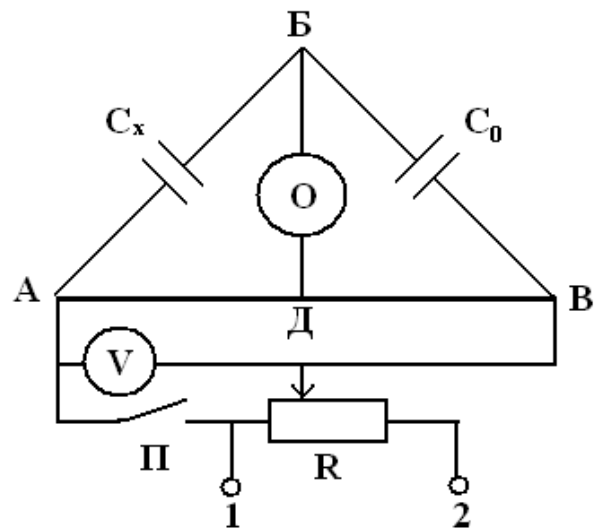


Рис. 2

$$C_x U_1 = C_0 U_2, \quad (5)$$

оскільки кількості електрики Q повинні бути рівними на кожному з конденсаторів при їх послідовному з'єднанні.

З рівності (5) маємо:

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{U_2}{U_1} \quad (6)$$

З іншої сторони, якщо точки Б і Д мають однакові потенціали, ті ж самі різниці потенціалів U_1 і U_2 повинні бути на ділянках АД і ДВ. Тоді їх відношення пропорційне відношенню опорів цих ділянок r_1 та r_2 :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

З формул (6) і (7) маємо $\frac{C_x}{C_0} = \frac{r_2}{r_1}$. Якщо вся довжина дроту має однаковий переріз, то відношення опорів можна замінити відношенням довжин відповідних плечей реохорда l_2/l_1 . Тоді остаточно маємо:

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{l_2}{l_1} \Rightarrow C_x = C_0 \frac{l_2}{l_1} \quad (8)$$

У даній роботі як індикатор встановлення рівності потенціалів точок Б і Д використовується електронно-променева трубка осцилографа (О).

Хід роботи

1. Зберіть схему, відповідно рис.2. Точки Б і Д схеми з'єднайте з входом «Х» або «У» осцилографа. Замість резисторів r_1 та r_2 використовуйте плечі реохорда, у якості конденсатора C_0 – еталонний магазин ємностей Р-513, C_x – досліджуваний конденсатор.

2. Увімкнути осцилограф (тумблер «Мережа»), ручками «Яскравість» і «Фокус» встановити бажану яскравість і розмір. **Потрібно уникати зайвої яскравості, оскільки це приводить до вигорання світлого складу, яким покритий екран.**

3. Подати на клеми 1-2 схеми змінну напругу від вторинної обмотки трансформатора, замкнути вимикач П та реостатом R подати на ділянку АВ змінну напругу (2 – 4 В). Точка (пляма) на екрані повинна розтягнутися в лінію.

4. Регулювання зводиться до переміщення повзунка реохорда і зміни ємності магазину. Рекомендується підбирати ємність в магазині так, щоб повзунок при балансуванні знаходився в середній частині реохорда, тобто щоб $l_2/l_1=1$. Чим краще збалансований міст, тим коротшою стає лінія. Для підвищення чутливості схеми можна скорис-

татися ручкою «Підсилення» на осцилографі.

5. Збалансувавши схему, відповідно до формули (8) розрахувати невідому ємність конденсатора. Балансування мосту для кожної з ємностей проводьте не менше трьох разів.

6. Як досліджувані використати два конденсатори. При виконанні завдання необхідно по чергово під'єднати замість C_x ці конденсатори та розрахувати їхню електроємність.

7. Перевірити закони послідовного та паралельного з'єднання конденсаторів.

8. Обчисліть похибки вимірювань. Усі дані занесіть до таблиці.

Невідомі ємності	№ дос-ліду	Напруга, U , В	Ємність магазину, C_0 , мкФ	l_2/l_1	Значення ємностей окремих вимірювань, C , мкФ	Середнє значення шуканої ємності, C , мкФ	ΔC , мкФ	E , %
C_{x1}	1	2						
	2	3						
	3	4						
C_{x2}	1	2						
	2	3						
	3	4						
C_{x3} , послі-довне з'єднання	1	2						
	2	3						
	3	4						
C_{x4} , пара-лельне з'єднання	1	2						
	2	3						
	3	4						

Контрольні запитання

1. Що називають електричною ємністю відокремленого провідника, в яких одиницях вона вимірюється в СІ?
2. Яке співвідношення між одиницями ємності Ф, мкФ, пФ?
3. Які фізичні пристрої називають конденсаторами?
4. Які види конденсаторів за формою, діелектричним наповнювачем, величиною електроємності Вам відомі?
5. Як визначається електрична ємність конденсатора?
6. Як знаходиться результуюча ємність конденсаторів при послідовному та паралельному їх з'єднаннях в колі змінного струму?

7. Як розподіляються заряди й напруги на конденсаторах при послідовному та паралельному їх з'єднаннях в колі змінного струму?
8. У чому суть методу вимірювання опорів та електроємностей конденсаторів за допомогою місткової схеми?
9. Сформулюйте правила Кірхгофа.
10. Зобразьте електричну схему містка Уїтстона у колі постійного струму.
11. Застосуйте правила Кірхгофа для розрахунку невідомого опору провідника методом містка Уїтстона в колі постійного струму.
12. Зобразьте електричну схему містка Уїтстона у колі змінного струму.
13. Застосуйте загальні правила знаходження результуючої ємності та розподілів зарядів й напруг на конденсаторах в колі містка змінного струму для відшукування невідомої ємності.
14. У чому полягає принципова відмінність місткових схем для вимірювання опорів та ємностей?
15. Виведіть робочі розрахункові формули вимірюваних у роботі фізичних величин, а також формули для обрахунку їх похибок.

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. – К.. Виша школа, 1990.
2. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики. ч.1. – К.: Либідь, 1997.
3. Гершензон Є.М., Малов М.М. Курс общей физики. Электричество и магнетизм. – М.: Просвещение, 1980.
4. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1985.
5. Фізичний практикум. ч.2. Під ред. В.П.Дущенка. – К.: Рад. школа, 1965.
6. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1963.
7. Лабораторный практикум по общей физике/ под ред. Е.М.Гершензона и М.М. Малова. – М.:Просвещение,1985.

Додаток 1. Фундаментальні фізичні сталі

Назва величини	Позначення	Значення величини
Універсальні сталі		
Швидкість світла у вакуумі	c	$299\,692\,458\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$
Магнітна стала	μ_0	$4\pi\cdot 10^{-7}\text{ Гн/м} = 12,566\,370\,614\ldots\cdot 10^{-7}\text{ Гн/м}$
Електрична стала	ε_0	$8,854\,187\,817\ldots\cdot 10^{-12}\text{ Ф}\cdot\text{м}^{-1}$
Гравітаційна стала	G	$(6,672\,59 \pm 0,000\,85)\cdot 10^{-11}\text{ м}^3\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-2}$
Стала Планка	h	$(6,626\,0755 \pm 0,000\,0040)\cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$
Стала Дірака	$\hbar$	$(1,054\,572\,66 \pm 0,000\,000\,63)\cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$
Електромагнітні сталі		
Елементарний заряд	e	$(1,602\,177\,33 \pm 0,000\,000\,49)\cdot 10^{-19}\text{ Кл}$
Магнетон Бора	μ_B	$(9,274\,0154 \pm 0,000\,0031)\cdot 10^{-24}\text{ Дж}\cdot\text{Тл}^{-1}$
Ядерний магнетон	μ_N	$(5,050\,7866 \pm 0,000\,0017)\cdot 10^{-27}\text{ Дж}\cdot\text{Тл}^{-1}$
Атомні сталі		
Стала Рідберга	R_∞	$10\,973\,731,534 \pm 0,013\text{ м}^{-1}$
Борівський радіус	a_0	$(0,529\,177\,249 \pm 0,000\,000\,024)\cdot 10^{-10}\text{ м}$
Електрон		
Маса спокою електрона	m_e	$(9,109\,3897 \pm 0,000\,0054)\cdot 10^{-31}\text{ кг}$
Відношення заряду електрона до його маси	e/m	$(-1,758\,819\,62 \pm 0,000\,000\,53)\cdot 10^{11}\text{ Кл}\cdot\text{кг}^{-1}$
Класичний радіус електрона	r_e	$(2,817\,940\,92 \pm 0,000\,000\,38)\cdot 10^{-15}\text{ м}$
Магнітний момент електрона	μ_e	$(928,477\,01 \pm 0,000\,31)\cdot 10^{-26}\text{ Дж}\cdot\text{Тл}^{-1}$
Протон		
Маса спокою протона	m_p	$(1,672\,6231 \pm 0,000\,0010)\cdot 10^{-27}\text{ кг}$
Нейтрон		
Маса спокою нейтрона	m_n	$(1,674\,9286 \pm 0,000\,0010)\cdot 10^{-27}\text{ кг}$
Фізико-хімічні сталі		
Стала Авогадро	N_A	$(6,022\,1367 \pm 0,000\,0036)\text{ моль}^{-1}$
Стала Фарадея	F	$96\,485,309 \pm 0,029\text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}$
Універсальна (молярна) газова стала	R	$8,314\,510 \pm 0,000\,070\text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$
Стала Больцмана	k	$(1,380\,658 \pm 0,000\,012)\cdot 10^{-23}\text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}$

Додаток 2. Діелектрична проникність речовин

<i>Речовина</i>	ε	<i>Речовина</i>	ε
Вода	81	Слюда	6
Гас	2	Скло	7
Масло трансформаторне	2,2	Фарфор	6
Парафіновий папір	3,7	Ебоніт	2,6
		Парафін	2,0

**Додаток 3. Питомий опір (ρ) і температурний коефіцієнт опору (α)
(при 20 °С)**

Провідник	$\rho \cdot 10^{-9}$, Ом·м	α , K ⁻¹	Провідник	$\rho \cdot 10^{-9}$, Ом·м	α , K ⁻¹
Алюміній	28	0,0038	Мідь	17	0,0043
Вольфрам	55	0,0051	Нікелін	400	0,000017
Вугілля	40	- 0,0008	Ніхром	980	0,00026
Графіт	8000		Ртуть	958	0,0009
Залізо	98	0,0062	Свинець	211	0,0042
Константан	480	0,00002	Сталь	120	0,006

Сазонова Олена Олександрівна

Сальник Ірина Володимирівна

Сірик Едуард Петрович

Ткачук Іван Юрійович

Царенко Олег Миколайович

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

Лабораторний практикум з курсу загальної фізики

Частина 3. Електрика і магнетизм

**СВІДОЦТВО ПРО ВНЕСЕННЯ СУБ'ЄКТА ВИДАВНИЧОЇ
СПРАВИ ДО ДЕРЖАВНОГО РЕЄСТРУ ВИДАВЦІВ, ВИГОТОВНИКІВ І РОЗПОВСЮ-
ДЖУВАЧІВ ВИДАВНИЧОЇ ПРОДУКЦІЇ**

Серія ДК № 1537 від 22.10.2003 р.

Підписано до друку _____ Формат 60х84¹/₁₆. Папір офсет.
Друк різнограф. Ум.др.арк. 4,5 Тираж 100 Зам. № _____

РЕДАКЦІЙНО-ВИДАВНИЧИЙ ВІДДІЛ

*Кіровоградського державного педагогічного
університету імені Володимира Винниченка*

25006, Кіровоград, вул. Шевченка, 1.

Тел.(0522) 24-59-84.

Факс (0522) 248544.

E-mail: mails@kspu.kr.ua