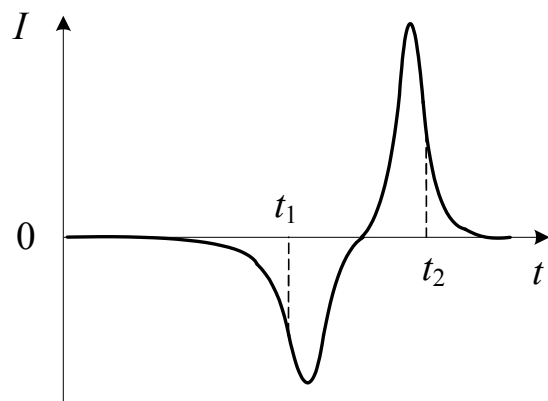
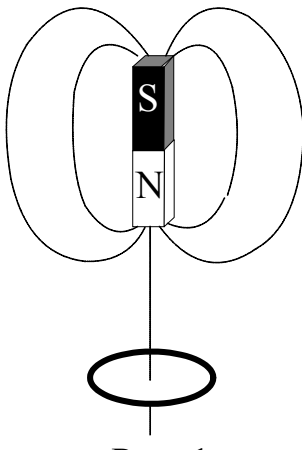


Міністерство освіти і науки України
Криворізький педагогічний інститут
ДВНЗ „Криворізький національний університет”
Фізико-математичний факультет
Кафедра фізики та методики її навчання

В. М. Здещиц, В. П. Ржепецький

ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ



УДК 537.8 (075.3)

Електрика та магнетизм. Лабораторний практикум: методичний посібник для організації самостійної роботи студентів фізичних спеціальностей / укл. В. М. Здешиц, В. П. Ржепецький – Кривий Ріг : ДВНЗ «КНУ» Криворізький педагогічний інститут, 2015. – 88 с.

Укладачі:

Здешиц В. М. – доктор техн. наук, професор кафедри фізики та методики її навчання КПІ ДВНЗ «КНУ»;

Ржепецький В.П. – кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання КПІ ДВНЗ «КНУ».

Рецензент: Мулявко В. І. – доктор техн. наук, професор кафедри фізики ДВНЗ «КНУ».

Затверджено на засіданні кафедри фізики та методики її навчання

Протокол № 7 від 19.02.2015 р.

Рекомендовано до друку

Ученою радою фізико-математичного факультету
Криворізького педагогічного інституту
ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Протокол № 6 від 26.03.2015 р.

УДК 537.8 (075.3)

© КНУ, 2015

Зміст

Загальні методичні рекомендації	4
Осцилографи. Технологія вимірювань	5
Лабораторна робота №1. Вимірювання електричної напруги, сили струму та опору цифровим мультиметром	12
Лабораторна робота №2. Вивчення електростатичного поля методом зондів.....	20
Лабораторна робота №3. Дослідження корисної потужності та ККД джерела струму	23
Лабораторна робота №4. Визначення температури розжарення вольфрамової нитки електричної лампи	29
Лабораторна робота №5. Дослідження трьохелектродної лампи	34
Лабораторна робота №6. Дослідження напівпровідникового діоду.....	38
Лабораторна робота №7. Вимірювання швидкості іонів в електроліті при дії на них електричного та магнітного поля	45
Лабораторна робота №8. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі	51
Лабораторна робота №9. Вивчення петлі магнітного гістерезису феромагнетика з допомогою осцилографа	55
Лабораторна робота №10. Вивчення затухаючих електромагнітних коливань	59
Лабораторна робота №11. Визначення ємності та опору методом порівняння з допомогою неонові лампи	64
Лабораторна робота №12. Перевірка закону Ома для змінного струму	68
Лабораторна робота №13. Вивчення процесів зарядки та розрядки конденсатора	73
Лабораторна робота №14. Дослідження закону індукції Фарадея за допомогою індукційних датчиків	82
Рекомендована література	87

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Метою проведення лабораторних занять є:

- поглиблення теоретичних знань студентів, формування розуміння ролі експерименту у фізичній науці;
- широке й поглиблене знайомство з матеріальними засобами вимірювань у фізиці;
- засвоєння основних принципів і методів вимірювань у фізиці, культури проведення експериментів;
- розвиток спостережливості, конструктивного мислення, активізація самостійності в роботі;
- залучення студентів до самостійної навчально-наукової роботи.

У результаті проведення лабораторних занять студент повинен знати:

- методи емпіричного пізнання об'єктивної дійсності;
- сутність і методи реалізації експерименту;
- фізичні величини, їх класифікацію; одиниці фізичних величин, їх класифікацію;
- основні методи вимірювань у фізиці;
- характер зміни похибок вимірювань і методи їх оцінок;
- основні правила виконання математичних операцій з наближеними числами;
- основні правила графічного подання результатів експерименту;
- вимоги до питань охорони праці й техніки безпеки під час роботи у фізичних лабораторіях вищого навчального закладу та шкільному фізичному кабінеті;
- освітні й виховні завдання лабораторних робіт і фізичних практикумів у середній школі.

Студент повинен уміти:

- провести оцінку і реалізувати оптимальні умови проведення фізичного експерименту, виконання лабораторної роботи;
- забезпечити експериментальний характер шкільного курсу фізики;
- провести аналіз виконання лабораторної роботи, написати висновки про її результати;
- виконати оцінки похибок результатів експерименту;
- графічно подати результати експерименту;
- скласти звіт про виконану лабораторну роботу;
- дати характеристику сучасного фізичного обладнання, фізичних приладів;
- користуватися довідковою літературою;
- забезпечувати виконання завдань лабораторних робіт і фізичних практикумів у школі.

ОСЦИЛОГРАФИ. ТЕХНОЛОГІЯ ВИМІРЮВАНЬ

Для дослідження електричних сигналів в експериментально-дослідницьких роботах використовуються осцилографи. Принцип роботи аналогового осцилографа показаний на рис. 1.1а. Від спеціального генератора на пластини горизонтального відхилення подається напруга розгортки, що змінюється за пилкоподібним законом. По мірі наростання пилкоподібного сигналу промінь на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) переміщується зліва направо, прокреслюючи горизонтальну вісь – вісь часу. У той же самий час на пластини вертикального відхилення діє досліджуваний сигнал, тому траєкторія променя в точності відповідає цьому сигналу.

На рис. 1.1б наведено схематичний малюнок відображення сигналу аналоговим осцилографом, затінене поле означає область малюнка, що відображається на екрані (кадр). Затримка між кадрами складає час зворотного ходу променя й регульовану часову затримку ("стабільність") запуску розгортки для отримання стабільної синхронізації з досліджуваним сигналом. Цей час досить малий у порівнянні з часом розгортки. Тому, якщо сигнал від кадру до кадру змінюється, ця зміна негайно відображається на екрані. Динаміка сигналу як по вертикалі, так і по горизонталі відповідає змінам вхідного сигналу.

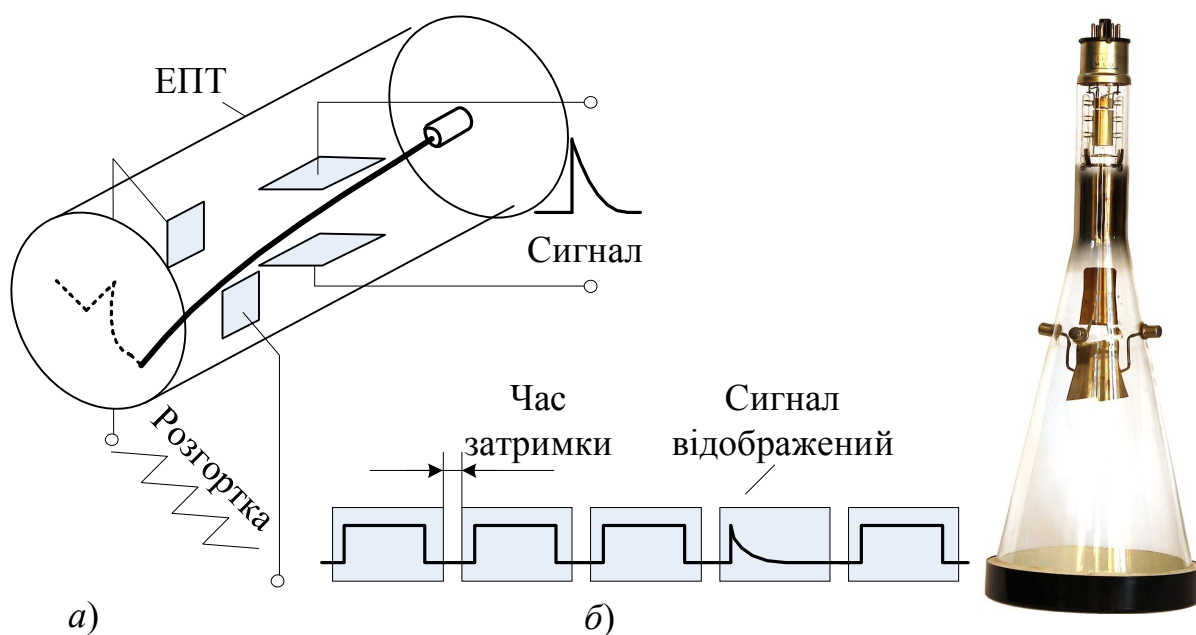


Рис. 1. Принцип роботи аналогового осцилографа

Цифровий осцилограф (рис.1.2) використовує абсолютно інший принцип роботи (рис. 1.3а). Вхідний сигнал, у розмірі вибраного кадру, пройшовши всі вхідні підсилювачі й атенюатори, надходить на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), де перетворюється в цифрову форму й надходить у внутрішню пам'ять для подальшого оброблення (прив'язка до

розгортки, виведення на екран, вимір параметрів та ін.). Час цього оброблення досить великий у порівнянні з часом кадру. Затримка при виведенні на екран є досить великою, частина інформації про зміну сигналу між кадрами втрачається (рис. 1.3б). Це один з головних недоліків усіх цифрових осцилографів. Основний спосіб боротьби з цим недоліком - використання пам'яті більшого обсягу, щоб збільшити розмір "кадру" (рис. 1.3в).

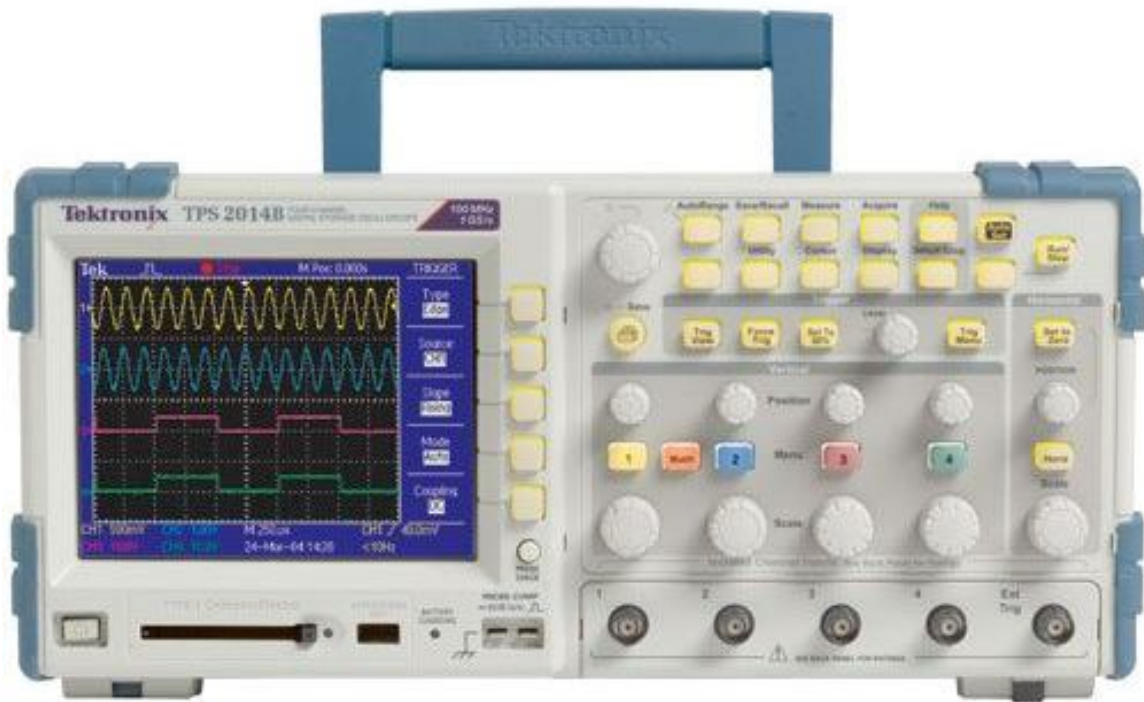


Рис. 1.2. Цифровий осцилограф TPS 2014В

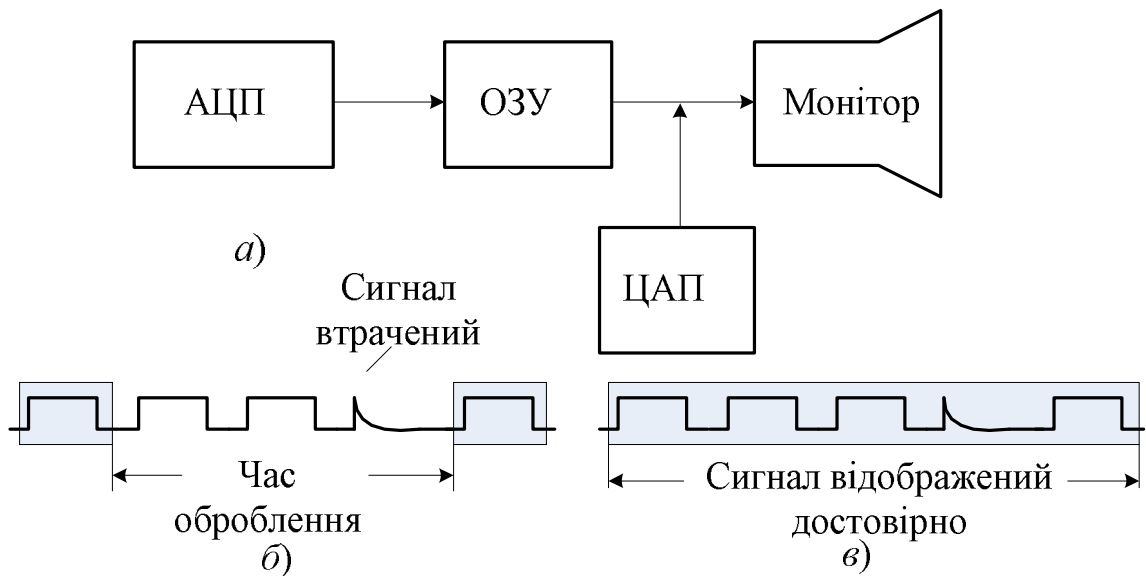


Рис. 1.3. Принцип роботи цифрового осцилографа

До переваг цифрових осцилографів належать легкість з'єднання з обчислювальною технікою, можливість запам'ятовування фрагментів сигналу, різні види автоматичних вимірів (оброблення сигналу, спектральний аналіз, різні перетворення "на льоту").

Основним параметром будь-якого осцилографа є смуга пропускання – частота, при якій амплітуда вхідного сигналу, підтримувана стабільною за рівнем, зменшиться на екрані осцилографа на 3 dB (чи до рівня 0,7 від початкової амплітуди). Інший важливий параметр – розрядність АЦП. Найчастіше в цифрових осцилографах використовуються восьмирозрядні АЦП (256 відліків по амплітуді), що цілком достатньо для дослідження сигналу.

У лабораторній роботі №14 використовується портативний цифровий осцилограф компанії Tektronix TPS-2014B (рис.1.3). Його технічні характеристики, а також характеристики інших осцилографів цієї серії наведено в табл.1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики цифрових осцилографів

Параметр	TPS-2012B	TPS-2014B	TPS-2024B
Кількість ізольованих каналів	2	4	4
Полоса пропускання (МГц)	100	100	200
Частота дискретизації (Гвиб/с) на канал	1,0	1,0	2,0
Довжина запису	2500 точок		
Екран (РК, 1/4 VGA)	Кольоровий		
Робота від акумуляторних батарей	можливість установки двох батарей з можливістю заміни під час роботи; тривалість роботи від однієї батареї – 4 години; тривалість роботи з установленою другою батареєю (опція) – до 8-ми годин;		
Кількість автоматичних вимірювань	11		
Ізольований вхід зовнішнього запуску	є		
Роздільна здатність по вертикалі	8-біт (нормальне чи з усередненням)		
Чутливість по вертикалі	від 2 мВ до 5 В/под у всіх моделях з калібруванням точної настройки		
Похибка вимірювань по вертикалі за постійним струмом	±3%		

Масштабування по вертикалі	вертикальне розширення або стиснення активної чи зупиненої осцилограми
Макс. вхідна напруга (1 МОм)	300 В _{ср.кв.} КАТ. II між сигнальним і опорним контактами вхідного BNC-роз'єму, 1000 В _{ср.кв.} КАТ. II між наконечником пробника та землею приладу з високовольтним пасивним пробником P5120 (опція)
Плаваючий потенціал	600 В _{ср.кв.} КАТ. II або 300 В _{ср.кв.} КАТ. III між опорним контактом BNC-роз'єму і землею приладу, 1200 В _{ср.кв.} КАТ. II між спільними будь-якими двома каналами, при напрузі на кожному з них не більше ± 600 В _{ср.кв.} відносно землі приладу
Діапазон положень	від 2 мВ/под до 200 мВ/под, ± 2 В від 200 мВ/под до 5 В/діл, ± 50 В
Обмеження полоси пропускання	20 МГц
Лінійний динамічний діапазон	± 5 под
Діапазон горизонтальної розгортки	від 5 нс/под до 50 с/под
Похибка горизонтальної розгортки	50×10^{-6}
Вхідний імпеданс	1 МОм ± 2 % при 20 пФ
Тип входу	АС (Змінний струм), DC (Постійний струм), GND (Заземлення)
Масштабування по горизонталі	горизонтальне розширення або стиснення активної чи зупиненої осцилограми
БПФ	Стандартна комплектація
RS-232, паралельні порти Centronics	Стандартна комплектація
Під'єднання до ПК	Стандартна комплектація
Вбудований слот для CompactFlash®	Стандартна комплектація
Вимірювання параметрів систем живлення	пакет для аналізу осцилограм миттєвої потужності, аналізу гармонік, втрат при перемиканні, фазового кута, курсорних вимірювань dU/dt і dI/dt (опція)

Особливостями осцилографа TPS-2014B є чотири повністю ізольовані канали реєстрації, а також ізольований вхід зовнішнього запуску. Восьмигодинна безперервна робота від двох акумуляторних літій-іонних батарей (рис. 1.4) забезпечує практично повну незалежність від мережевого електроживлення.

Одна з найбільш використовуваних функцій цифрового осцилографа – це автоматичні вимірювання, що дозволяє одним осцилографом замінити вольтметр, частотомір і вимірник часових інтервалів. У цьому режимі осцилографи TPS-2014B забезпечують вимірювання 11 параметрів вхідного сигналу (рис.1.5):



Рис. 1.4. Блок живлення осцилографа TPS 2014B

частота, період, час наростання (rise time), час спаду (fall time), шпаруватість імпульсів, тривалість імпульсу (позитивна й негативна: +Width, - Width), максимальне й мінімальне значення амплітуди (V_{max} , V_{min}), розмах від піку до піку ($V_p - p$), середнє значення, середньоквадратичне значення за період та ін.

До осцилографа додається з'єднувальний кабель – пасивний пробник TRP 0201 200 MHz (рис. 1.6), пакет програм, що забезпечують з'єднання з ПК зі встановленою ОС MS

Windows, адаптер змінного струму з шнуром, сертифікат калібрування NIM/NIST.

Інша корисна особливість цього цифрового осцилографа - можливість з'єднання з комп'ютером через інтерфейс RS-232 або USB. Таким чином, надається можливість швидкого документування й аналізу результатів вимірювань за допомогою програмного пакету OpenChoice.

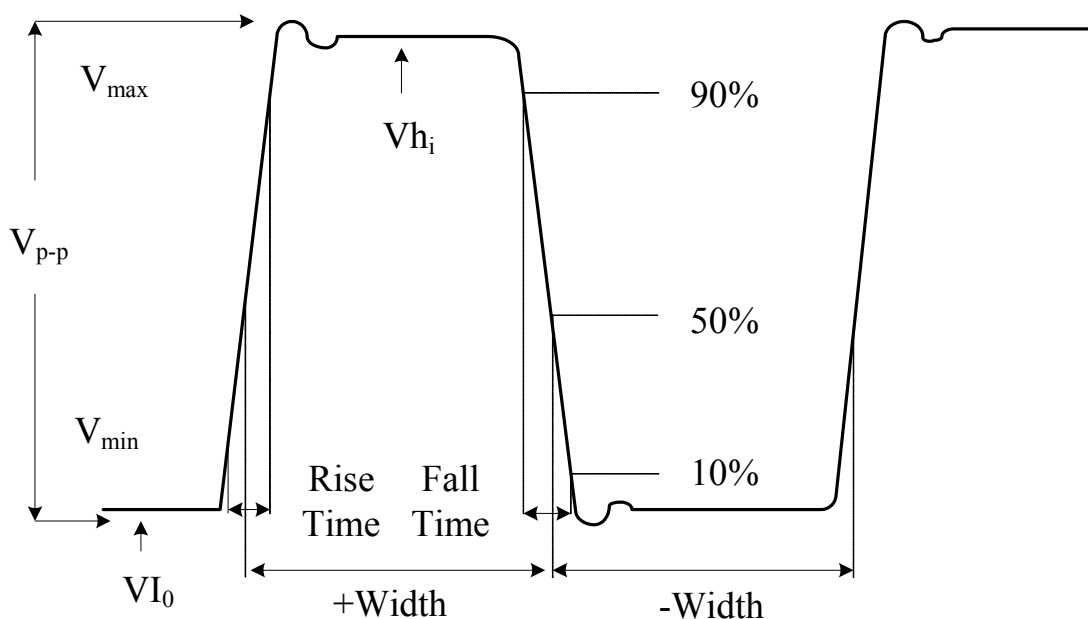


Рис.1.5. Основні параметри періодичного сигналу



Рис.1.6. Пробник

У самому осцилографі передбачено оброблення осцилограм - складання, віднімання, множення. Функція FFT (швидке перетворення Фур'є, БПФ) дозволяє проводити спектральні виміри. На екрані осцилографа (рис.1.7) окрім сигналів, записаних по 4 вимірювальним каналам, наводяться дані про розгортку (250 мкс/діл), чутливість кожного каналу (1 канал - 500 мВ/діл, 2 канал - 1 В/діл, 3, 4 канал - 10 В/діл), поріг запуску (40 мВ), канал, що здійснює запуск (CH1-1 канал), форму запускуючого сигналу, стан осцилографа (stop - запис завершений) і так далі.

На початку роботи необхідно зняти передню захисну кришку, натиснути кнопку мережі, розташовану в лівій нижній частині лицьової панелі осцилографа. Після появи на екрані логотипу Tektronix натиснути кнопку "Ok".

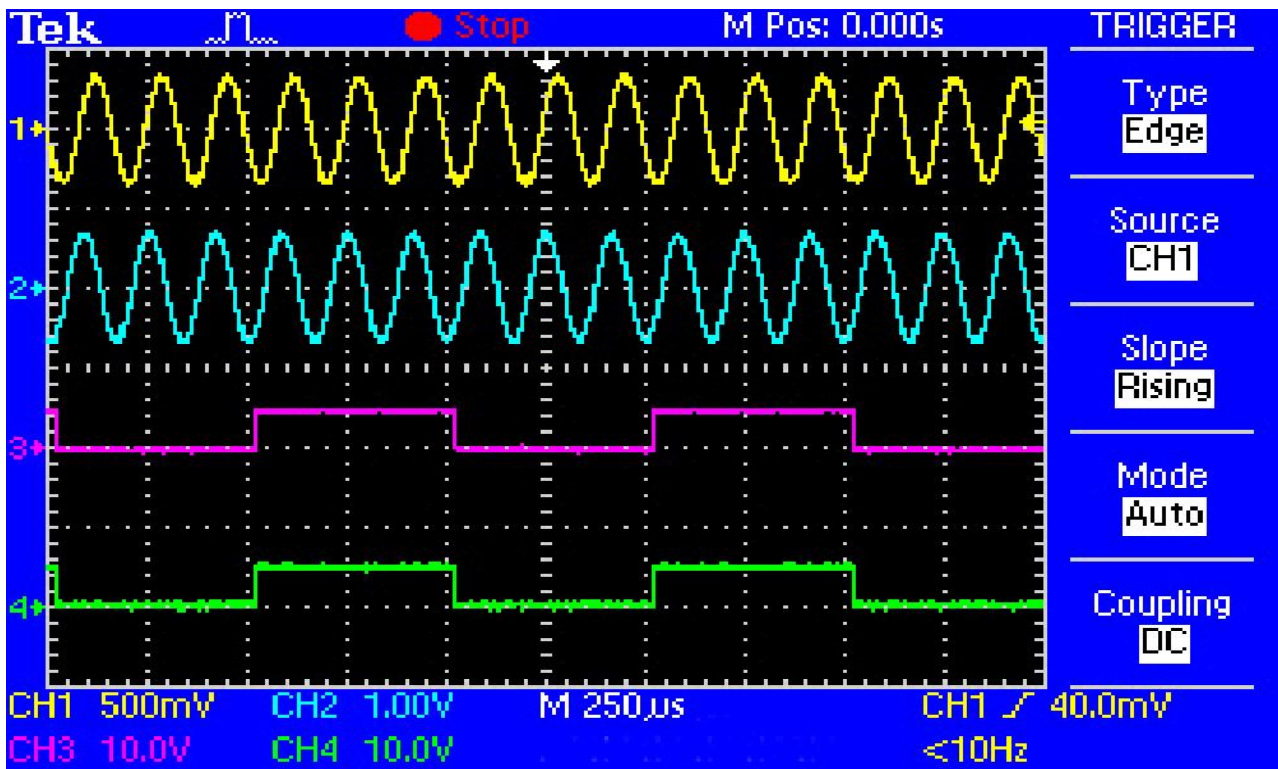


Рис. 1.7. Вигляд екрана цифрового осцилографа

Після завантаження даних натиснути кнопку "Налаштування за замовчуванням" і після появи жовтої нульової лінії натиснути кнопку "Поодинокий імпульс". Під'єднати до роз'єму й каналу пробник та під'єднати його щупи до досліджуваного джерела електричних сигналів. За допомогою

ручки "Масштаб", розташованій у правій нижній частині лицьової панелі осцилографа, встановити величину розгортки, а за допомогою ручки, розташованої над роз'ємом каналу 1, встановити необхідну чутливість по амплітуді досліджуваного сигналу. Початок запису на екрані встановлюється за допомогою ручки "Положення", розташованої у правій середній частині лицьової панелі.

При необхідності запуску при певному рівні сигналу за допомогою ручки "Тригер" встановлюється поріг запуску.

Після реєстрації досліджуваного сигналу, натиснувши кнопку "Курсор", можна вибрати за допомогою кнопки, розташованої з правого боку екрану вгорі, наприклад, опцію вимірювання часового інтервалу (частоти) або амплітуди. Обертаючи ручку, розташовану поряд з цією кнопкою, поєднують перший курсор з першою досліджуваною точкою осцилограми. Викликавши другий курсор натисненням кнопки, розташованої з правого боку екрана внизу, поєднують його за допомогою тієї ж ручки з другою досліджуваною точкою осцилограми. У результаті цих дій на екрані відобразяться значення величини часового інтервалу (частоти), величини напруги тощо.

Для запису осцилограми на вбудовану в осцилограф карту пам'яті необхідно натиснути кнопку "Збереження/Виклик", після чого вибрати опцію "Save waveform" і натиснути кнопку "Збереження". Осцилограма збережеться. Передати її у комп'ютер можна за допомогою програмного пакету OpenChoice, що записаний на диску й поставляється разом з осцилографом.

Лабораторна робота №1

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ, СИЛИ СТРУМУ ТА ОПОРУ ЦИФРОВИМ МУЛЬТИМЕТРОМ

Мета роботи: навчитися користуватися універсальним цифровим мультиметром типу ДТ830В (чи аналогічним) для вимірювання напруг, сил струмів та опорів.

Прилади та матеріали: цифровий мультиметр – універсальний електровимірювальний прилад з цифровою індикацією (ДТ830В або аналогічний), магазин опорів, складальна панель з набором резисторів різних номіналів, вимикачем, з'єднувальними провідниками, двома 3 В джерелами струму, джгутом провідників.

Опис приладу

Універсальний прилад з цифровою індикацією для вимірювання напруги, сили струму та опору ДТ830В (далі – мультиметр – рис. 1 і 2) дає можливість вимірювати напругу постійного струму до 1000 В, напругу змінного струму до 750 В та опір провідників до 2 МОм.



Рис. 1



Рис. 2

Крім того, ним можна перевіряти діоди й визначати коефіцієнт підсилення малопотужних транзисторів. Для підвищення точності вимірювання

мультиметр має декілька меж вимірювання. Вибір виду вимірюваної величини та межі вимірювання здійснюють перемикачем, розташованим у центрі приладу. Позначення різних електричних величин: "V \equiv " – напруга постійного струму; "V \sim " – напруга змінного струму; "A \equiv " – сила постійного струму (силу змінного струму мультиметр не вимірює); " Ω " – електричний опір. Цифри на передній панелі навколо перемикача означають максимальне значення вимірюваної величини у вказаному положенні. Наприклад, "1000 В", "200 мВ", "200 мА", "200 μ А" (200 мкА), "2000 кОм", "200 Ом".

До ділянки електричного кола мультиметр приєднують за допомогою щупів – двох провідників (див. рис. 3) – один чорного кольору, який вставляють у нижнє чорне гніздо, другий червоного кольору, який вставляють у червоне гніздо з написом "V Ω mA" для вимірювання напруги (постійного та змінного струму), опору, сили постійного струму *до 200 мА*. Для вимірювання великих струмів (*до 10 А*) провідник червоного кольору вставляють в окреме червоне гніздо з написом "10A DC".

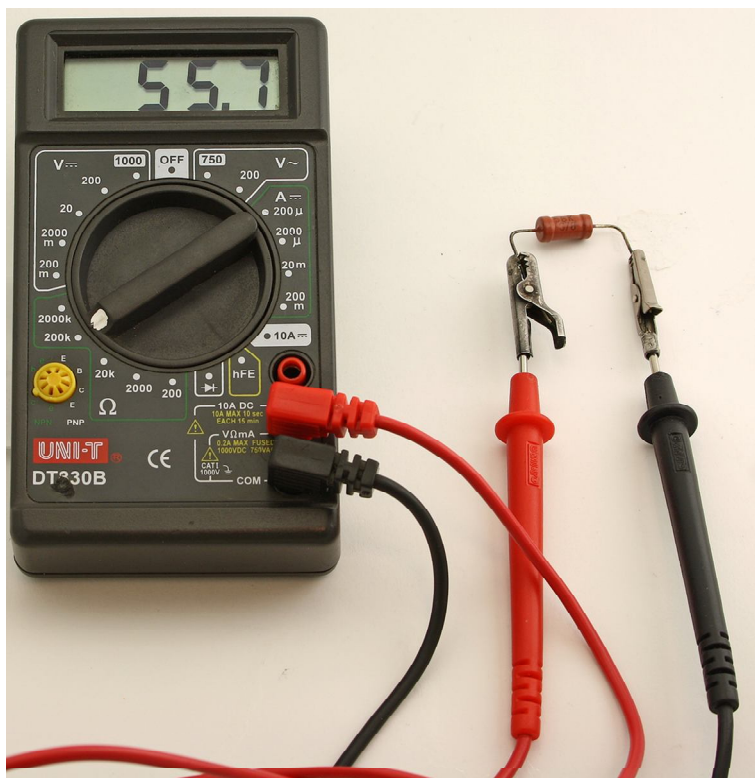


Рис. 3

Якщо мультиметр увімкнено, але не приєднано до ділянки кола, то на цифровому індикаторі висвічуються нулі, якщо перемикач у положеннях "A" чи "V", або висвічується цифра "1", якщо перемикач у положенні " Ω "; цифра "1" з'являється на індикаторі також у випадку, коли значення вимірюваної величини більше установленної межі вимірювання.

Для запобігання пошкодження приладу, вимірювання починають з найбільшої межі вимірювання, переходячи до меншої для підвищення точності вимірювання.

Джерелом живлення мультиметра є батарея типу «Крона». Якщо при переведенні перемикача в одне з робочих положень індикатор не світиться, або на екрані з'являється зображення батареї, то її необхідно замінити. Для заміни батареї треба викрутити два гвинта на задній кришці приладу і відкрити її (рис. 2). Поруч з батареєю знаходиться запобіжник, розрахований на струм 200 мА. Якщо мультиметр не вимірює струм, то найбільш імовірно – згорів запобіжник і його треба замінити. Перед заміною батареї чи запобіжника мультиметр треба вимкнути і від'єднати щупи від електричних кіл.

Абсолютні похибки приладу наведено нижче.

Постійний струм: $\Delta U = 0,5\%$ від $U + 2 D$, $\Delta I = 1\%$ від $I + 2 D$.

Змінний струм: $\Delta U = 1,2\%$ від $U + 10 D$.

Опір: $\Delta R = 0,8\%$ від $R + 2 D$, де D – одиниця найменшого розряду.

Наприклад, при вимірюванні напруги постійного струму покази вольтметра $U = 2,79$ В, межа вимірювання 20 В. Одиниця найменшого розряду 0,01 В. $\Delta U = 0,005 \cdot 2,79$ В + $2 \cdot 0,01$ В = $0,03395$ В $\approx 0,03$ В.

Результат вимірювання слід записати у виді: $U = (2,79 \pm 0,03)$ В.

При вимірюванні опору $R = 8,1$ Ом, межа 200 Ом, одиниця найменшого розряду – 0,1 Ом. $\Delta R = 0,008 \cdot 8,1$ Ом + $2 \cdot 0,1$ Ом = $0,2648$ Ом $\approx 0,3$ Ом.

Результат вимірювання опору: $R = (8,1 \pm 0,3)$ Ом.

Хід роботи

1. Ознайомтесь з мультиметром

1. Уважно вивчіть передню панель мультиметра. При виникненні питань зверніться до опису приладу або до викладача.
2. Увімкніть мультиметр перемикачем, простежте за зміною індикації при переході з однієї межі на іншу.
3. При виконанні всіх подальших завдань виконайте всі необхідні вимірювання, а похибки обчисліть після завершення експериментальної частини.
4. Приєднайте щупи до мультиметра, перемикач поставте в положення Ω 200 (200 Ом) і міцно притисніть кінці щупів один до одного. На індикаторі мультиметра з'явиться якесь число, наприклад, 0,4. Це означає, що опір провідників мультиметра дорівнює 0,4 Ом. Це значення слід віднімати від показів приладу при вимірюванні опору на межі 200 Ом. На інших межах при замиканні щупів повинні з'являтися нулі.

2. Відкалібруйте мультиметр

1. На магазині опорів (рис. 4) установіть перемикачем величину опору 0,5 Ом. На мультиметрі встановіть межу вимірювання 200 Ом; ця межа дає можливість вимірювати малі опори. Приєднайте щупи мультиметра до магазину опорів і запишіть виміряне значення опору в табл. 1. Не забудьте відняти опір провідників, виміряний в п. 4 завдання 1.
2. Розрахуйте абсолютну й відносну похибки вимірювання мультиметром.
3. Запишіть номінальне значення опору магазину та обчисліть допустиму відносну і абсолютну похибки. Згідно з паспортом магазину опорів відносна

похибка встановленого значення опору становить $\pm \left[0,2 + 0,5 \frac{m}{R} \right] \%$ від номінального значення, де m – число декад, R – значення опору в Омах. Для опору 0,5 Ом ця похибка складатиме 1,2 %, для опору 5 Ом – 0,4 %, для опорів у десятки Ом і більше відносну похибку можна вважати наближено рівною 0,2 %.

4. Порівняйте виміряне й номінальне значення між собою. Чи перекриваються інтервали їх значень?



Рис. 4. Магазин опорів

5. Вимірювання й порівняння виконайте для номіналів опорів 5 Ом, 50 Ом, 500 Ом і т. д. для кожної декади магазину опорів. Результати вимірювань і обчислень запишіть в табл. 1.

Таблица 1

Результати вимірювання електричного опору

№	Виміряні значення			Номінальні значення			Перекривання результатів
	R, Ом	ΔR, Ом	E, %	R, Ом	ΔR, Ом	E, %	
1				0,5	0,006	1,2	
2				5	0,02	0,4	
3							
...							
Я				← власний електричний опір			↑(так, ні)↑

3. Виміряйте опір резисторів на складальній панелі

1. Перемикач мультиметра встановіть у положення "Ω 200 ". Приєднайте провідники мультиметра до резистора 100 Ом, що знаходиться на панелі, (див. рис. 5) і визначте значення його опору. Запишіть значення його опору в табл. 1. Розрахуйте абсолютну й відносну похибки вимірювання.

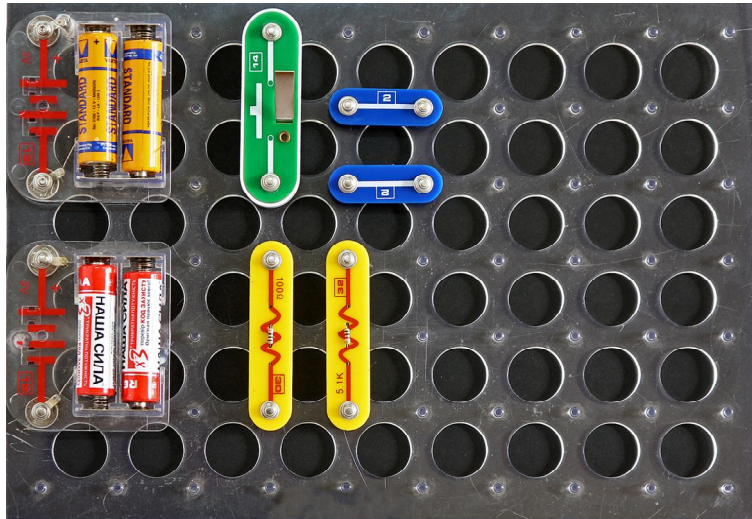


Рис. 5. Фото складальної панелі з елементами електричного кола

2. Запишіть номінальне значення опору. Допустима відносна похибка таких резисторів дорівнює 10 %. Знайдіть номінальну допустиму абсолютну похибку. Порівняйте виміряне й номінальне значення між собою. Чи перекриваються інтервали їх значень?
3. Вимірювання й порівняння виконайте для інших резисторів, що є в наборі на панелі.
4. Складіть електричне коло з двох послідовно з'єднаних резисторів номіналами 100 Ом та 5,1 кОм (рис. 6). Виміряйте загальний опір R та порівняйте з розрахунковою формулою:

$$R = R_1 + R_2 .$$

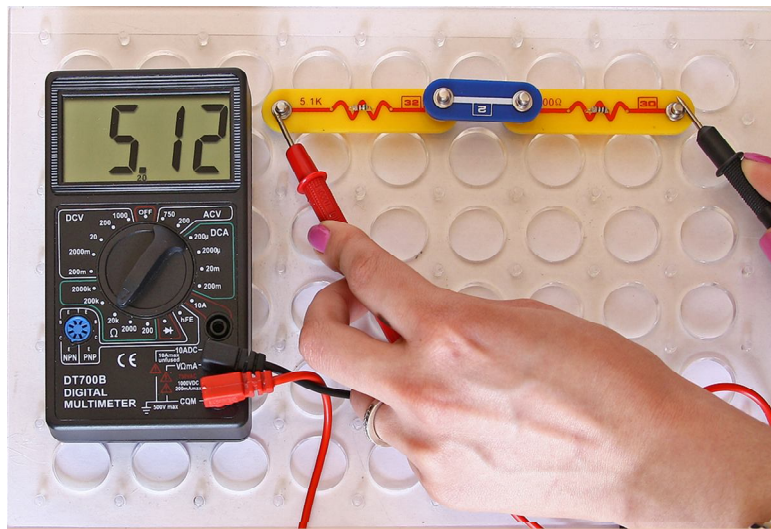


Рис.6. Вимірювання опору послідовно з'єднаних резисторів

5. Складіть електричне коло з двох паралельно з'єднаних резисторів номіналами 100 Ом та 5,1 кОм. Виміряйте загальний опір R та порівняйте його значення з розрахунковою формулою

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

4. Виміряйте свій електричний опір між руками

1. Перемикач мультиметра поставте в положення «2000к», міцно затисніть щупи мультиметра руками, як показано на рис. 7.
2. Значення опору та розрахованих похибок занесіть у табл. 1. Чи сталим є значення виміряного опору? Від чого залежить це значення?



Рис. 7. Вимірювання електричного опору між руками

5. «Продзвоніть» джгут провідників

1. «Продзвонити» провідник означає знайти в пучку переплетених ізольованих провідників кінці одного й того ж провідника.
2. Як перевірити, чи не має провідник обриву під ізоляцією?

6. Виміряйте значення електричної напруги на клеммах джерел струму.

1. Установіть перемикач мультиметра в положення "V $\overline{=}$ 20 В". Приєднайте щупи мультиметра до клем джерела струму: чорний до "-", червоний до "+". Що буде, якщо чорний і червоний провідники поміняти місцями? Запишіть значення напруги на клеммах обох джерел струму в табл. 2.
2. З'єднайте послідовно джерела струму (рис. 8). Виміряйте загальну напругу та перевірте її за рівнянням:

$$U_{заг} = U_I + U_{II}.$$

Запишіть значення напруги на клеммах послідовно з'єднаних джерел струму в табл. 2. Розрахуйте відносну і абсолютну похибки вимірювання.

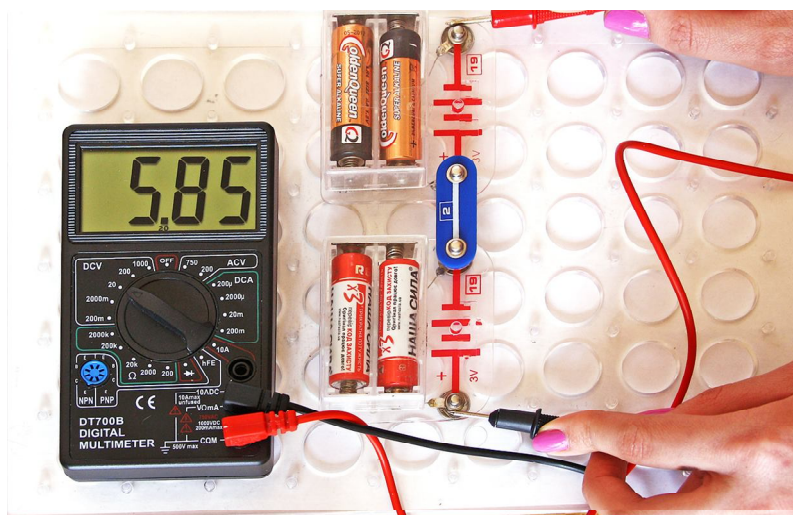


Рис. 8. Вимірювання напруги на клеммах послідовно з'єднаних джерел струму

Таблиця 2

Результати вимірювання електричної напруги джерела струму

Джерело струму	U, V	$\Delta U, V$	$E, \%$
№1			
№2			
№1 + №2			

7. Виміряйте значення сили постійного струму.

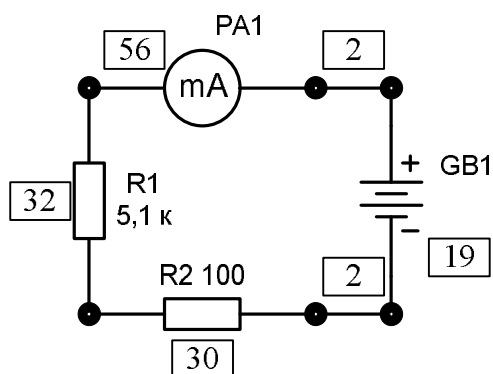


Рис. 9. Схема електричного кола для вимірювання сили струму

1. Складіть електричне коло (рис. 9) з послідовно з'єднаних джерела струму №1, опору $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$, опору $R_2 = 100 \text{ Ом}$ та мультиметра. Перемикач мультиметра встановіть в положення 200 мА.
2. Виміряйте значення сили постійного струму. Порівняйте це значення з величиною

$$I = \frac{U_1}{R_1 + R_2}.$$

3. На місце мультиметра в колі встановіть з'єднувальний провідник (елемент [3]). Виміряйте напругу U_1 на резисторі R_1 та U_2 на резисторі R_2 . Порівняйте суму $U_1 + U_2$ з напругою U_1 на клеммах джерела струму.

8. Виміряйте діюче значення електричної напруги змінного струму

1. Виміряйте діюче значення електричної напруги змінного струму в розетці електромережі. Перемикач мультиметра встановіть у положення "V~ 750". Будьте обережні! Напруга мережі 220 В небезпечна! *Будьте уважні: неправильне положення перемикача може привести до псування приладу.*

2. *Разом з викладачем* декілька разів виміряйте напругу в розетці та запишіть середнє її значення в табл. 3.
3. Розрахуйте відносну й абсолютну похибки вимірювання.

Таблиця 3

Результати вимірювання електричної напруги в розетці електромережі

№	U_D , В	ΔU_D , В	E , %
1			
2			
3			

4. Закінчивши вимірювання, слід обов'язково вимкнути живлення приладу, для чого потрібно поставити перемикач у положення "OFF".
5. Оформіть лабораторну роботу і зробіть висновки. Дайте відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Які фізичні величини та які максимальні значення можна вимірювати використаним цифровим мультиметром?
2. Іноді з'єднувальні провідники ламаються, але ізоляція не дає можливості відрізнити цілий провідник від пошкодженого. Як з допомогою мультиметра знайти пошкоджений провідник?
3. Що таке діючі значення напруги та сили змінного струму? (формули, назви фізичних величин).
4. Що таке клас точності приладу і як за ним розрахувати абсолютну та відносну похибки виміряної величини?
5. У яких випадках краще користуватися мультиметром, а в яких – аналоговими електровимірювальними приладами?
6. У чому полягає принцип дії аналогових електровимірювальних приладів магнітоелектричної системи? Величини якого електричного струму ними вимірюють – постійного чи змінного?
7. У чому полягає принцип дії аналогових електровимірювальних приладів електромагнітної системи? Величини якого електричного струму ними вимірюють – постійного чи змінного?
8. У чому полягає принцип дії цифрових електровимірювальних приладів?

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЗОНДІВ

Мета роботи: вивчити електростатичне поле в найпростішому випадку та зобразити його з допомогою екіпотенціальних поверхонь та силових ліній.

Прилади й матеріали: планшет з поверхнею, покритою графітом, джерело постійної напруги 10-12 В, вольтметр, нуль-гальванометр, зонд, потенціометр опором 100 Ом, резистор 22 кОм, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості.

Електростатичне поле характеризується в кожній точці простору значенням вектора *напруженості* поля \vec{E} та значенням електростатичного *потенціалу* U . Напрямок вектора напруженості поля в кожній точці та розподіл потенціалів у полі можна зробити особливо наочним, якщо скористатись поняттями про силові лінії та про поверхні рівного потенціалу, так звані *еквіпотенціальні поверхні*.

Силовою лінією електростатичного поля називають лінію, у кожній точці якої напрям дотичної співпадає з вектором напруженості поля, тобто, з напрямом сили, що діє на позитивний пробний заряд, розташований у тій же точці поля. Силові лінії завжди перпендикулярні до поверхонь рівного потенціалу. Наприклад, силові лінії перпендикулярні до поверхні провідників, що перебувають в електростатичному полі, оскільки провідники – це тіла з однаковим значенням потенціалу у всьому своєму об'ємі.

Перпендикулярність силових ліній та екіпотенціальних поверхонь суттєво полегшує як експериментальне, так і теоретичне дослідження електростатичного поля. Якщо знайдені значення вектора напруженості поля, то легко знайти поверхні рівного потенціалу. Справедливе й зворотне твердження: знайдені положення поверхонь рівного потенціалу дають можливість побудувати силові лінії поля. Остання можливість якраз і має практичне значення.

Експериментально й теоретично звичайно легше виконувати вимірювання й розрахунок потенціалів електричного поля, ніж його напруженості, хоч можливе безпосереднє вимірювання та розрахунок напруженості поля. Тому в даній роботі експериментально вивчають розподіл потенціалів у полі, а лінії напруженості будують перпендикулярними до знайдених екіпотенціальних поверхонь.

Розподіл потенціалів електростатичного поля досліджують методом зондів. Зміст його полягає в тому, що в досліджувану точку поля вводять спеціальний електрод – зонд, який повинен бути зроблений так, щоб він

якогомога менше порушував своєю присутністю досліджуване поле. Зонд з'єднується провідником з приладом (електрометром), що вимірює потенціал зонда по відношенню до якого-небудь електроду. Проте вимірювання потенціалу електростатичного поля – досить складна експериментальна задача, що вимагає використання примхливої апаратури. Тому в даній роботі вивчення електростатичного поля нерухомих зарядів між системою заряджених провідників замінене вивченням електричного поля постійного струму між тією ж системою провідників. Метод вивчення електростатичного поля шляхом створення іншого еквівалентного йому поля дістав назву *моделювання електростатичного поля*.

Заміна вивчення поля нерухомих зарядів вивченням поля стаціонарного струму має значні експериментальні переваги. Якщо в середовище, що проводить електричний струм, увести металевий електрод, то автоматично вирівнюються потенціали зонда і тієї точки поля, куди введено зонд. Зонд у цьому випадку з'єднують з приладами для вимірювання струму, а не з електростатичною апаратурою.

Схема установки



Рис. 1. Схема установки

На схемі установки G – нуль-гальванометр, $R1$ – резистор опором 22 кОм , R – потенціометр опором 100 Ом . Як вольтметр використовується мультиметр DT830В установлений на межу вимірювання 20 В напруги постійного струму.

Хід роботи.

1. Зберіть електричне коло згідно вищенаведеної схеми на рис. 1. Початкове положення повзунка потенціометра – верхнє (за схемою).
2. У зошиті (на папері в клітинку) намалюйте в масштабі 1:2 планшет з електродами.
3. Після перевірки схеми викладачем увімкніть джерело постійної

напруги (випрямляч ВС 4-12). Перемикач випрямляча поставте в положення 8. Перемикач мультиметра поставте в положення 20 В напруги постійного струму. Мультиметр повинен показати напругу джерела (біля 10 В).

4. За допомогою потенціометра встановіть напругу 2 В.

5. Металевим кінцем зонда доторкніться до графітової поверхні планшету ближче до негативного електроду. Стрілка нуль-гальванометра повинна відхилитись від нульової поділки.

6. Переміщуючи зонд по планшету, стежте за показами гальванометра. Знайдіть точки, у яких покази гальванометра дорівнюють нулеві, і визначте за допомогою лінійок координати цих точок. Рекомендується першу точку шукати в центрі планшету; ще чотири точки - праворуч від центру через кожні 3 см.

Обережно! Стежте за показами нуль-гальванометра. Не допускайте відхилення стрілки за межі шкали! Під час записів вимірювань зонд слід класти на стіл.

7. На рисунку відмітьте положення знайдених точок. Урахуйте симетричність електричного поля: ліворуч від середини можна поставити аналогічні точки. З'єднайте одержані точки плавною кривою. Це буде переріз еквіпотенціальної поверхні з потенціалом 2 В.

8. За допомогою потенціометра встановіть напруги 4 В, 6 В, 8 В, кожного разу повторюючи пункти 5 – 7.

9. Одержавши перерізи еквіпотенціальних поверхонь, побудуйте систему силових ліній поля, перпендикулярних до еквіпотенціалів.

Контрольні запитання

1. Що називають електричним полем? ...електростатичним полем?
2. Сформулюйте й напишіть закон Кулона.
3. Що називають напруженістю електростатичного поля?
4. Що називають силовими лініями електростатичного поля?
5. Чи можуть силові лінії дотикатись одна до одної чи перетинатись?
6. Що називають потенціалом електростатичного поля?
7. Що називають еквіпотенціальними поверхнями електростатичного поля?
8. Чому поверхня металевого електроду є еквіпотенціальною?

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИСНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА К.К.Д. ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Мета роботи: Експериментально дослідити як залежить корисна потужність і коефіцієнт корисної дії джерела струму від опору навантаження.

Прилади й матеріали: Батарея з двох гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА, мультиметр типу DT830В, дослідна установка, що містить додатковий опір, набір резисторів з перемикачем, вимикач.

Теоретичні відомості

Повне коло складається з джерела струму, е.р.с. якого ε і внутрішнього опору r , та зовнішнього опору R . Сила струму I у такому колі визначається законом Ома для повного кола:

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

При проходженні струму частина енергії джерела витрачається в зовнішній ділянці кола, а частина – у внутрішній. Робота струму в зовнішній частині кола дорівнює $I^2 R t$, у внутрішній – $I^2 r t$.

Повна робота струму:

$$A = I^2 R t + I^2 r t. \quad (2)$$

Потужність – це фізична величина, яка дорівнює відношенню роботи до часу:

$$P = \frac{A}{t}.$$

Поділивши (2) на t , одержимо:

$$P = I^2 R + I^2 r = P_k + P_i. \quad (3)$$

Перший доданок $P_k = I^2 R$ визначає потужність струму в зовнішній частині кола, цю потужність називають **корисною потужністю**. Другий доданок $P_i = I^2 r$ – це потужність струму у внутрішній частині кола.

З (1) одержимо:

$$I(R + r) = \mathcal{E}.$$

Тепер (3) можна подати у вигляді:

$$P = I^2(R + r) = I\mathcal{E}. \quad (4)$$

Коефіцієнтом корисної дії (к.к.д.) джерела струму називають відношення корисної потужності до повної:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{I^2 R}{I \cdot \mathcal{E}} = \frac{IR}{\mathcal{E}} = \frac{IR}{I(R + r)} = \frac{R}{R + r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}. \quad (5)$$

Вираз для $P_{\text{кор}}$ перетворимо, використавши (1):

$$P_{\text{кор}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що $P_{\text{кор}}$ дорівнює нулеві у двох випадках: при короткому замиканні ($R = 0$) і при розімкненому колі ($R = \infty$).

Досліджуючи вираз (6) як функцію $f(R)$ на екстремум, можна показати, що корисна потужність має максимум при $R = r$; максимальне значення корисної потужності дорівнює:

$$P_{\text{кор}}^{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}. \quad (7)$$

Згідно з виразом (5), к.к.д. у цьому випадку дорівнює $\eta = 0,5$ або $\eta = 50\%$. У багатьох випадках такий к.к.д. є не вигідним. К.к.д. дорівнює 100%, якщо коло розімкнене ($R = \infty$), але при цьому $P_k = 0$. Таким чином, одержати одночасно й максимальну корисну потужність і максимальний к.к.д. неможливо.

В електроенергетиці намагаються забезпечити високий к.к.д. установок. Для цього потрібно, щоб опір зовнішньої частини кола R був більший від внутрішнього опору r джерела.

Опис схеми для вимірювання

Схема установки зображена на рис. 1. Вона складається з послідовно з'єднаних джерела струму, додаткового опору, магазину опорів та вимикача. Для вимірювання сили струму використано наступний прийом. У коло замість міліамперметра увімкнено опір R , значення якого дорівнює 1 Ом. Якщо паралельно до опору R під'єднати мілівольтметр від мультиметра, то його покази відповідатимуть струму в міліамперах.

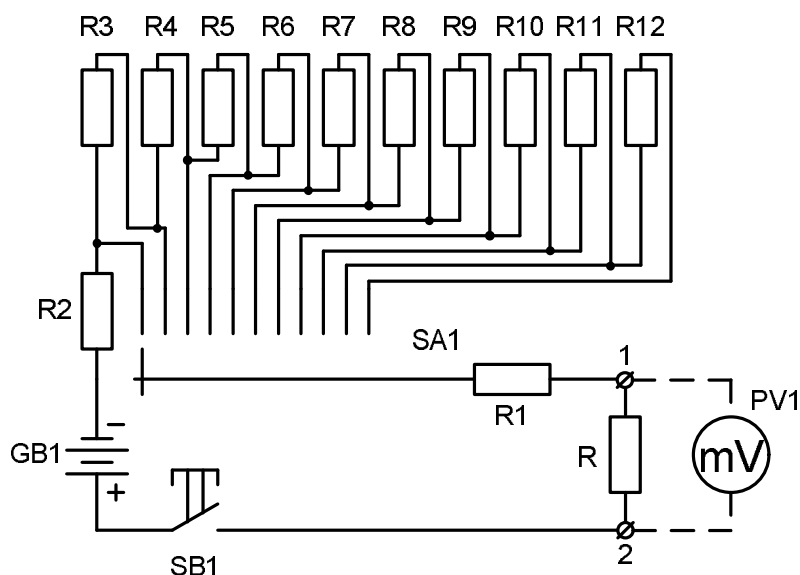


Рис. 1

Як джерело струму використовується батарея з двох з'єднаних послідовно гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА. Гальванічні елементи й акумулятори мають дуже малий внутрішній опір, який можна порівняти з опором з'єднувальних провідників. Оскільки необхідно дослідити роботу джерела струму при опорах навантаження як більших, так і менших внутрішнього опору, то в схему увімкнено додатковий опір $R1$, який штучно збільшує опір акумулятора. Значення опору $R1$ вибране таким чином, щоб сума опорів $R1$ і R становила певне ціле число Ом. У даній установці ця сума дорівнює 20 Ом. Значення опорів $R2 - R12$ підбрані таким чином, щоб при перемиканні $SA1$ одержати навантаження 2, 4, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60 і 80 Ом.

Хід роботи

1. Приєднайте до вимірювальної установки джерело живлення. Вид зверху на установку з приєднаним джерелом живлення подано на рис. 2, фото установки з мультиметром – на рис. 3.
2. Запишіть у робочий зошит значення внутрішнього опору: $r=20$ Ом.

3. Перемикач *SA1* поставте в положення *2 Ом*. До гнізд 1 і 2 (див. рис. 1 і 2) приєднайте мультиметр, перемкнувши його в режим вимірювання напруги постійного струму $V \text{ ---}$ (межа вимірювання – 200 мВ).
4. Натисніть кнопку *SB1* і запишіть значення струму при навантаженні *2 Ом*.

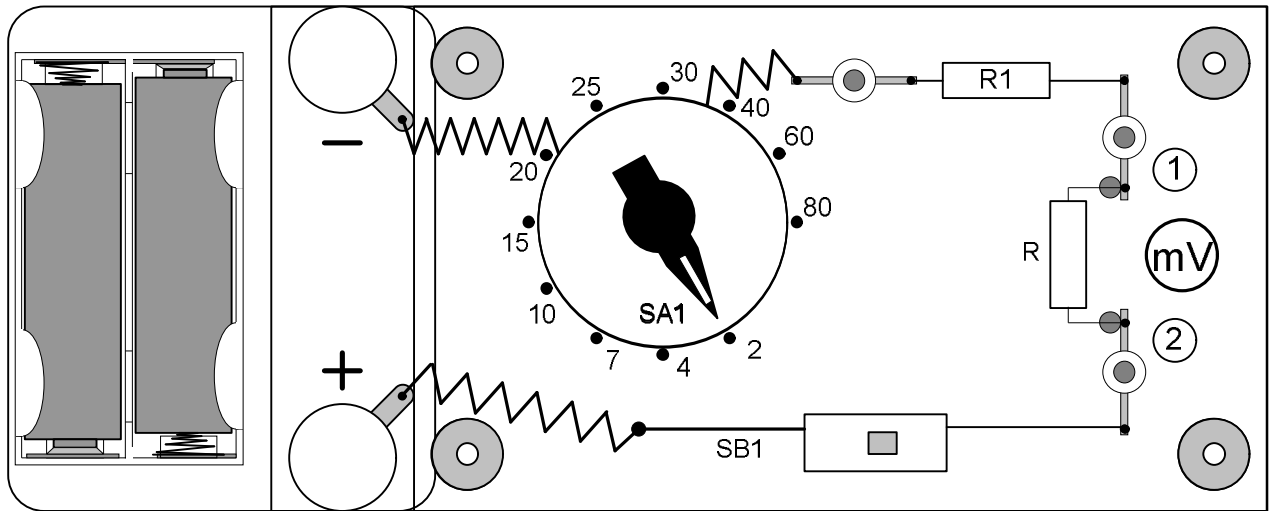


Рис. 2

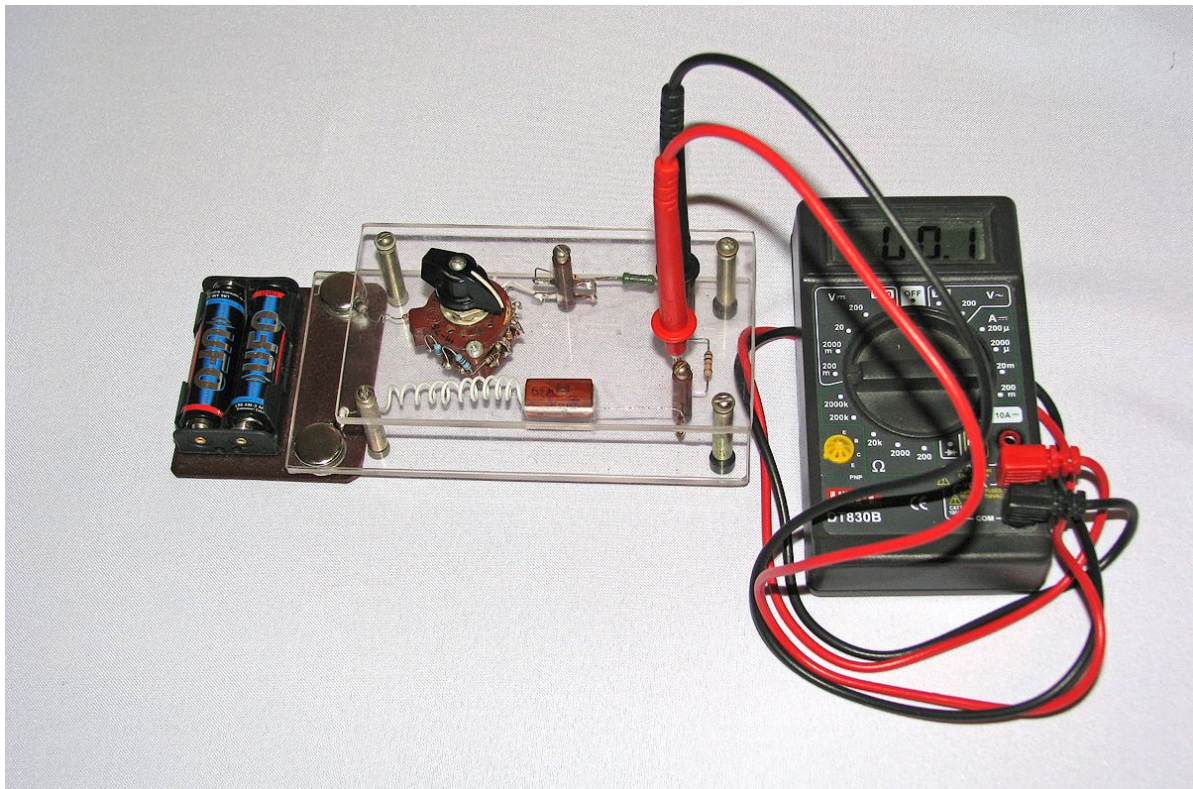


Рис. 3

5. Перемкніть *SA1* у наступне положення (*4 Ом*), знову натисніть *SB1* і запишіть значення сили струму для опору *4 Ом*.
6. Пункт 5 повторіть для всіх положень перемикача *SA1*.

7. Обчисліть для кожного значення опору навантаження R корисну потужність $P_{кор}$ і к.к.д. η :

$$P_{кор} = I^2 R; \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}.$$

8. Побудуйте графіки залежностей $P_{кор}(R)$ і $\eta(R)$. Зробіть висновок.

Контрольні запитання

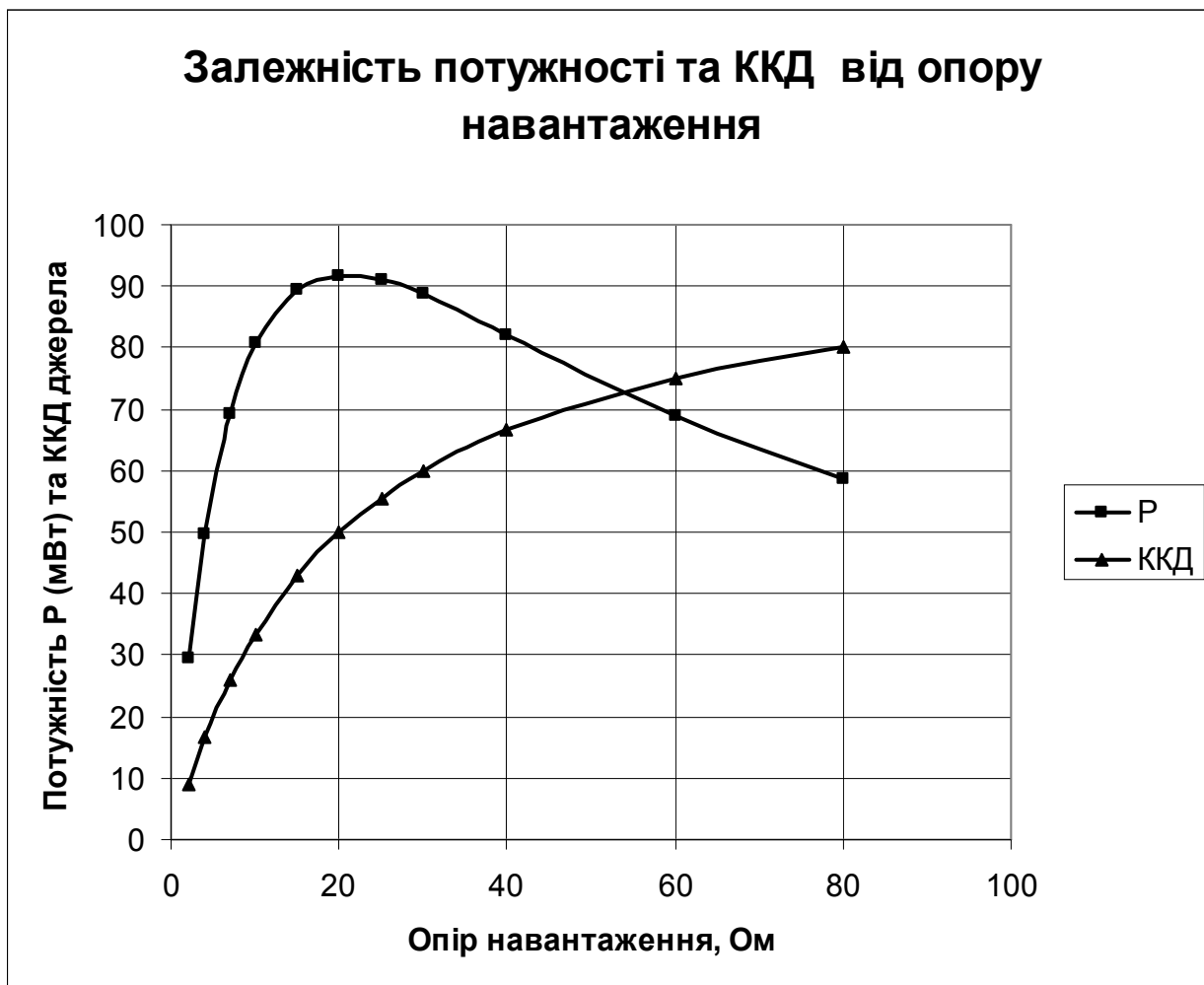
1. Сформулюйте Закон Ома для повного кола.
2. У яких одиницях вимірюються робота та потужність електричного струму?
3. Що називають к.к.д. джерела струму?
4. З якою метою в схему під'єднують додатковий опір? З яких міркувань вибране його значення?

Приклад виконання роботи

Табл. 1

R , Ом	I , $\cdot 10^{-3}$ А	$P_{кор}$, Вт	η , %
2	121,5	29,5245	9,090909
4	111,6	49,81824	16,66667
7	99,5	69,30175	25,92593
10	89,9	80,8201	33,33333
15	77,2	89,3976	42,85714
20	67,7	91,6658	50
25	60,3	90,90225	55,55556
30	54,4	88,7808	60
40	45,3	82,0836	66,66667
60	33,9	68,9526	75
80	27,1	58,7528	80

Приклад оформлення графіка



ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗЖАРЕННЯ ВОЛЬФРАМОВОЇ НИТКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЛАМПИ

Мета роботи: вивчити метод вимірювання температури розжарених тіл, що використовує залежність опору провідника від температури.

Прилади та матеріали: Установка для дослідження з лампою розжарення Н10-010-0068 (1 В 0,068 А) або Н10-025-0150 (2,5 В 0,15 А), мультиметр типу DT830В, джерело живлення (два гальванічні елементи типу АА з'єднані послідовно), термометр (один на групу).

Теоретичні відомості

При високих температурах залежність опору металевих провідників від температури є нелінійною; вона може бути представлена функцією:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2 + \gamma \cdot t^3), \quad (1)$$

де R – опір провідника при температурі t С; R_0 – його опір при 0°C ; α , β , γ – температурні коефіцієнти опору даного металу, які можна визначити з таблиць.

Зазвичай опір нитки лампи вимірюють не при 0°C , а при кімнатній температурі t_k . R_0 можна обчислити, використовуючи лінійну залежність:

$$R_k = R_0 (1 + \alpha \cdot t_k), \quad (2)$$

звідки:
$$R_0 = \frac{R_k}{1 + \alpha \cdot t_k} \quad (3)$$

Підставивши (3) в (1), одержимо:

$$R = \frac{R_k}{1 + \alpha t_k} (1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2 + \gamma \cdot t^3). \quad (4)$$

Визначивши дослідним шляхом R і розв'язавши (4), можна визначити температуру t .

Позначимо буквою C вираз, що стоїть у дужках:

$$C = 1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2 + \gamma \cdot t^3.$$

Знаходження t можна значно спростити, якщо використати графік залежності величини C від температури t (рис. 1.). Такий графік можна побудувати, використавши, наприклад, таблицю 19.13 з довідника [1] (с. 316).

Перепишемо рівняння (4):
$$R = \frac{R_k}{1 + \alpha \cdot t_k} \cdot C.$$

Звідси:

$$C = \frac{R \cdot (1 + \alpha \cdot t_k)}{R_k} \quad (5)$$

Вимірювши R_k , t_k і R , треба спочатку обчислити C за рівнянням (5), а потім за допомогою графіка $C(t)$ знайти температуру t .



Опис установки для вимірювання

Опір нитки лампи при кімнатній температурі R_k знаходять за допомогою омметра від цифрового мультиметра, кімнатну температуру – термометром.

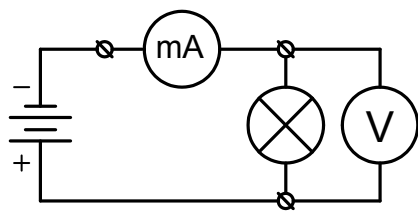


Рис. 2

Опір R розжареної нитки лампи визначають методом амперметра-вольтметра (рис. 2). Визначивши силу струму й напругу за законом Ома, обчислюють опір нитки розжарення лампи. Принципова електрична схема установки для цих вимірювань зображена на рис. 3.

Особливістю цієї схеми є те, що сила струму в лампі не вимірюється амперметром, а визначається за спадом напруги на відомому опорі R_1 . Якщо опір R_1 взяти рівним 1 Ом, то покази вольтметра будуть чисельно рівні силі струму в колі. Опір вольтметра від мультиметра порядку 1 МОм, тому під'єднання вольтметра до ділянки кола практично не змінює сили струму в колі.

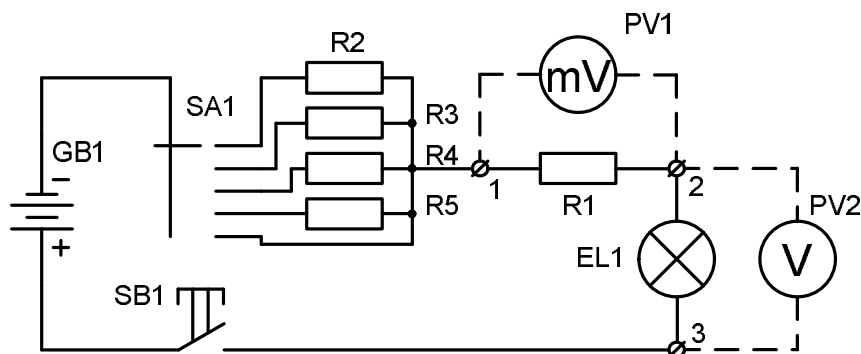


Рис. 3

Опір нитки лампи в розжареному стані дорівнює:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (6)$$

де U – покази вольтметра PV2, а I – покази вольтметра PV1.

Хід роботи

1. За допомогою мультиметра виміряйте опір вольфрамової нитки лампи при кімнатній температурі – R_k . Перемикач мультиметра переведіть у положення Ω (200 Ом), притисніть провідники мультиметра один до одного та запишіть його покази (наприклад, 0,4 Ом). Це значення слід віднімати від показів мультиметра при вимірюванні опору лампи. Приєднайте провідники мультиметра до гнізд 2 і 3 (див. рис. 3 і 4); результат вимірювання запишіть у робочий зошит.
2. За термометром визначте й запишіть кімнатну температуру t_k° .
3. Приєднайте до вимірювальної установки джерело живлення. Вид зверху на установку з приєднаним джерелом живлення подано на рис. 4.
4. Переведіть перемикач мультиметра в положення $V \text{ ---}$ (20 В) і приєднайте провідники мультиметра знову до гнізд 2 і 3. Перемикач SA1 повинен бути в положенні 1.
5. Натисніть на кнопку SB1. Нитка лампи повинна ледь-ледь розжаритись, а вольтметр показувати значення напруги близько 1 В. Запишіть значення напруги в зошит.
6. Повторіть вимірювання напруги при положеннях перемикача SB1 2, 3 і 4.

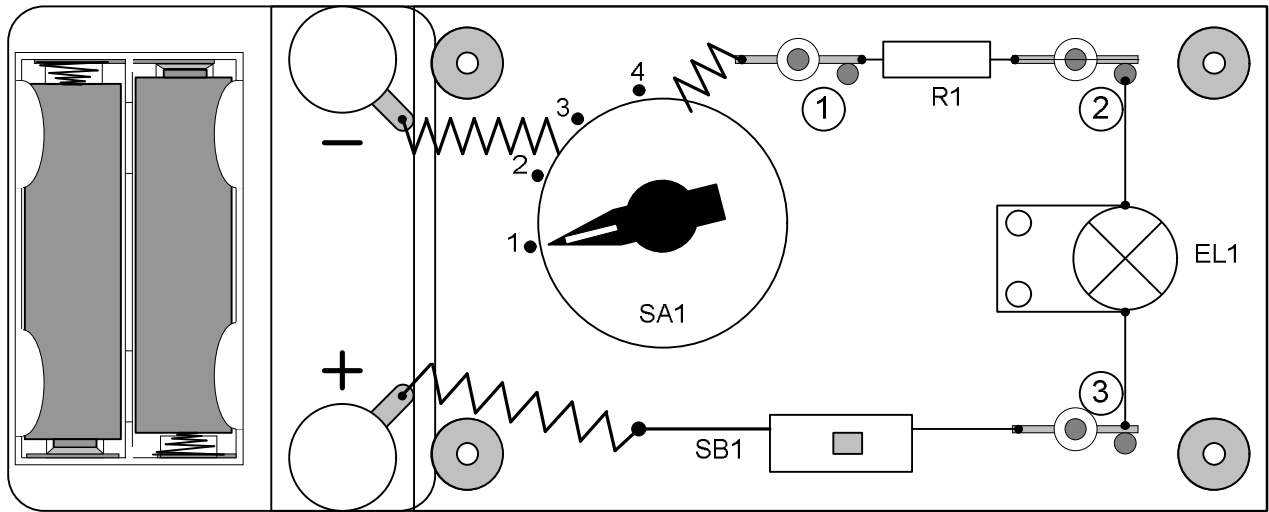


Рис. 4

7. Провідники мультиметра приєднайте до гнізд 1 і 2, а перемикач переведіть у положення 200 мВ. Як було зауважено вище, покази мультиметра відповідатимуть силі струму в мА. Натисніть SB1 і запишіть покази мультиметра в зошит.
8. Повторіть вимірювання при положеннях перемикача SA1 3, 2 і 1.
9. Для кожної з чотирьох пар значень напруги й сили струму обчисліть опір нитки розжарення R (формула (6)) та значення виразу C (формула (5)). Температурний коефіцієнт опору для вольфраму $\alpha = 0,0048 \text{ град}^{-1}$.
10. За графіком на рис. 1 знайдіть температуру нитки розжарення при різних значеннях напруги.
11. За даними обчислень побудуйте графік залежності $t = f(U)$.

Результати вимірювань і обчислень зручно подати у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

№ n/n	R_K , Ом	t_K , °C	U , В	I , А	R , Ом	C	t , °C
1							
2							
3							
4							
5							

Контрольні запитання

1. Як можна визначити опір провідника?
2. Як залежить опір металевих провідників від температури? Поясніть цю залежність з точки зору електронної теорії провідності металів.
3. Де використовується залежність опору металів від температури?
4. Розкажіть про явище надпровідності. Накресліть графік залежності опору від температури при переході в стан надпровідності.

Література.

1. Таблицы физических величин : Справочник / под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Приклад виконання роботи

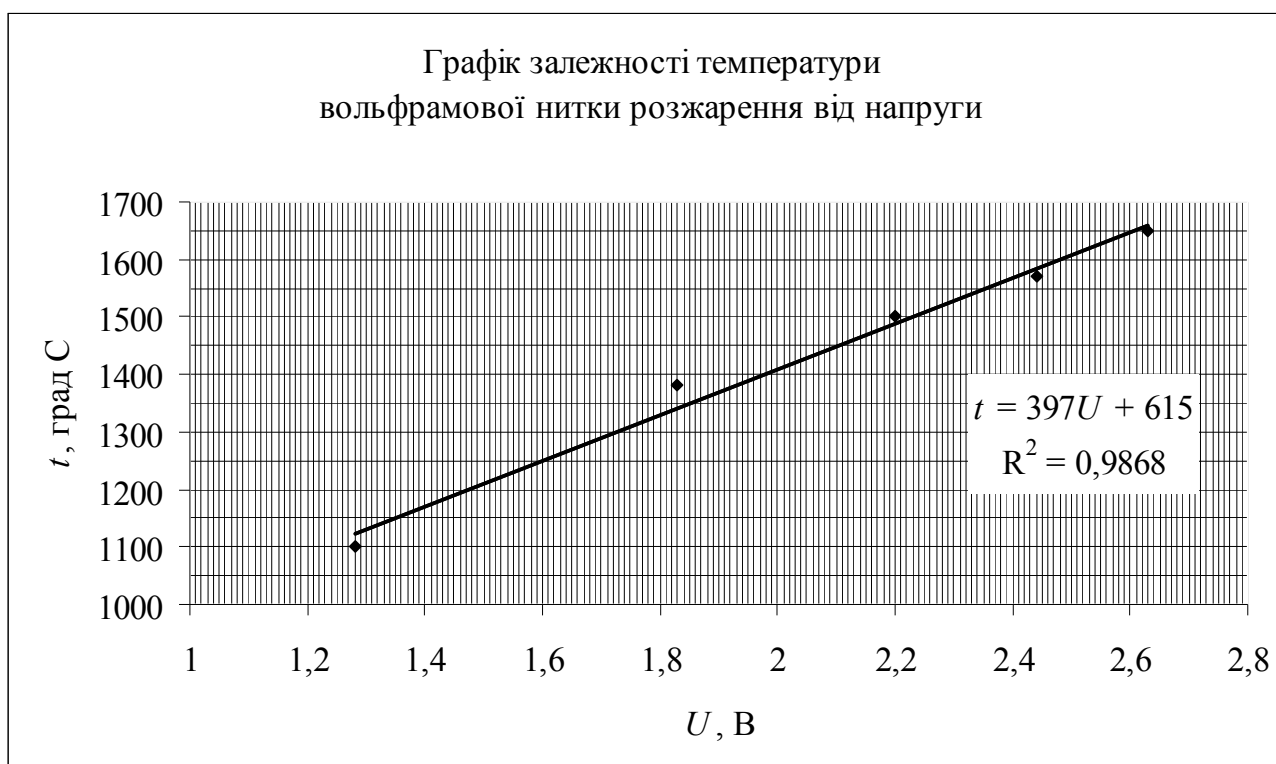
Записуємо в таблицю 1 значення опору R_k , температури t_k , напруги U і сили струму I .

Таблиця 1

№ n/n	R_k , Ом	t_k , °C	U , В	I , А	R , Ом	C	t , °C
1	2,7	23	1,28	0,0706	18,1	7,4	1100
2			1,83	0,0837	21,9	9,0	1380
3			2,2	0,0918	24,0	9,9	1500
4			2,44	0,0971	25,1	10,3	1570
5			2,63	0,1005	26,2	10,8	1650

Приклад обчислення: $C_1 = 18,1 \cdot \frac{1 + 0,048 \cdot 23}{2,7} = 7,4$.

За допомогою електронних таблиць побудуємо графік залежності $t = f(U)$.



ДОСЛІДЖЕННЯ ТРЬОХЕЛЕКТРОДНОЇ ЛАМПИ

Мета роботи: ознайомитись з методикою одержання анодна-сіткових характеристик трьохелектродної лампи (тріода) і визначити основні параметри тріода.

Прилади й матеріали: тріод типу 6Н19П або аналогічний, випрямляч ВУП-2, вольтметр постійного струму на 50-100 В, вольтметр постійного струму на 15 В, міліамперметр, джерело постійного струму напругою 10-15 В (ІЭПП-2), з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Струм у вакуумі забезпечується електронами, які з'являються в просторі між електродами завдяки електронній емісії (найчастіше термоелектронній). Найпростіша електронна лампа з двома електродами (**діод**) схематично зображена на рис. 1. Один з електродів виготовлений у вигляді дротини з тугоплавкого матеріалу; під час роботи лампи він нагрівається електричним струмом, завдяки чому з нього вилітають електрони. Цей електрод називають **катодом**. Другий електрод (**анод**) найчастіше має форму циліндра, всередині якого і розташований розжарений катод.

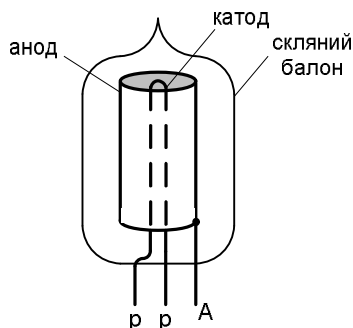


Рис. 1

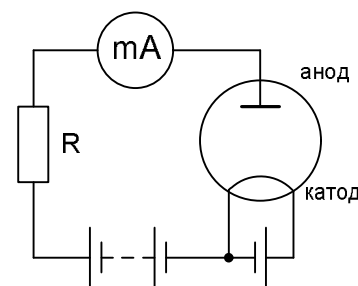


Рис. 2

Якщо скласти електричну схему, зображену на рис. 2, то міліамперметр покаже наявність електричного струму. Струм у колі діода з'являється тільки в тому випадку, коли позитивний полюс анодного джерела з'єднаний з анодом, а негативний — з катодом. Залежність анодного струму в діоді від напруги між анодом і катодом виражається **законом Богуславського – Ленгмюра** (закон *три других*):

$$I = K \sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{U^3} = K \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot U^{3/2}, \quad (1)$$

де e — заряд електрону, m — його маса, K — коефіцієнт пропорційності, що залежить від форми електродів, U — напруга на аноді.

Залежність (1) має місце при невеликих значеннях U . Коли потенціал аноду стає настільки великим, що всі електрони, випущені катодом за одиницю часу, трапляють на анод, струм досягає свого максимального значення і вже не залежить від напруги. Цей струм називають **струмом насичення** (рис. 3).

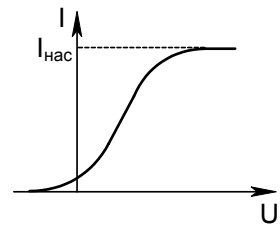


Рис. 3

Якщо між анодом і катодом розташувати третій електрод – **сітку** (яка має форму гвинтової лінії, що оточує катод), то одержимо трьохелектродну електронну лампу – **тріод** (рис. 4). Струм у тріоді залежить не тільки від потенціалу анода, а й від потенціалу сітки відносно катода.

При позитивному потенціалі сітки струм анода буде більшим, при негативному – менший, ніж при відсутності різниці потенціалів між сіткою і катодом.

Оскільки сітка розташована ближче до катода, ніж анод, то залежність анодного струму від напруги на сітці буде значно сильніша, ніж від напруги на аноді. Криві, що зображують залежність анодного струму I_A від напруги на сітці U_C при сталому потенціалі аноду ($U_A = const$), називають **анодно-сітковими характеристиками**. Сім'я таких характеристик зображена на рис. 5. За допомогою сіткових характеристик визначають основні параметри, що характеризують роботу лампи: **статичний коефіцієнт підсилення** μ , обернену йому величину D , яку називають **проникністю лампи**, **внутрішній опір** лампи R_i та **крутизну сіткової характеристики** лампи S .

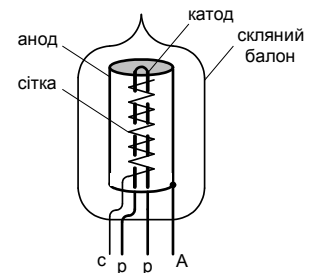


Рис. 4

Коефіцієнт підсилення лампи μ дорівнює відношенню приростів анодної та сіткової напруг, які дають однакові за значенням, але протилежні за знаком, прирости анодного струму:

$$\mu = \frac{-\Delta U_A}{\Delta U_C}$$

(при $I_A = const$). Проникність лампи $D = \frac{1}{\mu}$.

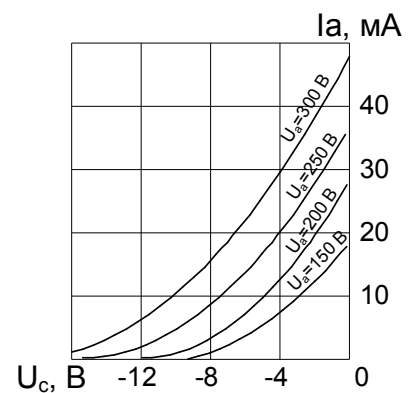


Рис. 5

Внутрішній опір лампи R_i визначається як похідна від анодної напруги по анодному струму, взята при сталому значенні напруги на сітці: $R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$ при $U_C = const$.

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \text{ при } U_C = const.$$

Крутизна характеристики S визначається як тангенс кута нахилу сіткових характеристик до вісі абсцис, тобто вона дорівнює відношенню приросту анодного струму до відповідного приросту напруги на сітці при сталій анодній напрузі:

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C} \text{ при } U_C = const.$$

Характеристики, зняті при відсутності анодного навантаження, називають *статичними*. При наявності значного опору навантаження в анодному колі лампа працює в *динамічному* режимі.

Визначення характеристик лампи ілюструє рис. 6. З рисунка видно, що параметри триода неоднакові на різних ділянках характеристики. Звичайно використовують значення цих параметрів, одержаних на прямолінійній ділянці характеристики. Якщо всі статичні характеристики знайдені в одній і тій же точці сіткових характеристик, то між ними повинно

існувати співвідношення $R_i \frac{S}{\mu} = 1$.

Крім анодно – сіткових характеристик робота лампи описується також *анодними характеристиками*. Так називають залежність анодного струму I_A від анодної напруги U_A при постійній напрузі на сітці $U_C = \text{const}$.

У даній роботі одержують статичні анодно – сіткові характеристики триода 6С19П.

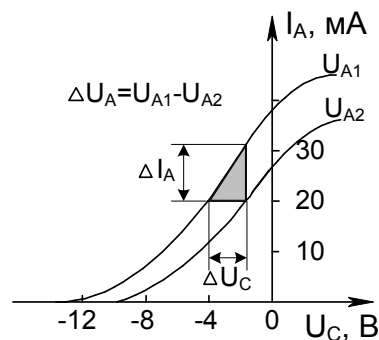


Рис. 6

Опис установки

Для зняття анодно-сіткових характеристик використовують схему, показану на рис. 7.

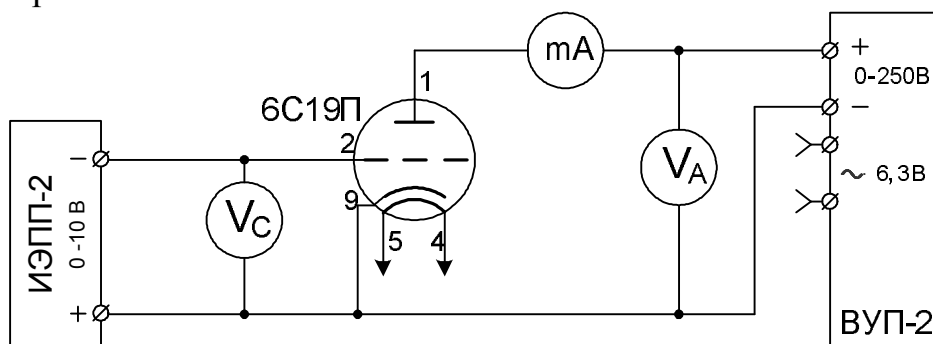


Рис. 7

Живлення лампи здійснюється від випрямляча ВУП-2. Напруга на сітці створюється окремим джерелом, в якості якого використане стабілізоване джерело постійного струму ИЭПП-1. Регулювання напруги на сітці здійснюється за допомогою регулятора вихідної напруги 0-12 В джерела ИЭПП-1. Вольтметр V_C вимірює напругу на сітці, вольтметр V_A – напругу анода, міліамперметр mA вимірює анодний струм. Анодна напруга змінюється за допомогою регулятора на ВУП-2.

Хід роботи

1. Зберіть коло, зображене на рис. 7. Триод закріплений на спеціальній підставці а його електроди позначені поблизу відповідних клем (**Н-Н** – нитка

розжарення, **К** – катод, **А** – анод, **С** – сітка).

2. Регулятор анодної напруги на ВУП-2 поставте в положення, при якому $U_A = 0$.

3. Після перевірки схеми викладачем чи лаборантом приєднайте джерела до мережі й увімкніть їх.

4. Регулятором вихідної напруги 0-12 В джерела ІЭПП-1 встановіть напругу на сітці $U_C = -10$ В.

5. Регулятором анодної напруги на ВУП-2 установіть напругу на аноді $U_A = 40$ В. Міліамперметр повинен показувати невеликий анодний струм.

6. Змінійте напругу на сітці через 1 В ($-10, -9, -8$ і т.д. до 0 В) і записуйте кожного разу значення анодного струму. Кожного разу, змінивши напругу на сітці, регулятором напруги ВУП-2 установлюйте напругу на аноді 40 В.

7. Закінчивши вимірювання, знову встановіть напругу на сітці -10 В, а потім регулятором анодної напруги на ВУП-2 встановіть напругу на аноді $U_A = 50$ В.

8. Повторіть вимірювання анодного струму, як описано в п. 6. Не забувайте стежити за вольтметром у колі аноду: напруга повинна бути рівною 50 В.

Обережно! Для даної лампи максимальне значення анодного струму 100 мА.

9. Покажіть дані Ваших вимірювань викладачу. При відсутності зауважень вимкніть джерела живлення, від'єднайте їх від мережі та розберіть електричну схему.

10. На міліметровому папері побудуйте дві анодно-сіткові характеристики. Використовуючи прямолінійні ділянки характеристик, розрахуйте параметри лампи μ, D, R_i, S .

11. Перевірте виконання співвідношення $R_i \frac{S}{\mu} = 1$.

Контрольні запитання

1. Опишіть будову тріоду. Яке призначення сітки?
2. Якими характеристиками визначається робота тріоду?
3. Дайте означення параметрів тріоду μ, D, R_i, S .
4. Де використовується лампа тріод?
5. Що називають динамічною характеристикою тріоду?
6. Як зміниться положення анодно-сіткової статичної характеристики тріоду при збільшенні напруги на аноді?

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДУ

Мета роботи: одержати вольт-амперну характеристику діоду. Дослідити залежність опору діоду від прикладеної напруги.

Прилади й матеріали: батарея з двох гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА, мультиметр типу DT830В, установка для зняття вольт-амперної характеристики діода.

Теоретичні відомості

Напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад, принцип дії якого ґрунтується на використанні властивостей електронно-діркового переходу. Електронно-дірковий або $p-n$ перехід – це електричний перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких має провідність p – типу (діркову), а інша – n – типу (електронну). Одержують $p-n$ перехід різними способами, одним з яких є вплавлення в пластинку напівпровідника n – типу акцепторної домішки, що утворює в частині пластинки напівпровідник p – типу. Тонкий перехідний шар, у якому домішки компенсують одна одну, і є $p-n$ переходом.

Область з великою концентрацією домішки i , отже, малим опором, називають емітером, другу область називають базою. Прямим включенням діоду називають таке включення, при якому плюс джерела приєднується до p – області. Електричний струм через діод зумовлений рухом основних (для p – області) носіїв заряду з емітера в базу, опір $p-n$ переходу малий.

При зворотному вмиканні діоду (мінус до p – області) електричний струм зумовлений рухом лише неосновних носіїв з бази в емітер. Його значення на три-чотири порядки менше, ніж значення прямого струму. Це і є основна властивість діоду – одностороння провідність.

Залежність сили струму від напруги називають *вольт-амперною характеристикою* діоду (ВАХ). У даній роботі потрібно зняти статичну вольт-амперну характеристику і визначити залежність статичного опору діоду від прикладеної напруги.

Опис установки для вимірювання

Для зняття ВАХ використовується схема, зображена на рис. 1. За цією схемою вимірюється прямий струм діоду. Для вимірювання зворотного струму слід змінити полярність джерела та замість міліамперметра увімкнути в коло мікроамперметр.

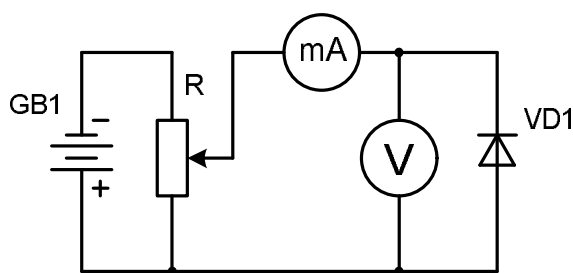


Рис. 1

Схема установки для вимірювання як прямого, так і зворотного струму зображена на рис. 2.

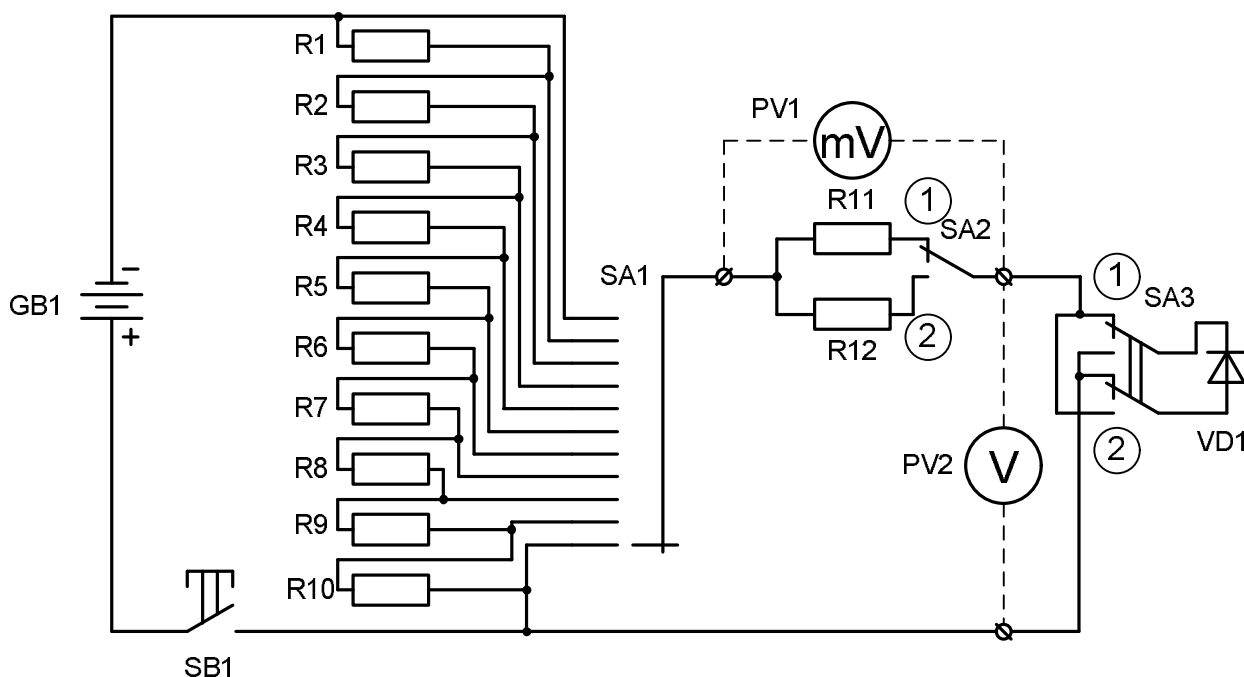


Рис. 2

Потенціометр R схеми на рис. 1 замінений перемикачем SA1, що дає можливість повторювати вимірювання при одних і тих же значеннях напруги. Сила струму визначається за падінням напруги на опорі R11: при значенні опору R11, рівному 1 Ом, покази мілівольметра дорівнюватимуть силі струму в мА. Для вимірювання зворотного струму в мкА у коло під'єднують опір R12 значенням 1 кОм. Зміна напрямку струму через діод здійснюється перемикачем SA3.

При вимірюванні зворотного струму й одночасному під'єднанні приладів для вимірювання сили струму й напруги, прилад для вимірювання сили струму реєструватиме не тільки зворотний струм діоду, а й струм через вольтметр. Цей струм при напрузі 1 В дорівнює 1 мкА, що значно менше зворотного струму германієвого діоду. Проте й цю розбіжність можна усунути, якщо вимірювати струм і напругу не одночасно, а послідовно, спочатку – струм, потім – напругу. Наявність чи відсутність у колі мілівольметра для вимірювання сили струму не впливає на покази вольтметра.

Зовнішній вид установки для зняття ВАХ показаний на рис. 3 (вигляд зверху).

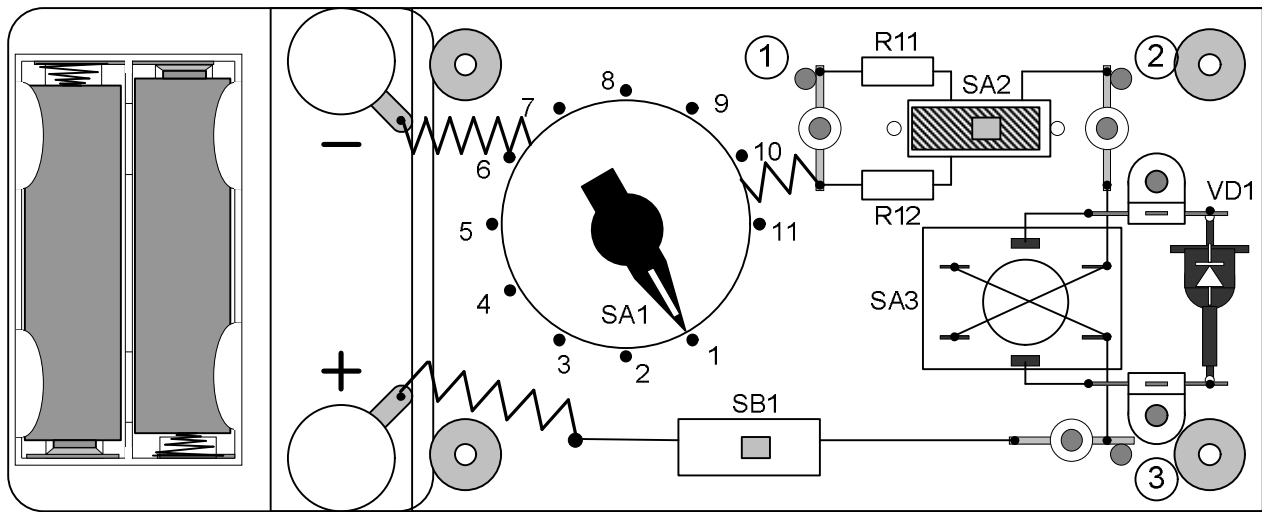


Рис. 3

Хід роботи

1. Приєднайте до вимірювальної установки джерело живлення. Перемикач SA1 встановіть у положення 1. З положення 1 у положення 11 перемикач SA1 переводять, повертаючи ручку за годинниковою стрілкою, з положення 11 у положення 1 – проти годинникової стрілки.

2. Перемикачі SA2 і SA3 переведіть у положення „прямий струм” – праворуч.

3. Перемикач мультиметра встановіть у положення 200 mV постійного струму й приєднайте щупи мультиметра до гнізд 1 і 2. Натисніть кнопку SB1 – покази мілівольтметра дорівнюють нулеві. Натискати кнопку слід тільки на час, необхідний для вимірювання.

4. Переведіть перемикач SA1 у положення 2, натисніть кнопку й запишіть покази мілівольтметра. (Нагадаємо, що покази мілівольтметра відповідають струму в mA).

5. Запишіть значення струму при інших положеннях перемикача SA1. **Будьте уважні!** Струм через діод не повинен бути значно більшим 200 mA. Тому при досягненні струму більше, ніж 200 mA (при цьому цифри на індикаторі погаснуть і висвітлиться 1), слід припинити вимірювання й перевести перемикач SA1 у положення 1.

6. Перемикач мультиметра переведіть у положення 20 V постійного струму. Під’єднайте щупи мультиметра до гнізд 2 і 3.

7. Переводячи перемикач SA1 у положення 2, 3 та ін., запишіть значення напруги на діоді. **Будьте уважні!** Останнє положення перемикача, для якого ви запишете напругу, повинно відповідати максимальному струму, одержаному в пункті 5.

8. Перемикач мультиметра встановить у положення 200 mV постійного струму й приєднайте щупи мультиметра до гнізд 1 і 2. Перемикачі SA2 і SA3 переведіть у положення „зворотний струм” – ліворуч.

9. Запишіть значення сили струму при всіх положеннях перемикача SA1. (Тепер покази мілівольтметра – це значення сили струму в мкА).

10. Перемикач мультиметра переведіть у положення 20 V постійного струму. Під’єднайте щупи мультиметра до гнізд 2 і 3.

11. Запишіть значення напруги при всіх положеннях перемикача SA1.

12. Повторіть вимірювання, передбачені пунктами 2 – 11.

12. За даними вимірювань побудуйте ВАХ діода. Значення прямого струму й прямої напруги вважайте додатними, а зворотних – від’ємними. Рекомендовані масштаби: прямий струм – у 1 см 10 мА, пряма напруга – у 1 см 0,05 В; зворотний струм – у 1 см 10 мкА, зворотна напруга – у 1 см 0,5 В.

13. За вказівкою викладача повторіть вимірювання з кремнієвим діодом типу Д 226.

14. Обчисліть значення статичного опору діода при різних значеннях напруги.

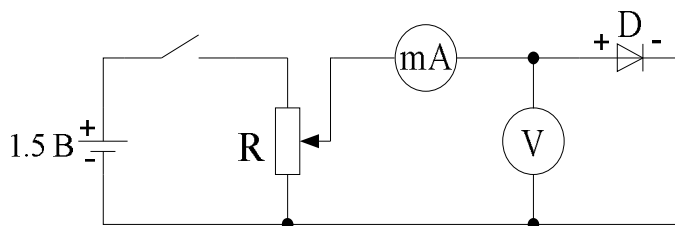
Таблиця для запису результатів вимірювань може мати такий вигляд (прямий струм):

$U, \text{В}$	0										
$I, \text{мА}$	0										
$R, \text{Ом}$	-										

Для зворотного струму сила струму – в мкА, опір – у кОм.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні властивості напівпровідників.
2. Як одержують напівпровідник n – типу? p – типу?
3. Як утворюється $p-n$ – перехід і які його властивості?
4. Як змінюється опір діода при зміні напруги?
5. Проаналізуйте одержані ВАХ. Чим відрізняються ВАХ германієвого й кремнієвого діодів?
6. Зберіть електричне коло за схемою:



За елементами схеми зверніться до лаборанта.

Приклад виконання роботи

У процесі вимірювань одержані наступні дані.

Діод Д7Г

Прямий струм

U, В	0	0,027	0,079	0,149	0,216	0,245	0,274	0,291	0,319	0,359
I, мА	0	0	0,4	1,8	6,9	12,3	21,3	28,7	47,9	92,9
R, Ом	-	-	197,5	82,8	31,3	19,9	12,9	10,1	6,66	3,86

Зворотний струм (значення від'ємні)

U, В	0	0,015	0,057	0,134	0,259	0,384	0,658	0,923	1,457	1,99	2,53
I, мкА	0	11,6	23,6	26,7	26,8	26,9	27,1	27,1	27,3	27,6	27,7
R, кОм	-	1,29	2,42	5,02	9,66	14,3	24,3	34,1	53,4	72,1	91,3

Діод Д226Б

Прямий струм

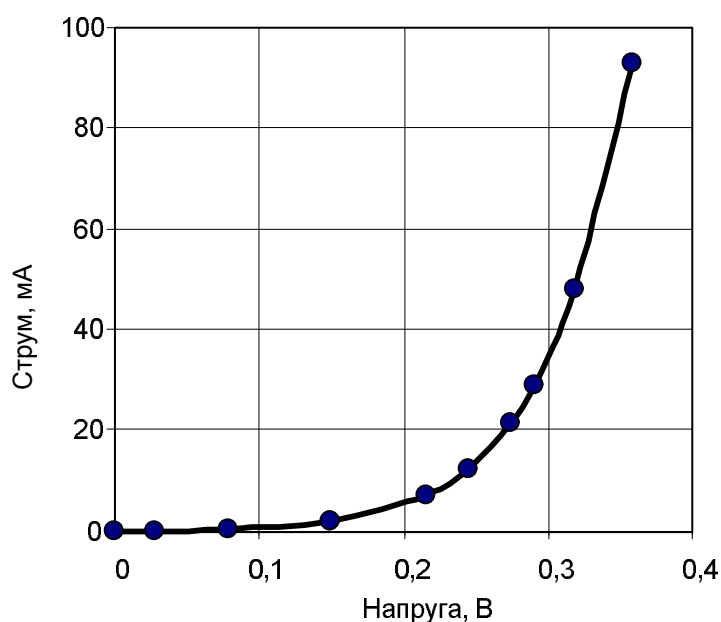
U, В	0	0,03	0,08	0,16	0,28	0,41	0,63	0,71	0,77	0,81
I, мА	0	0	0	0	0	0	2,4	10,3	29,1	66,2

Зворотний струм (значення від'ємні)

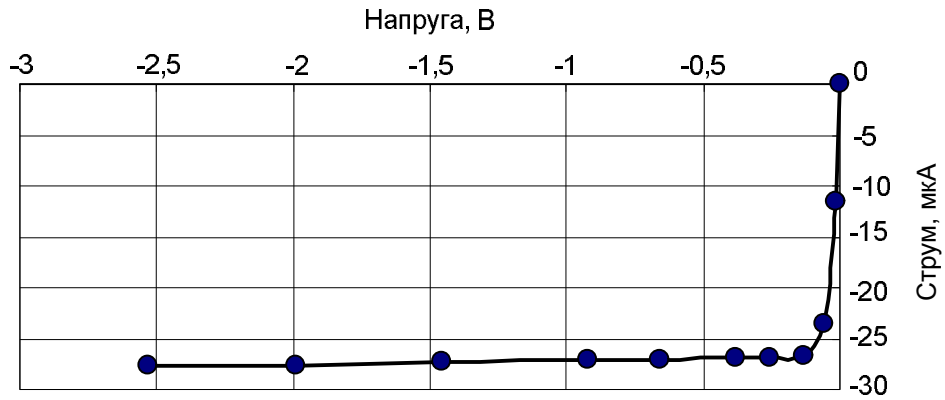
U, В	0	-0,03	-0,08	-0,16	-0,28	-0,41	-0,68	-0,94	-1,48	-2,01	-2,54
I, мкА	0	0	-0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,9	-1,3	-2,4	-3,4	-4,3

Графіки за даними таблиць наведені далі

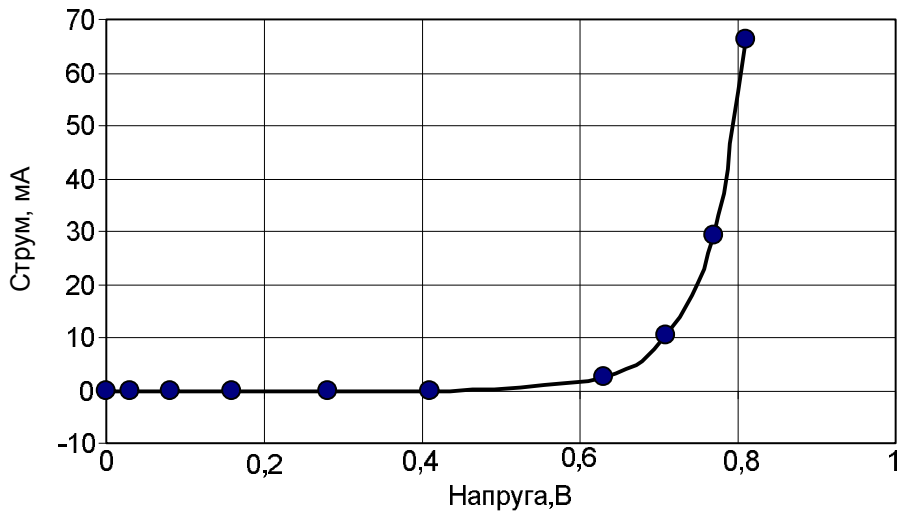
ВАХ діоду Д7Г (прямий струм)



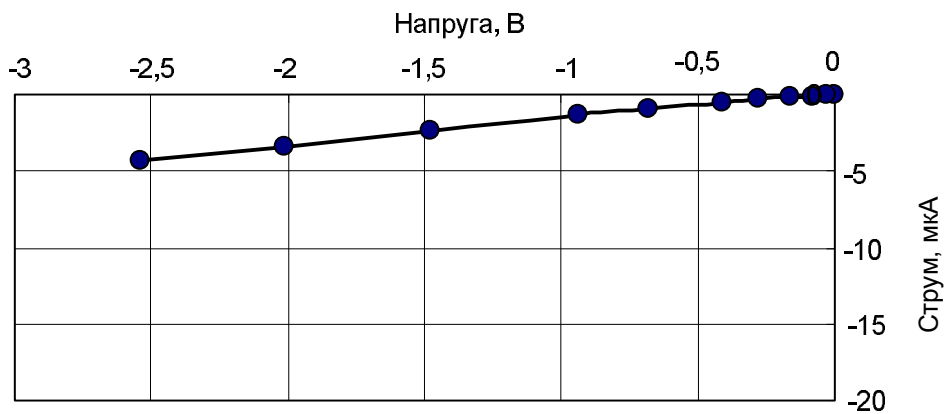
ВАХ діоду Д7Г (зворотній струм)



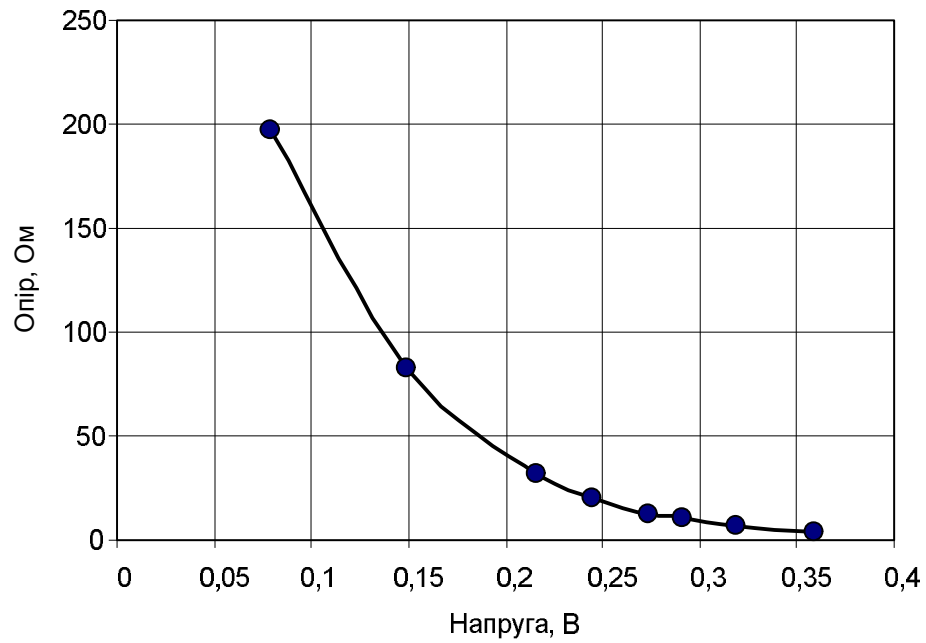
ВАХ діоду (Д226Б, прямий струм)



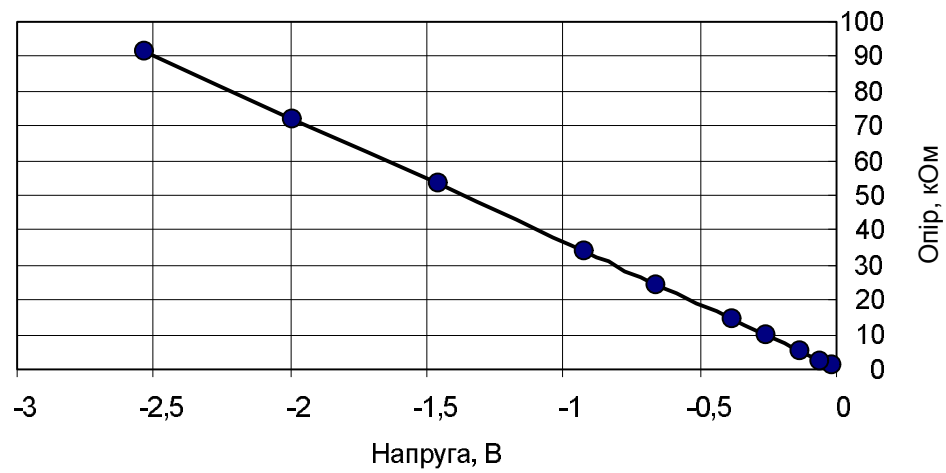
ВАХ діоду (Д226Б, зворотній струм)



Залежність опору р-п переходу від напруги
(прямий струм)



Залежність опору р-п переходу від напруги
(зворотній струм)



ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ІОНІВ В ЕЛЕКТРОЛІТІ ПРИ ДІЇ НА НИХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Завдання I. Вимірювання швидкості іонів в електроліті при дії на нього електричного поля

Мета роботи: теоретично оцінити й експериментально визначити швидкість іонів в електроліті при наявності електричного поля.

Прилади та матеріали: лабораторна установка, акумулятор, мультиметр, електроліт (Na_2SO_4), фенолфталеїн, листок фільтрувального паперу, з'єднувальні провідники.

Теоретична частина

Розчини, що розкладаються хімічно при проходженні через них струму, називаються *електролітами*, а сам процес розкладання речовини електричним струмом - *електролізом*. Називатимемо провідники, занурені в електроліт для підведення до нього струму, електродами: позитивний електрод - анодом, а негативний - катодом. Якщо пропускати струм через розчин мідного купоросу (CuSO_4), то на катоді осідає мідь. Маса речовини, що виділилася на електроді, пропорційна заряду або кількості електрики, що пройшла через електроліт. Цей важливий закон був установлений уперше Фарадеєм і носить назву першого закону Фарадея. Якщо m — маса речовини, що виділилася, I — сила струму, t — час електролізу, а q — повний заряд, що пройшов через ванну за час t , то перший закон Фарадея можна записати так:

$$m = Kq = Kit, \quad (1)$$

де K — коефіцієнт пропорційності. Уважаючи у формулі (1) заряд $q = 1$ Кл, ми отримаємо, що коефіцієнт K дорівнює масі речовини, що виділяється при проходженні заряду 1 Кл, або інакше - масі речовини, що виділяється при проходженні струму 1 А за 1 с. При електролізі солі іншого металу маса речовини, що виділилася, буде іншою. Величина K називається електрохімічним еквівалентом даної речовини.

Електрохімічні еквіваленти різних речовин пропорційні їх молярним масам і обернено пропорційні числам, що виражають їх хімічну валентність (другий закон Фарадея).

Якщо позначити, як і раніше, через K [кг/Кл] електрохімічний еквівалент речовини, через M [кг/моль] — його молярну масу, а через n — валентність ($n = 1, 2, \dots$), то другий закон Фарадея можна записати у вигляді

$$K = \frac{1}{F} \frac{M}{n}. \quad (2)$$

Тут через $1/F$ позначений коефіцієнт пропорційності, який є універсальною постійною, тобто має однакове значення для всіх речовин. Величина F називається постійною Фарадея. Її значення, знайдене експериментально, дорівнює $F = 96484$ Кл/моль.

Деякі елементи в різних з'єднаннях мають різну валентність. Так, наприклад, мідь одновалентна в хлористій міді (CuCl), закису міді (Cu_2O) і ще в деяких солях, і мідь двовалентна в хлорній міді (CuCl_2), окислі міді (CuO), мідному купоросі (CuSO_4) і ще в деяких сполуках. При електролізі в розчині з одновалентною міддю заряд 1 Кл завжди виділяє 0,6588 мг міді. При електролізі ж в розчині з двовалентною міддю при проходженні заряду 1 Кл виділяється завжди вдвічі менше міді, - 0,3294 мг. Як видно, мідь має два значення електрохімічного еквівалента.

Об'єднавши формули (1) і (2), можна виразити обидва закони Фарадея у вигляді однієї формули:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} q. \quad (3)$$

Сам факт розкладання електролітів при проходженні через них струму показує, що в них рух зарядів супроводжується рухом атомів або груп атомів, зв'язаних один з одним (наприклад SO_4 , NO_3 тощо); цими атомами або атомними групами є частини молекули розчиненої речовини. Природно припустити, що заряджені саме ці частини молекули в розчині і що вони є носіями електричного заряду. Їх переміщення під дією сил електричного поля і є електричним струмом, що проходить через електроліт. Було виявлено, що при проходженні струму через електроліт виділення речовини відбувається на обох електродах. За хімічним складом, це різні частини молекули розчиненої речовини. По кількості, якщо вимірювати його в хімічних еквівалентах, вони рівні. Знаки зарядів у них, очевидно, протилежні. Заряджені атоми називаються *іонами*. Ту ж назву мають заряджені молекули або їх частини. Отже, ми можемо сказати, що провідність електролітів є іонною, тобто зумовлена рухом у них позитивних і негативних іонів, які утворюються з нейтральної молекули шляхом розпаду її на дві частини, заряджені рівними і протилежними зарядами. Молекули розчиненої речовини, які до розчинення були електрично нейтральні, при розчиненні розпадаються на позитивні й негативні іони, здатні переміщуватися незалежно один від одного.

Поки між електродами не створено поле, іони здійснюють тільки безладний тепловий рух, як і решта всіх молекул розчину. У кожному напрямі за одиницю часу протікає однаковий позитивний і негативний заряд, тобто немає електричного струму - переважного перенесення заряду в певному напрямі. При накладенні різниці потенціалів на електроди, коли усередині електроліту виникає електричне поле, на цей безладний рух накладається впорядкований рух у протилежні сторони іонів різних знаків: негативних - до анода, позитивних - до катода. При зіткненні з катодом позитивні іони отримують електрони й виділяються у вигляді нейтральних атомів, а замість електронів, які нейтралізували іони, нові електрони переходять від батареї до катода. Так само негативні іони при зіткненні з анодом віддають йому свої

надлишкові електрони, перетворюючись на нейтральні атоми; електрони ж ідуть по металевих провідниках у батарею. Таким чином, струм в електроліті зумовлений рухомими іонами; на електродах же відбувається нейтралізація іонів і виділення їх у вигляді нейтральних атомів (або молекул).

Отже, електричний струм в електролітах є рухом позитивних і негативних іонів.

Схема лабораторної установки

На рис. 1 зображена лабораторна установка для демонстрації руху іонів в електроліті.

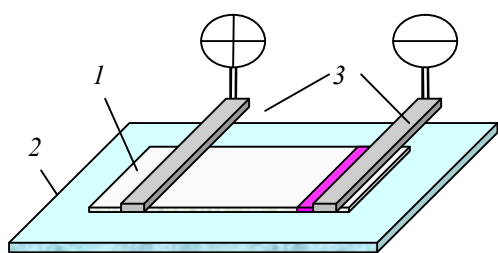


Рис. 1. Демонстрація руху іонів в електроліті

Хід роботи

1. Просочіть листок фільтрувального паперу 1 розчином електроліту (сірчаноокислого натру Na_2SO_4) і фенолфталеїну і помістіть на скляну пластинку 2. Потім притисніть до країв листка електроди 3 (леза бритви), приєднані до акумулятора, і увімкніть струм.

2. Спостерігайте забарвлення паперу в малиновий колір. За швидкістю переміщення малинового краю можна судити про середню швидкість руху іонів під впливом електричного поля всередині електроліту. Виміряйте швидкість руху іонів. Опишіть процес забарвлення паперу. Звідкіля він почався? Чому?

3. Виміряйте мультиметром величину струму I . Визначте кількість пар іонів, які проходять за 1 с на електроди.

Поясніть отримані результати.

Завдання 2. Просочіть листок фільтрувального паперу тільки розчином фенолфталеїну в воді. Подайте напругу на електроди. Опишіть явища, що спостерігаються. Поясніть отримані результати.

Завдання II. Вимірювання швидкості іонів в електроліті при дії на нього електричного та магнітного поля

Мета роботи: теоретично й експериментально визначити швидкість іонів в електроліті при наявності магнітного поля.

Прилади та матеріали: лабораторна установка, акумулятор, мультиметр, електроліт (CuSO_4 , Na_2SO_4), фенолфталеїн, магніт, з'єднувальні провідники.

Теоретична частина

На рис. 2 зображена посудина, наповнена розчином електроліту; два електроди - кільце 1 і стрижень 2 - приєднані до полюсів батареї. Струм в електроліті йде від кільця 1 до електрода 2, тобто іони рухаються вздовж

радіусів посудини. Поставимо посудину на один з полюсів магніту, наприклад на північний, так що магнітне поле направлене догори перпендикулярно до напрямку руху іонів. Сили Лоренца прагнуть переміщати іони в напрямі горизонтальної стрілки по колах перпендикулярно до радіусів посудини. Ми виявляємо, що в цьому напрямі починає рухатися весь розчин, про що можна судити по руху поплавка з прапорцем 3.

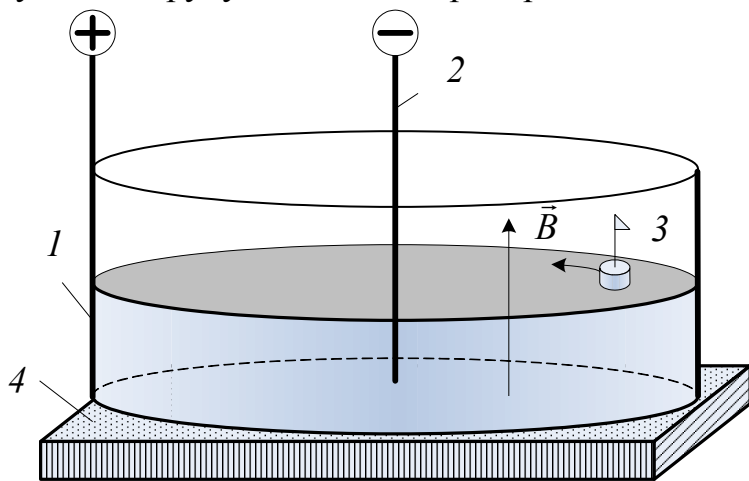


Рис. 2. Схема досліду

Щоб зрозуміти сенс цього досліду, треба пригадати, що іони складають лише малу частку від загальної кількості молекул розчину. Тільки рухомі іони знаходяться безпосередньо під дією сил Лоренца; вся ж маса нейтральних молекул рідини починає круговий рух завдяки зіткненню іонів з молекулами. Наш дослід доводить, отже, не тільки існування сил, що діють на рухомі іони з боку

магнітного поля, але й існування сил «тертя» між іонами та молекулами рідини.

Дослід показує, що ця швидкість пропорційна напруженості поля всередині електроліту. При заданому полі ця швидкість для різних іонів дещо різна, але загалом вона невелика й становить $10^{-2} - 10^{-3}$ см/с.

Розрахуємо швидкості іонів при відсутності магнітного поля. Густина струму в електроліті є

$$j = n_+ q v_+ + n_- q v_- \quad (1)$$

де n_+ і n_- - концентрації позитивних та негативних іонів відповідно, q - абсолютна величина заряду кожного іона, v_+ і v_- - швидкості їх упорядкованого руху. Будемо вважати, що $(n_+ = n = n_-)$ і $v_+ = v_- = v_R$.

Сила струму, виражена через густину струму,

$$I = jS = (2nq v_R)(2\pi R h) = 4\pi n q R h v_R, \quad (2)$$

де $q = 2e$ - заряд іона, R - радіус кільця, h - висота.

Концентрація іонів

$$n = \frac{N}{V} = \frac{m}{\mu} N_A \frac{1}{\pi R^2 h}, \quad (3)$$

де m - маса, наприклад, мідного купоросу, μ - його молярна маса, N_A - число Авогадро.

З формул (2) і (3) отримаємо

$$I = \frac{8em N_A v_R}{\mu R}. \quad (4)$$

Звідси

$$v_R = \left(\frac{\mu}{8emN_A} I \right) R. \quad (5)$$

Зробимо розрахунок швидкості іонів CuSO_4 ($\mu = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) для $I = 0,23$ А, $R = 0,05$ м, $m = 0,01$ кг.

$$v_R = \left(\frac{64 \cdot 10^{-3} \cdot 0,23}{8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,01 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \right) \cdot 0,05 = 10^{-7} \text{ м/с}.$$

Тобто розрахункове значення в $10^2 - 10^3$ разів менше значення швидкості іонів, яке отримують у дослідах з фільтрувальним папером. Ця різниця виникає або за рахунок того, що в згаданому досліді спостерігаються капілярні явища, або ступінь дисоціації молекул у $10^2 - 10^3$ разів менше закладеного в розрахункову формулу. Крім того, ми не враховували інші сили опору, які ще більше зменшать швидкість руху іонів. Що це за сили?

Навколо кожного іона, що знаходиться в розчині, утворюється оболонка з інших іонів. Розподіл заряду в „іонній атмосфері“, що оточує рухомий іон, зумовлює появу додаткової сили, направленої, незалежно від знаку іона, назустріч його руху. Ця сила, пропорційна першому ступеню швидкості і, отже, еквівалентна звичайній силі тертя. Додаткове тертя навіть при достатньо малих концентраціях такого ж порядку величини, як і звичайний опір середовища руху іона. Дія цієї сили, що викликає зменшення рухливості іонів, зростатиме зі збільшенням концентрації.

Іон рухається не в середовищі, що знаходиться у спокої, а в деякому потоці, що спрямовується йому назустріч. Тому виникає ще одна сила тертя.

Тепер розрахуємо швидкості іонів при дії магнітного поля. На рухому заряджену частинку в магнітному полі діє сила Лоренца.

Дія двох сил (сили Лоренца F_L та сила в'язкого тертя F_{mp}) призведе до того, що через деякий час після початку обертання дотична складова швидкості v_R на відстані r від центра обертання не буде змінюватись з часом. Знайдемо чому дорівнюватиме швидкість v_R , коли $F_{mp} = F_L$, тобто

$$-\eta \frac{dv_r}{dr} S = QBv_r, \quad (6)$$

де заряд $Q = 2qn \cdot \pi r^2 h = 2 \frac{I}{4\pi R h v_R} \cdot \pi r^2 h = \frac{I r^2}{2R v_R}$, η - коефіцієнт в'язкого тертя.

З (6) одержуємо диференціальне рівняння:

$$dv_r = -\frac{BI}{4\pi R h \eta} r dr. \quad (7)$$

Інтегруємо це рівняння з урахуванням того, що при $r \rightarrow R, v_r \rightarrow 0$, та отримуємо:

$$v_r = \frac{BI}{8\pi R h \eta} (R^2 - r^2). \quad (8)$$

Результати розрахунку v_r у залежності від r наведено в табл.1 для величин $B = 0,02$ Тл; $h = 0,01$ м; $\eta = 0,001$ кг/(м·с).

Таблиця 1

Швидкості іонів CuSO_4 у воді

r , см	1	2	3	4	4,5
v_r , см/с	8,9	7,7	5,9	3,3	1,7

Хід роботи

1. Наповніть розчином електроліту (Na_2SO_4) з фенолфталеїном посудину, що зображена на рис. 2.

2. Приберіть магніт 4. Виміряйте величину струму, напруги, коли два електроди - кільце 1 і стрижень 2 - приєднані до полюсів акумулятора або джерела постійного струму.

Як рухаються іони в посудині? Спостерігайте забарвлення електроліту в малиновий колір. За швидкістю переміщення малинового краю можна визначити середню швидкість руху іонів під впливом електричного поля в середині електроліту. Опишіть процес забарвлення. Звідкіля він почався? Чому? Розрахуйте швидкість іонів в електроліті при відсутності магнітного поля. Значення в'язкості рідини вважайте рівним $0,001$ кг/(м·с). Обґрунтуйте відповідь.

3. Поставте посудину на один з полюсів магніту, наприклад на північний, так щоб магнітне поле було направлене догори. Заново наповніть посудину розчином електроліту (Na_2SO_4) з фенолфталеїном. Виміряйте величину струму, напруги, коли два електроди - кільце 1 і стрижень 2 - приєднані до полюсів акумулятора або джерела постійного струму.

Опишіть фізику цього процесу. У якому напрямі починає рухатися розчин? Поясніть, які сили діють.

4. Змініть полярність електродів, магніту. Опишіть, що відбувається.

5. Розрахуйте швидкість іонів в електроліті при наявності магнітного поля. Обґрунтуйте відповідь.

Експериментально (по забарвленню) визначте швидкість іонів в електроліті при наявності магнітного поля, та порівняйте з теоретичним значенням.

Контрольні запитання

1. Коли виникає сила Лоренца?
2. Від чого залежить швидкість руху іонів в електроліті?
3. Поясніть причини руху позитивних і негативних іонів по колу в одному напрямку.

ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи: познайомитись з методом тангенс-гальванометра для визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі, і визначити цю складову.

Прилади та матеріали: тангенс-гальванометр, реостат, батарея акумуляторів, міліамперметр, перемикач, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

У просторі, що оточує провідники зі струмом та постійні магніти, існує силове поле, яке називають **магнітним полем**. Це поле можна виявити, якщо внести в нього провідник зі струмом чи постійний магніт (магнітну стрілку): поле буде діяти на них з певною силою.

Дослід показує, що сила, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі, прямо пропорційна силі струму I , довжині провідника l і залежить від орієнтації провідника. Максимальне значення цієї сили, яку називають силою Ампера, дорівнює:

$$F_A^{max} = B \cdot I \cdot l. \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності B характеризує магнітне поле; його називають **індукцією магнітного поля**:

$$B = \frac{F_A^{max}}{I \cdot l}. \quad (2)$$

Одиниці вимірювання магнітної індукції:

$$[B] = \frac{H}{A \cdot m} = Tл \text{ (Тесла)}.$$

Залежність сили Ампера від орієнтації провідника свідчить про те, що магнітне поле має напрям, тобто індукція магнітного поля - величина векторна. За напрям магнітного поля беруть напрям сили, що діє на північний полюс магнітної стрілки. Отже, стрілка в магнітному полі завжди орієнтується вздовж вектора магнітної індукції \vec{B} (див. рис. 1).

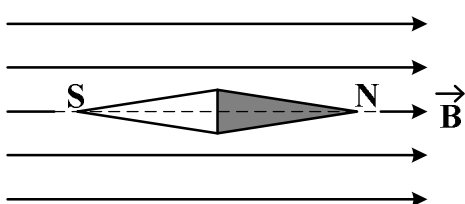


Рис. 1

Зображають магнітні поля з допомогою **ліній магнітної індукції**: так називають лінії, дотична до яких у кожній точці співпадає з напрямком вектора \vec{B} .

Коловий струм створює магнітне поле, напрям ліній індукції якого визначається

правилом свердлика. Тому, якщо взяти коловий струм, розташований у вертикальній площині, встановити в його центрі маленьку магнітну стрілку, яка може обертатись у горизонтальній площині, то стрілка буде намагатись розташуватися своєю віссю перпендикулярно до площини кільця.

Індукція магнітного поля в центрі колового струму визначається за допомогою закону Біо-Савара-Лапласа:

$$B = \mu_0 \mu \frac{I \cdot n}{2R}, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна стала, значення якої

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} = 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

μ – відносна магнітна проникність середовища;

I – сила струму;

R – радіус колового струму;

n – кількість витків котушки.

Але на магнітну стрілку, встановлену в центрі кільця, буде діяти крім магнітного поля струму, ще й магнітне поле Землі. Якщо площина колового

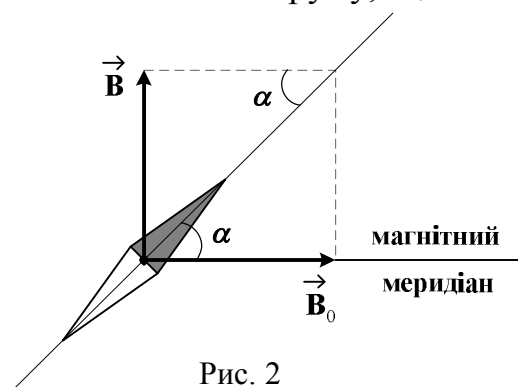


Рис. 2

струму співпадає з площиною магнітного меридіану, то магнітна стрілка розташується так, що її вісь утворює з площиною магнітного меридіану деякий кут α , значення якого залежатиме як від сили струму, так і від магнітного поля Землі в даному місці. Якщо струму не буде, то стрілка встановиться в площині магнітного меридіану. Лінії індукції магнітного поля Землі не паралельні

поверхні Землі, тобто вільно підвішена магнітна стрілка розташується під деяким кутом до горизонталі. Цей кут називається **кутом магнітного нахилення**. У даній роботі ми знаходимо горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі. Позначимо цю складову \vec{B}_0 . Вектор індукції магнітного поля колового струму \vec{B} , вектор горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі \vec{B}_0 і вісь магнітної стрілки будуть розташовані так, як показано на рис. 2.

З рисунка видно, що модулі векторів \vec{B} і \vec{B}_0 зв'язані співвідношенням:

$$\frac{B}{B_0} = \text{tg} \alpha \quad (4)$$

Підставимо в (4) вираз (3): $\frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I \cdot n}{2R \cdot B_0} = \text{tg} \alpha$, звідки:

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I \cdot n}{2R \cdot \text{tg} \alpha}. \quad (5)$$

Опис приладу

Прилад, який називають "тангенс-гальванометр" (або "тангенс-бусоль"), складається з круглої рамки, на яку намотано декілька витків ізоляованого дроту (рис. 3а). Площина рамки розташована вертикально і в центрі її закріплена магнітна стрілка (рис. 3б), що може обертатись у горизонтальній площині. Стрілка оточена лімбом з поділками. Для підвищення точності вимірювань перпендикулярно до магнітної стрілки приклеєна тоненька стрілка-показчик. Рамка приєднується до джерела струму через міліамперметр і реостат так, як показано на рис. 4.

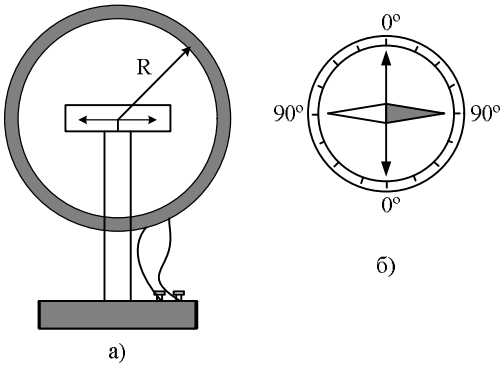


Рис. 3

Примітка. Під час роботи з тангенс-гальванометром необхідно стежити, щоб поблизу приладу не було залізних чи сталевих предметів.

Хід роботи

1. Якщо магнітна стрілка бусолі поставлена на аретир, то зніміть її з аретира, повертаючи оправу магнітної стрілки бусолі проти годинникової стрілки.
2. Дочекавшись припинення коливань магнітної стрілки, розверніть круглу рамку з дротом так, щоб її площина збігалась би з площиною магнітного меридіану, тобто з площиною стрілки.
3. Поверніть корпус бусолі так, щоб стрілка-показчик вказувала обома кінцями на позначки "0" лімба.
4. Зберіть схему згідно рис. 4. **Джерело струму можна під'єднати лише після перевірки схеми викладачем!**

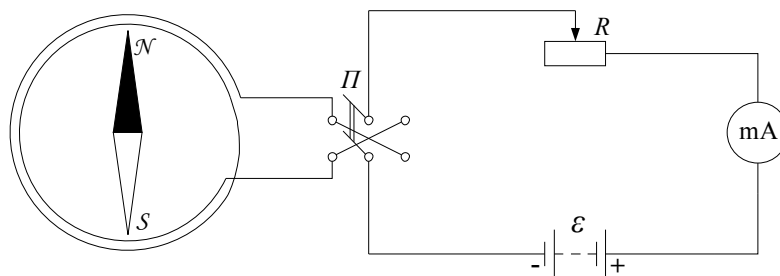


Рис. 4

5. Замкніть коло перемикачем Π і, пересуваючи ковзний контакт реостату, встановіть струм $30 \div 50$ мА.
6. Визначте кут відхилення α магнітної стрілки. Для цього визначте кути відхилення кінців стрілки α_1 , α_2 при пропусканні струму в одному напрямі,

потім – α_3, α_4 при пропусканні струму в протилежному напрямі. Напрямок струму змінюється при зміні положення перемикача Π . Знайдіть середнє арифметичне:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4}.$$

7. Обчисліть радіус кільця провідника зі струмом, вимірявши діаметр круглої рамки, на яку намотано дріт.

8. За формулою (5) обчисліть горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі B_0 .

9. Дослід повторіть не менше трьох раз при різних значеннях сили струму. Знайдіть $B_0^{сер}$.

10. Результати роботи можна оформити у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1.

№ п/п	n	$R, \text{ м}$	$I, \text{ А}$	$\bar{\alpha}, \text{ град}$	$B_0, \text{ Тл}$	$\Delta B_0, \text{ Тл}$
1						
2						
...						
Середнє			–	–		

Контрольні запитання

1. Прояви земного магнетизму.
2. Що називають "магнітним схиленням" і "магнітним нахиленням"? Як змінюється магнітне нахилення при переході від екватора до полюса?
3. Опишіть метод визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі, використаний у даній роботі.
4. У яких одиницях вимірюється індукція магнітного поля?
5. Як знайти напрям і числове значення індукції магнітного поля в центрі колового струму?

ВИВЧЕННЯ ПЕТЛІ МАГНІТНОГО ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНЕТИКА З ДОПОМОГОЮ ОСЦИЛОГРАФА

Мета роботи: отримати осцилограму петлі магнітного гістерезису та визначити динамічну магнітну проникність μ_d , коерцитивну силу H_k , залишкову індукцію B_0 та втрати енергії на перемагнічування феромагнетика.

Прилади та матеріали: електронний осцилограф, тороїд, амперметр, вольтметр, резистори R_1 і R_2 , конденсатор, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Якщо феромагнетик помістити в змінне магнітне поле H_d , амплітудне значення якого H_m приводить його до стану насичення, то при періодичній зміні магнітного поля від $+H_m$ до $-H_m$ магнітна індукція феромагнетика буде описувати *динамічну петлю гістерезису* (рис. 1). На цьому ж рисунку пунктиром вказана *статична петля гістерезису*.

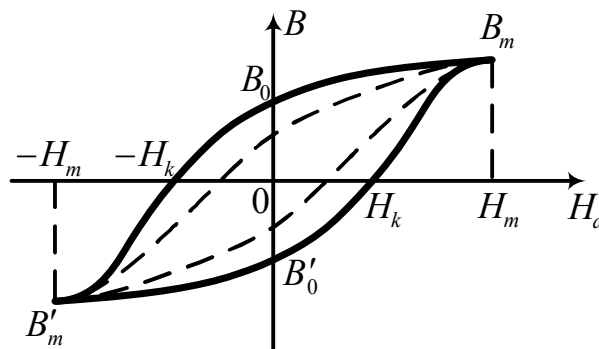


Рис. 1

Для отримання осцилограми динамічної петлі гістерезису на горизонтальний підсилювач осцилографа слід подавати напругу, пропорційну напруженості поля H_d , що намагнічує феромагнетик, а на вертикальний підсилювач – напругу, пропорційну миттєвим значенням магнітної індукції B . У цьому випадку на екрані з'явиться замкнена крива, що відображає в деякому масштабі динамічну петлю гістерезису. У змінних магнітних полях магнітні властивості феромагнетиків характеризуються динамічною магнітною проникністю:

$$\mu_d = \frac{B_m}{H_m}, \quad (1)$$

де B_m – амплітудне значення індукції;

$$\mu_d = \mu_r \cdot \mu_0,$$

μ_r – відносна магнітна проникність, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Площа динамічної петлі гістерезису дещо більша площі статичної петлі (див. рис. 1), тому що вона відповідає втратам енергії магнітного поля, що намагнічує феромагнетик, не тільки на магнітний гістерезис, але й на вихрові струми та магнітну в'язкість. Величина втрат енергії W за один цикл перемагнічування чисельно дорівнює площі петлі гістерезису:

$$W = S \cdot h \cdot b, \quad (2)$$

де $h \cdot b$ – масштабна одиниця зображення петлі.

Вимірювальна схема та прилади

Для отримання осцилограми петлі гістерезису збирають схему, зображену на рис. 2.

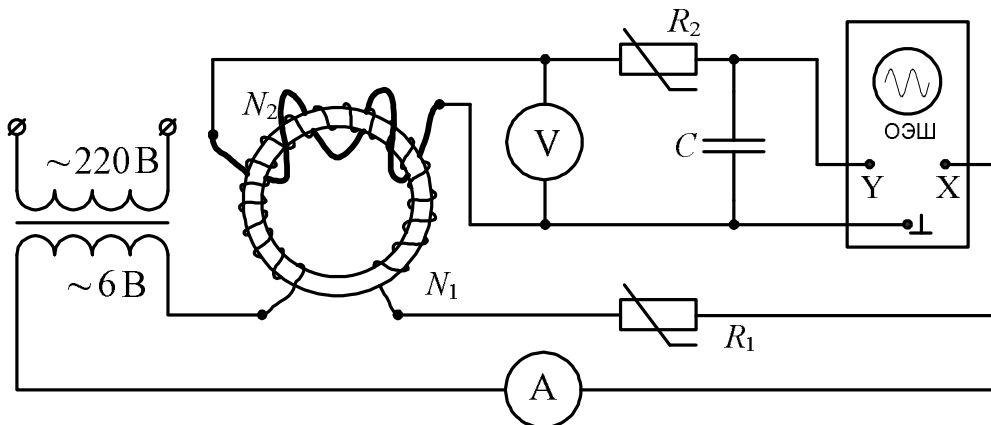


Рис. 2

Тор T виготовлено з досліджуваного феромагнетика, на нього намотано дві обмотки. Одна з них N_1 (первинна) має кільцеподібну форму, живиться від трансформатора ($\nu = 50$ Гц) і призначена для створення змінного магнітного поля H_d , яке намагнічує тор. У коло цієї обмотки ввімкнено амперметр A і резистор R_1 , з якого подається напруга U_H на горизонтальний підсилювач осцилографа. Миттєві значення цієї напруги пропорційні миттєвим значенням H_d магнітного поля:

$$H_d = \frac{I \cdot N_1}{l} = \frac{U_H \cdot N_1}{R_1 \cdot l}, \quad (3)$$

де N_1 – кількість витків первинної обмотки; l – довжина середньої лінії тороїда.

Для створення напруги, пропорційної миттєвим значенням магнітної індукції в осерді, використовується вторинна обмотка N_2 , яка намотана на частину тора. У коло ввімкнений вольтметр V , резистор R_2 та конденсатор C . Напруга U_B з обкладинок конденсатора підводиться на вертикальний підсилювач осцилографа. Можна показати, що вона пропорційна B [див. формулу (2)]:

$$U_B = -\frac{S \cdot N_2}{C \cdot R_2} B, \quad (4)$$

де S – площа обкладинок конденсатора; N_2 – кількість витків; C – ємність конденсатора

Масштаб зображення динамічної петлі гістерезису визначається наступним чином. Згідно (3) можна записати:

$$H_m = \frac{I_m \cdot N_1}{l} = \frac{I_{ef} \sqrt{2} \cdot N_1}{l}, \quad (5)$$

де I_m , I_{ef} – відповідно максимальне та діюче значення сили струму. У даній роботі $N_1 = 4200$ витків, $l = 360$ мм; I_{ef} – покази амперметра. За допомогою міліметрівки визначаємо довжину відрізка $OH_m = L_H$ на осцилографі та знаходимо горизонтальний масштаб:

$$h = \frac{H_m}{L_H}, \quad (6)$$

Для визначення b знайдемо магнітну індукцію, використовуючи формулу (4):

$$B_m = \frac{U_m \cdot C \cdot R_2}{S \cdot N_2} = \frac{U_{ef} \sqrt{2} \cdot C \cdot R_2}{S \cdot N_2}, \quad (7)$$

У даній роботі $C = 32$ мкФ; $R_2 = 1000$ Ом; $S = 30$ мм²; $N_2 = 140$ витків. За допомогою міліметрівки знаходимо довжину $OB_m = L_B$ на осцилографі та обчислюємо вертикальний масштаб:

$$b = \frac{B_m}{L_B}, \quad (8)$$

Хід роботи

1. Зібрати схему згідно рис. 2.
2. Увімкнути осцилограф. Перемикач “Діапазони розгортки” повинен бути в положенні “0”. Підсилення X , Y поставити на нуль.
3. Отримати в центрі екрану сфокусовану світлову точку.
4. Увімкнути трансформатор у мережу.
5. Регулюючи вертикальне та горизонтальне підсилення, отримати на екрані зображення петлі гістерезису.
6. Записати покази I_{ef} амперметра й U_{ef} вольтметра.
7. Скопіювати зображення на папір з нанесеною на нього координатною сіткою.
8. За формулою (5) обчисліть H_m ; на осцилограмі виміряйте довжину відрізка OH_m в міліметрах і за формулою (6) знайдіть h .
9. За формулою (7) обчисліть B_m ; на осцилограмі виміряйте довжину відрізка OB_m в міліметрах і за (6) знайдіть b .
10. За допомогою осцилограми й знайдених значень h і b визначте числове значення коерцитивної сили H_k та залишкової індукції B_0 .
11. Обчисліть за формулою (1) динамічну магнітну проникність μ_d .
12. За допомогою координатної сітки визначте площу петлі гістерезису в квадратних міліметрах і за формулою (2) визначте величину втрат енергії W .

Контрольні запитання

1. Феромагнетик та їх властивості.
2. Природа феромагнетизму.
3. Як можна розмагнітити постійний магніт?
4. Чому на металургійних заводах для підняття розжареного металу не використовують електромагніти?
5. Чим відрізняються феромагнітні речовини від діа- та парамагнітних?

ВИВЧЕННЯ ЗАТУХАЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ

Мета роботи: одержати й спостерігати за допомогою осцилографа затухаючі електромагнітні коливання. Ознайомитись з основними кількісними характеристиками затухаючих коливань.

Прилади та матеріали: електронний осцилограф, котушка індуктивності, магазин ємностей, магазин резисторів Р-33, джерело змінного струму на 6 В, напівпровідниковий діод, електронний вольтметр, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Періодичні зміни взаємозв'язаних електричного й магнітного полів називають *електромагнітними коливаннями*. Для одержання електромагнітних коливань використовують *коливальний контур* – коло, яке складається з конденсатора ємністю C і котушки індуктивністю L . Оскільки котушка завжди має активний опір, то коливальний контур містить, крім C і L , ще й опір R (рис. 1).

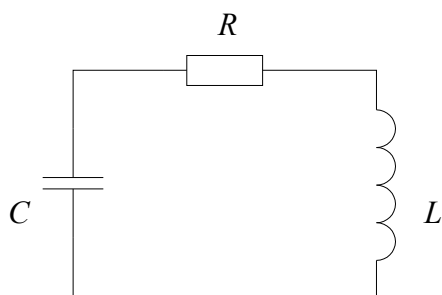


Рис. 1

Якщо зарядити конденсатор і приєднати його до котушки, то в колиальному контурі виникнуть електромагнітні коливання. Періодично змінюватимуться з часом заряд конденсатора q , напруга на ньому u , сила струму в контурі i . Якби не було втрат енергії (тобто якби $R = 0$), то максимальні значення цих величин були б постійними; такі коливання називають *власними* або *незатухаючими*. Власні коливання

характеризуються *періодом коливань* T і *частотою* ν . *Періодом коливань називають час, за який здійснюється одне коливання. Частота – це кількість коливань за одну секунду.*

З означень випливає співвідношення між T і ν :

$$T = \frac{1}{\nu}.$$

Рівняння власних коливань мають вигляд:

$$q = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

$$u = U_0 \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega q_0 \sin(\omega t + \varphi_0), \quad \text{або} \quad i = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}), \quad (3)$$

де q_0 , U_0 , I_0 – це максимальні значення заряду, напруги та сили струму, які називають відповідно амплітудою заряду, напруги та сили струму; ω – це циклічна частота, що дорівнює:

$$\omega = 2\pi\nu \quad \text{або} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (4)$$

Вираз $(\omega t + \varphi_0)$ називається **фазою коливань**, φ_0 – це початкова фаза. З (1) і (2) видно, що заряд конденсатора й напруга на ньому здійснюють коливання, що співпадають за фазою. Порівняння (2) і (3) показує, що між напругою та силою струму в коливальному контурі існує зсув фаз $\frac{\pi}{2}$.

Графік незатухаючих коливань подано на рис. 2.

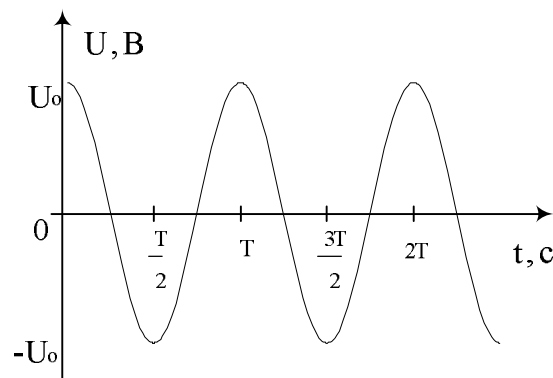


Рис. 2

Період власних коливань у коливальному контурі визначається формулою Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (5)$$

У реальному контурі завжди мають місце втрати енергії, тому амплітуда коливань з часом зменшується. Такі коливання називають **затухаючими** або **вільними коливаннями**. Рівняння цих коливань мають вигляд:

$$q = q_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t, \quad (6)$$

$$u = U_0 e^{-\alpha t} \cos \omega t, \quad (7)$$

$$i = I_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (8)$$

У рівняннях (6) ÷ (8) в показнику експоненти стоїть величина $\alpha = \frac{R}{2L}$; (9) її називають **коефіцієнтом згасання**.

Обернена до α величина $\tau = \frac{1}{\alpha}$ називається **часом релаксації**; τ – це проміжок часу, протягом якого амплітуда згасаючих коливань зменшується в e раз. За цей час система здійснює N_e коливань, де $N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\alpha T}$.

Циклічна частота згасаючих коливань дорівнює:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \quad (10)$$

де ω_0 – частота власних коливань контуру, яка дорівнює:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (11)$$

Якщо $\omega_0^2 \gg \alpha^2$, то можна вважати, що $\omega = \omega_0$.

Графік згасаючих коливань $U = U(t)$ (суцільна крива), показано на рис. 3. Штриховою лінією на цьому ж малюнку показано залежність максимального відхилення U_m від часу:

$$U_m = U_0 e^{-\alpha t}. \quad (12)$$

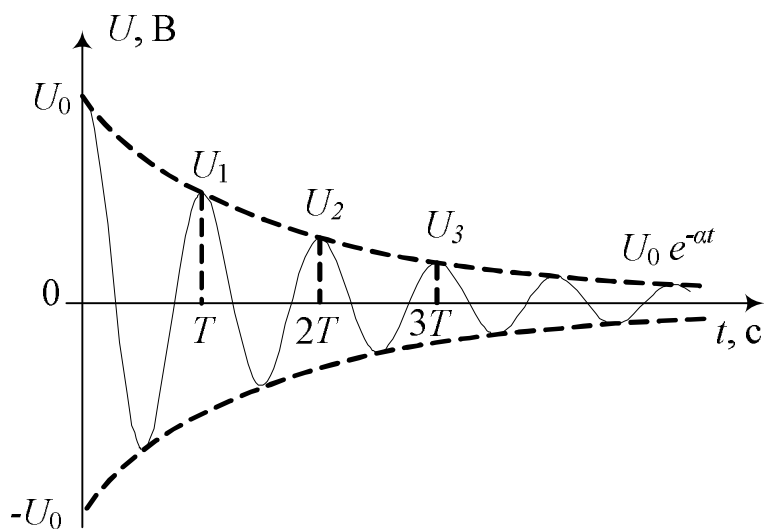


Рис. 3

Крім коефіцієнта згасання α згасаючі коливання характеризують **декрементом згасання D** , **логарифмічним декрементом згасання δ** та **добротністю Q** . **Декрементом згасання** називають відношення двох

послідовних амплітуд U_1 і U_2 , що відповідають моментам часу t_1 і t_2 , які відрізняються на період:

$$D = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U(t_1)}{U(t_1 + T)} = \frac{U_0 e^{-\alpha t_1}}{U_0 e^{-\alpha(t_1 + T)}} = e^{\alpha T}. \quad (13)$$

Натуральний логарифм декременту затухання називають **логарифмічним декрементом затухання**:

$$\delta = \ln D = \alpha T. \quad (14)$$

Добротність системи характеризує втрати енергії коливань; вона дорівнює:

$$Q = \frac{\pi}{\delta} = \frac{\pi}{\alpha T} = \pi N_e. \quad (15)$$

Оскільки $\alpha = \frac{R}{2L}$, то $\delta = \frac{RT}{2L}$,

$$\text{а } Q = \frac{\pi \cdot 2L}{RT} = \frac{\pi \cdot 2L}{R \cdot 2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Графік затухаючих коливань можна одержати на екрані осцилографа. За цим графіком визначають декремент затухання та логарифмічний декремент; знаючи параметри контура (L , C і R), обчислюють коефіцієнт затухання та добротність.

Графік затухаючих коливань одержують за допомогою установки, схема якої зображена на рис. 4.

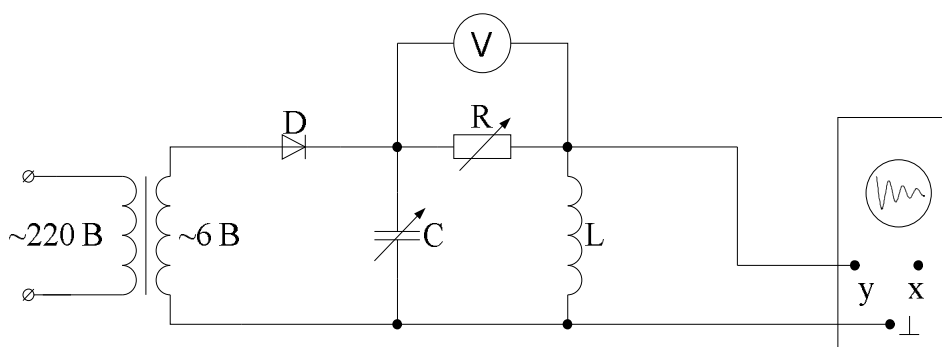


Рис. 4

Коливальний контур живиться пульсуючою напругою, яку одержують за допомогою діода D ; C – магазин ємностей $0,25 \div 4$ мкФ; L – котушка від універсального трансформатора на 220 В, індуктивність якої $L = 50,2$ мГн, активний опір $R_A = 26$ Ом; R – магазин опорів від 0 до 100 Ом. Для одержання стійкої картини на екрані осцилографа ручки на верхній (або боковій) панелі осцилографа встановлюють у положення: подільник напруги Y – у положення 220 В; ручками \longleftrightarrow та \updownarrow зображення переміщують у центр екрану; ручка

„синхронізація” – „від мережі”; „діапазон розгортки” – „30”; „підсилення Y ” – на максимум, „підсилення X ” – у середньому положенні.

Хід роботи

1. Зберіть коло згідно рис. 4 і дайте його на перевірку викладачеві.
2. Увімкніть осцилограф і джерело змінної напруги 6 В. Одержіть на екрані нерухому картину затухаючих коливань (опір $R = 0$ Ом).
3. Змінюючи ємність C , спостерігайте на екрані за зміною періоду коливань. Замалюйте в зошит графік затухаючих коливань для ємностей $C_1 = 1$ мкФ і $C_2 = 2$ мкФ.
4. Розрахуйте за формулою (5) період затухаючих коливань, частоту й циклічну частоту, нехтуючи α (оцініть, яка похибка при цьому допускається).
5. Вимірявши відповідні амплітуди на графіку, визначте $D = \frac{U_1}{U_2}$; обчисліть $\delta = \ln D$ та $\alpha = \frac{\delta}{T}$.
6. Порівняйте одержане значення α з розрахованим за формулою (9).
7. Змініть опір R і повторіть вимірювання та обчислення для опорів $R = 10$ Ом та 20 Ом.
8. Виміряйте напругу на конденсаторі U_0 електронним вольтметром.
9. Виміряйте напругу на магазині опорів R та обчисліть струм I_0 у контурі.
10. Напишіть формули для миттєвих значень напруги на конденсаторі та струму в контурі як функції часу, використавши одержані значення U_0, I_0, ω .

Контрольні запитання

1. Чому дорівнює різниця фаз між напругою та силою струму в коливальному контурі?
2. Який процес називають аперіодичним? При якій умові такий процес матиме місце в коливальному контурі?
3. Як за графіком знайти декремент затухання?
4. Що називають логарифмічним декрементом затухання?
5. Від чого залежить коефіцієнт затухання?
6. Що називають добротністю коливної системи? Як вона зв'язана з логарифмічним декрементом?

ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ ТА ОПОРУ МЕТОДОМ ПОРІВНЯННЯ З ДОПОМОГОЮ НЕОНОВОЇ ЛАМПИ

Мета роботи: ознайомитись з методом вимірювання великих ємностей та опорів з допомогою неонові лампи.

Прилади та матеріали: джерело постійної напруги 110÷150 В; неонові лампа, конденсатор відомої ємності (1÷2 мкФ), магазин резисторів (від 1 до 10 МОм), конденсатор невідомої ємності, резистор невідомого опору, вимикач, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Схема, що використовується в даній роботі, зображена на рис. 1.

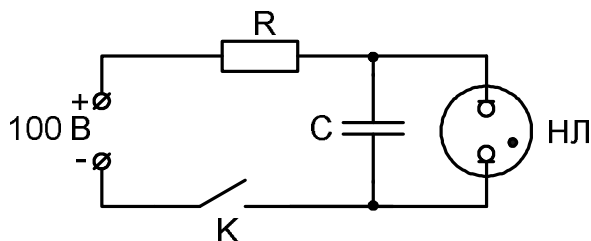


Рис. 1



Рис. 2

У схемі джерело постійної напруги, резистор R , і конденсатор C з'єднані послідовно. Неонові лампа $НЛ$ приєднана паралельно до конденсатора. Неонові лампа (рис. 2) складається зі скляного балончика, з якого викачане повітря та який заповнений неоном під тиском у декілька мм ртутного стовпчика. Усередині балончика розташовані два металевих електроди, з'єднані з цоколем $НЛ$.

Якщо замкнути коло вимикачем K , то конденсатор почне заряджатись від джерела. Різниця потенціалів на його обкладках буде збільшуватись до тих пір, поки не досягне деякого значення U_z (напруга запалювання розряду), при якому в $НЛ$ виникне тліючий розряд, і вона почне проводити струм. При цьому конденсатор почне розряджатись через лампу і напруга на його обкладках буде зменшуватись. Коли вона зменшиться до значення U_z (напруга, при якій розряд припиняється), розряд у лампі зникне, і напруга на конденсаторі знову почне збільшуватись. Процеси зарядки конденсатора від джерела напруги й розрядки його через $НЛ$ будуть періодично повторюватись. Залежність напруги на конденсаторі від часу показана на рис. 3. Розряд конденсатора через $НЛ$

супроводжується спалахом. Проміжок часу між двома послідовними спалахами $t_2 - t_1$ можна вважати рівним часу зарядки конденсатора $T = t_2 - t_1'$, оскільки час розряду $t_1' - t_1$ дуже малий (тому що опір НЛ під час розряду набагато менший R). Час T залежить від параметрів схеми.

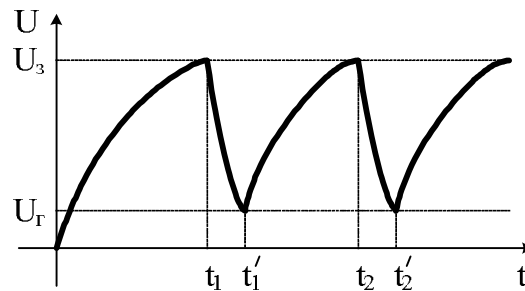


Рис. 3

Згідно другого закону Кірхгофа для кола на рис. 1. у будь-який момент часу виконується співвідношення:

$$i \cdot R + u = \mathcal{E}, \quad (1)$$

де: i – струм у колі, R – опір, u – напруга на обкладках конденсатора, \mathcal{E} – електрорушійна сила джерела (внутрішнім опором джерела нехтуємо).

Оскільки $i = \frac{dq}{dt}$, а $q = C \cdot u$, то $i = C \frac{du}{dt}$, і рівняння (1) можна подати у вигляді:

$$RC \frac{du}{dt} + u = \mathcal{E}. \quad (2)$$

Для елемента часу dt одержимо:

$$dt = RC \frac{du}{\mathcal{E} - u}. \quad (3)$$

У рівнянні (3) R , C , і \mathcal{E} мають постійні значення. Інтегруючи (3) від t_1 до t_2 , знайдемо час зарядки конденсатора T :

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = RC \int_{U_2}^{U_3} \frac{du}{\mathcal{E} - u};$$

$$T = t_2 - t_1 = RC \ln \frac{\mathcal{E} - U_2}{\mathcal{E} - U_3}. \quad (4)$$

Значення $\ln \frac{\mathcal{E} - U_2}{\mathcal{E} - U_3} = k$ є сталою величиною; тому (4) можна переписати так:

$$T = kRC. \quad (5)$$

Це співвідношення є основою методу порівняння, який вивчається в даній роботі.

Нехай у коло під'єднаний конденсатор відомої ємності C_0 . Час його зарядки дорівнює:

$$T_0 = kRC_0. \quad (6)$$

Якщо тепер у коло замість C_0 під'єднати конденсатор невідомої ємності C_1 , залишивши без зміни всі інші елементи схеми, то час його зарядки буде дорівнювати:

$$T_1 = kRC. \quad (7)$$

Поділивши (6) на (7), після перетворень одержимо:

$$C_1 = C_0 \frac{T_1}{T_0}. \quad (8)$$

Аналогічно можна визначити невідомий опір резистора R_1 , якщо є резистор з відомим опором R_0 :

$$R_1 = R_0 \frac{T_1'}{T_0}. \quad (9)$$

Оскільки час зарядження конденсатора (тобто проміжок часу між двома спалахами *НЛ*) визначається візуально з допомогою секундоміра, то таким методом можна вимірювати лише великі ємності й опори.

Хід роботи

1. Зберіть коло, що складається з конденсатора відомої ємності C_0 , магазину резисторів і *НЛ* згідно рис.1.
2. Після перевірки схеми викладачем, замкніть коло ключем K . Підберіть у магазині опорів такий опір R_0 , щоб спалахи не були надто частими.
3. Запишіть значення C_0 і R_0 в таблицю, яку складіть самостійно.
4. Тричі виміряйте секундоміром час 50 спалахів *НЛ*. Обчисліть середнє значення періоду зарядки конденсатора T_0 .
5. Розімкніть коло й замініть конденсатор відомої ємності C_0 конденсатором невідомої ємності C_1 .
6. Замкніть коло й визначте час зарядки T_1 конденсатора невідомої ємності. (так само, як визначався період T_0 ; див.п.4). Визначте C_1 за формулою (8).
7. Якщо спалахи *НЛ* після заміни конденсатора будуть дуже частими, приєднайте паралельно конденсатору C_1 конденсатор C_0 .

У цьому випадку:

$$C_1 = C_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right), \quad (10)$$

де T_1 – час зарядки батареї з двох конденсаторів.

Замість під'єднання до C_1 конденсатора C_0 можна досягнути зручної для підрахунку частоти спалахів, збільшивши опір магазину. Тоді ємність

$$C_1 = C_0 \frac{T_1 R_0}{T_0 R_1}, \quad (11)$$

де R_1 – нове значення опору магазину.

Після закінчення вимірювань розімкніть коло ключем K .

8. Зберіть коло, що складається з конденсатора відомої ємності C_0 , $НЛ$ і резистора з невідомим опором R_1 .
9. Замкніть коло й визначте час заряджання конденсатора T_1' . Обчисліть R_1 за формулою (9).
9. Якщо спалахи $НЛ$ відбуваються дуже часто, то приєднайте послідовно з опором R_1 магазин опорів і підберіть на магазині опорів такий опір R_2 , щоб спалахи було зручно лічити. У цьому випадку невідомий опір:

$$R_1 = R_0 \frac{T_2}{T_0} - R_2, \quad (12)$$

Контрольні запитання

1. Що називають електроємністю та від чого вона залежить?
2. Запишіть формули для ємності плоского, сферичного й циліндричного конденсаторів.
3. Розкажіть про розряди в газах.
4. Як треба змінити коло, якщо після заміни конденсатора відомої ємності конденсатором невідомої ємності спалахи $НЛ$ відбуваються дуже часто й полічити їх не вдається?

ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: експериментально перевірити закон Ома для кола змінного струму. Порівняти експериментальні дані з теоретичними розрахунками.

Прилади й матеріали: котушка індуктивності з осердям, магазин ємностей, РНШ, реостат (1000 Ом), мультиметр типу DT830B, міліамперметр, вимикач, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Нехай генератор змінного струму створює на ділянці кола синусоїдальну змінну напругу:

$$u = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi\nu$, частота $\nu = 50 \text{ Гц}$, отже $\omega = 314 \text{ рад/с}$.

Якщо ділянка кола містить лише активний опір R , то сила струму в колі згідно закону Ома дорівнюватиме:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t \text{ або } i = I_m \cos \omega t. \quad (2)$$

Отже, в колі з активним опором різниця фаз коливань струму й напруги дорівнює нулеві.

Векторна діаграма напруги на активному опорі має вигляд:

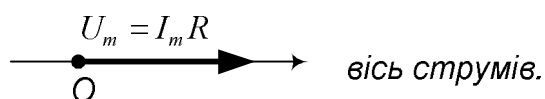


Рис. 1

Припустимо тепер, що ділянка кола містить лише конденсатор ємністю C .

Оскільки напруга на конденсаторі $u = \frac{q}{C}$, то

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t.$$

Заряд конденсатора змінюється за гармонічним законом:

$$q = CU_m \cos \omega t. \quad (3)$$

Сила струму $i = \frac{dq}{dt}$, тому

$$i = -\omega C U_m \sin \omega t \text{ або } i = \omega C U_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (4)$$

У колі з конденсатором коливання сили струму випереджають коливання напруги на конденсаторі на $\pi/2$.

Амплітуда сили струму $I_m = \omega C U_m$; позначивши $\frac{1}{\omega C} = X_c$, це співвідношення можна записати у вигляді $I_m = \frac{U_m}{X_c}$, який подібний до закону Ома. Величину X_c називають *ємнісним опором*. Векторна діаграма напруги на конденсаторі має вигляд:

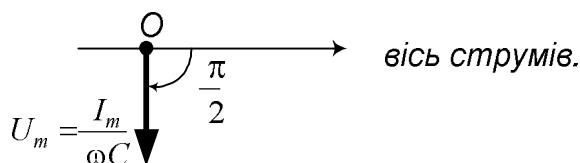


Рис. 2

Розглянемо, нарешті, ділянку кола, що містить лише котушку, індуктивність якої L . Будемо вважати, що активний опір котушки дорівнює нулеві. При зміні сили струму в котушці виникне е.р.с. самоіндукції, тому в цьому випадку слід застосувати закон Ома для ділянки кола з е.р.с.:

$$u = iR - \varepsilon.$$

Ми припустили, що $R = 0$, а $\varepsilon = -L \frac{di}{dt}$, тобто $u = L \frac{di}{dt}$.

Оскільки напруга змінюється згідно (1), то: $U_m \cos \omega t = L \frac{di}{dt}$.

Розділимо змінні та проінтегруємо: $\int di = \frac{U_m}{L} \int \cos \omega t dt$

$i = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t + const$; оскільки при $t = 0$ сила струму $i = 0$, то $const = 0$.

Використавши формули приведення, одержимо:

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (5)$$

У колі з індуктивністю коливання сили струму відстають від коливань напруги на $\pi/2$.

Амплітуда сили струму $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$; Добуток $\omega L = X_L$ називається *індуктивним опором*. Векторна діаграма напруги на індуктивності має вигляд:

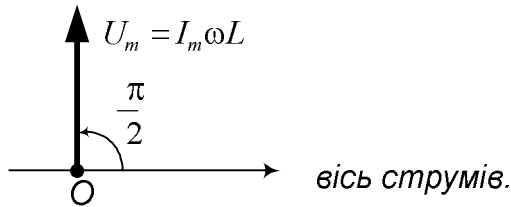


Рис. 3

Розглянемо тепер ділянку кола, що містить усі три елементи: активний опір R , ємність C та індуктивність L , з'єднані послідовно (рис. 4).

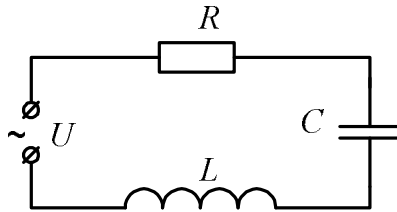


Рис. 4

Нехай напруга на генераторі визначається рівнянням (1). Сила струму змінюється також за гармонічним законом:

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

де φ – різниця фаз між струмом і напругою.

Визначимо I_m та φ з допомогою методу векторних діаграм. U_A називають *активною складовою напруги*, U_P – *реактивною складовою*.

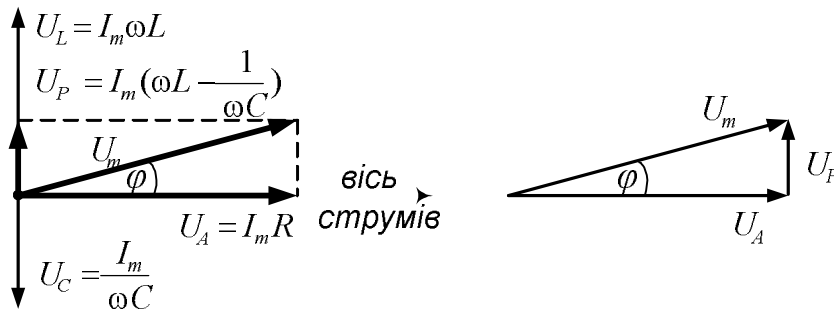


Рис. 5

Повна напруга $U_m = \sqrt{U_A^2 + U_P^2}$ або:

$$U_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + I_m^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2};$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (7)$$

Рівняння (7) можна подати у вигляді:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \quad (7a)$$

Рівняння (7a) називають *законом Ома для кола змінного струму*, а величину (8) називають повним опором кола змінного струму або імпедансом.

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (8)$$

З трикутника напруг на рис. 5 визначимо також зсув фаз між струмом і напругою:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_P}{U_A} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (9)$$

Хід роботи

- Зберіть коло за схемою (див. рис. 6). Як джерело змінного струму використайте РНШ, встановивши його регулятор на нуль. До перевірки схеми викладачем джерело напруги не під'єднуйте.

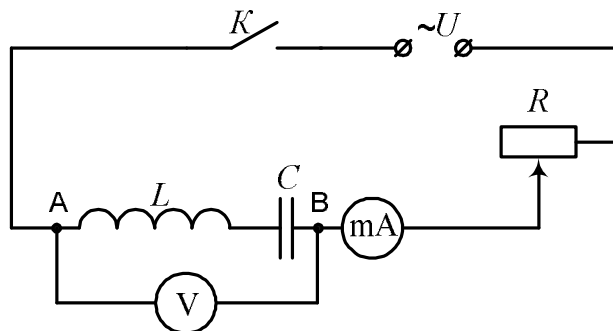


Рис. 6

- Замкніть вимикач. Струм тривалий час пропускати не слід, тому що від нагрівання змінюється активний опір котушки. Реостат установіть на максимальний опір.
- Використовуючи регулятор РНШ та змінюючи опір реостату отримайте достатні покази міліамперметра. Під'єднавши до ділянки *AB* мультиметр визначте U_{ef} . Запишіть отримані значення I_{ef} і U_{ef} в табл. 1. Врахуємо, що котушка L в колі змінного струму має активний опір R_L та індуктивний опір X_L . При невеликих частотах коливання сили струму (50 Гц) котушку можна зображати як послідовне з'єднання L та R_L . У такому

випадку ділянка AB на рис. 6 містить три послідовно з'єднані елементи, зображені на рис. 7.

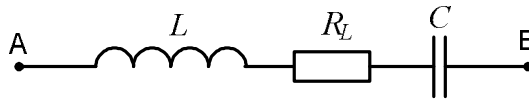


Рис. 7

Ми досліджуємо саме ці три послідовно з'єднані елементи в колі змінного електричного струму.

4. Дослід повторіть три рази, змінюючи реостатом R загальний опір у колі. Кожного разу отримані значення записуйте в таблицю 1.
5. Обчисліть повний опір Z_e за формулою $Z_e = \frac{U_{ef}}{I_{ef}}$.
6. Уточніть значення R_L , L та C у викладача і знайдіть за формулою (8) повний опір Z .
7. Порівняйте значення Z_e і Z , отримані в пунктах 5 і 6 відповідно.
8. Знайдіть абсолютну $\Delta Z = Z - Z_e$ і відносну $E = \frac{\Delta Z}{Z}$ похибку вимірювань і запишіть кінцевий результат.

Таблиця 1

№ п/п	I_{ef}	U_{ef}	Z_e	Z	ΔZ	E
1				-	-	-
2				-	-	-
3				-	-	-
середнє	-	-				

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для повного кола.
2. Що називають активним, індуктивним та ємнісним опором? Від чого він залежить?
3. Чому дорівнюють максимальне, середнє та діюче значення струму й напруги в колі змінного струму?
4. Чому дорівнюють $\cos\phi$ та ϕ з ваших експериментальних даних? Зобразіть схематично векторну діаграму напруг.

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДКИ ТА РОЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: Експериментально перевірити закон зарядки та розрядки конденсатора через опір. Навчитись визначати сталу часу кола (час релаксації) та значення ємності конденсатора чи опору резистора.

Прилади й матеріали: Складальний стенд з елементами [3] – 3 од., [14] – 1 од., [15] – 1 од., [19] – 1 од., [33] – 2 од., [44] – 2 од., мультиметр типу DT830В, секундомір.

Теоретичні відомості

Розглянемо коло, що складається з джерела струму з електрорушійною силою \mathcal{E} і внутрішнім опором r , конденсатора, ємність якого C , опору R та перемикача SA (див. рис. 1).

Якщо перемикач SA поставити в положення 1, то конденсатор почне заряджатися від джерела через опір $(R+r)$. Якщо перевести перемикач в положення 2, то конденсатор почне розряджатись через опір R . Оскільки внутрішній опір джерела $r \ll R$, то будемо вважати, що в обох випадках опір кола дорівнює R .

Розглянемо спочатку процес заряджання конденсатора (SA в положенні 1). Застосуємо до цього контуру друге правило Кірхгофа:

$$i \cdot R + u = \mathcal{E}, \quad (1)$$

де i – миттєве значення сили струму, u – миттєве значення напруги на конденсаторі. Враховуючи, що $i = \frac{dq}{dt}$, де q – заряд конденсатора, дорівнює $q = Cu$, одержимо:

$$\frac{du}{dt} RC + u = \mathcal{E}. \quad (2)$$

Вираз (2) – це диференціальне рівняння першого порядку зі сталими коефіцієнтами. Перепишемо його наступним чином:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\mathcal{E} - u}{RC}. \quad (3)$$

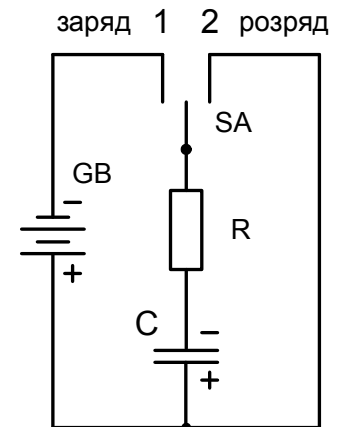


Рис. 1

Уведемо нову змінну $u' = \mathcal{E} - u$ (при цьому $du' = -du$):

$$-\frac{du'}{dt} = \frac{1}{RC}u'. \quad (4)$$

Розділимо змінні та проінтегруємо:

$$\ln u' = -\frac{t}{RC} + A, \quad (5)$$

де A – стала інтегрування, яку знайдемо з початкових умов: при $t = 0$ $u = 0$, а $u' = \mathcal{E}$. Отже, $A = \ln \mathcal{E}$.

Після потенціювання виразу (5) матимемо:

$$u' = \mathcal{E} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (6)$$

Повертаючись до змінної u остаточно одержимо:

$$u = \mathcal{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (7)$$

Напруга на конденсаторі з часом зростає за експоненціальним законом, асимптотично наближаючись до значення електрорушійної сили джерела. Такий процес зміни фізичної величини називають *апериодичним*.

Залежність зарядного струму від часу знайдемо з (1) і (7):

$$i = \frac{\mathcal{E} - u}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (8)$$

Сила струму також змінюється за експоненціальним законом, вона має найбільше значення в початковий момент часу й асимптотично прямує до нуля в процесі заряджання.

Тепер розглянемо процес розрядження конденсатора (SA в положенні 2). За правилом Кірхгофа:

$$iR + u = 0, \text{ де } i = \frac{dq}{dt}, q = Cu.$$

Одержуємо рівняння:

$$\frac{du}{dt} + \frac{u}{RC} = 0. \quad (9)$$

Розділимо змінні й проінтегруємо:

$$\ln u = -\frac{t}{RC} + B. \quad (10)$$

Сталу інтегрування B знайдемо з початкових умов: при $t = 0$ $u = U_0$. Отже, $B = \ln U_0$. Після потенціювання матимемо:

$$u = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (11)$$

Якщо в процесі заряджання напруга на конденсаторі досягла максимального значення, рівного е.р.с. джерела, то $U_0 = \mathcal{E}$:

$$u = \mathcal{E} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (12)$$

Струм розрядження:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (13)$$

Напруга й сила струму змінюються за експоненціальним законом, мають максимальні значення в початковий момент часу й асимптотично прямують до нуля.

Звернемо увагу на тотожність виразів для зарядного (8) і розрядного (13) струмів. Нагадаємо, що такий результат одержано в припущенні, що внутрішнім опором джерела можна знехтувати.

Одержані результати показують, що процеси зарядження й розрядження конденсатора (встановлення електричної рівноваги) відбуваються не миттєво, а з кінцевою швидкістю. Для розглянутого кола, що складається з конденсатора й резистора, швидкість установаження рівноваги залежить від добутку:

$$\tau = RC, \quad (14)$$

який має розмірність часу й називається **сталюю часу** даного кола або **часом релаксації**. Стала часу показує, через який час після початку розрядки напруга на обкладках конденсатора зменшиться в e раз ($e \approx 2,71$). Визначити час релаксації можна наступним чином.

Одержимо з експерименту залежність струму зарядження (чи розрядження) від часу $i = f(t)$, що повинна мати вигляд експоненціальної залежності (8): $i = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$ ($I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$ – максимальне значення струму зарядження). Дані експерименту подамо у вигляді графіку залежності $\ln \frac{i}{I_0} = \varphi(t)$. Якщо залежність $i = f(t)$ має вид (8), то $\ln \frac{i}{I_0} = -\frac{t}{RC}$, тобто графік матиме вид прямої лінії. Приклад такого графіку наведено на рис. 2. З графіку визначаємо $RC = \frac{t}{\ln(i/I_0)}$.

Наприклад, для часу $t = 80c$ значення $\ln(i/I_0) = 1,53$. Отже, час релаксації дорівнює:

$$\tau = \frac{80c}{1,53} = 52c.$$

Цей же результат можна знайти ще й так. При $\ln(i/I_0) = 1$ час $t = \tau$, тобто час релаксації дорівнює абсцисі точки, у якої ордината дорівнює одиниці.

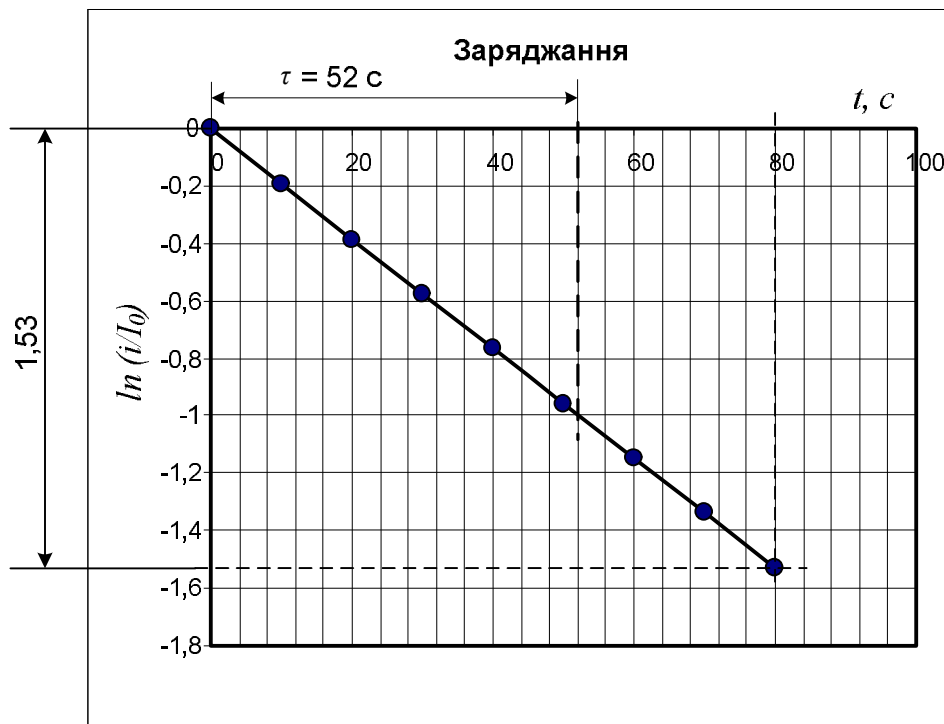


Рис. 2

Опис схеми для вимірювання

Схему електричного кола, що використовується для дослідження процесу заряджання конденсатора, наведено на рис. 3, а вигляд панелі з елементами електричного кола – на рис. 4.

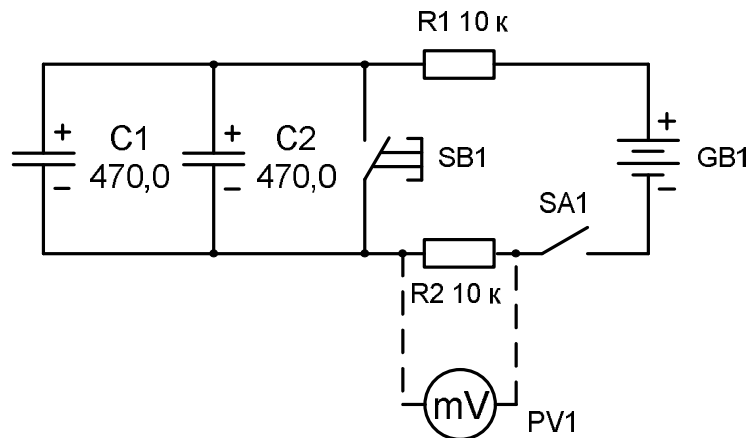


Рис. 3

Для забезпечення достатньої ємності використано два паралельно з'єднаних конденсатора $C1$ і $C2$ ємністю по 470 мкФ. Заряджання конденсатора здійснюється через два послідовно з'єднаних резистора опором 10 кОм кожний. Такі значення елементів кола забезпечують сталу близько 20 секунд, що цілком достатньо для виконання вимірювань. Як джерело струму використовується батарея з двох з'єднаних послідовно гальванічних елементів чи акумуляторів типорозміру АА.

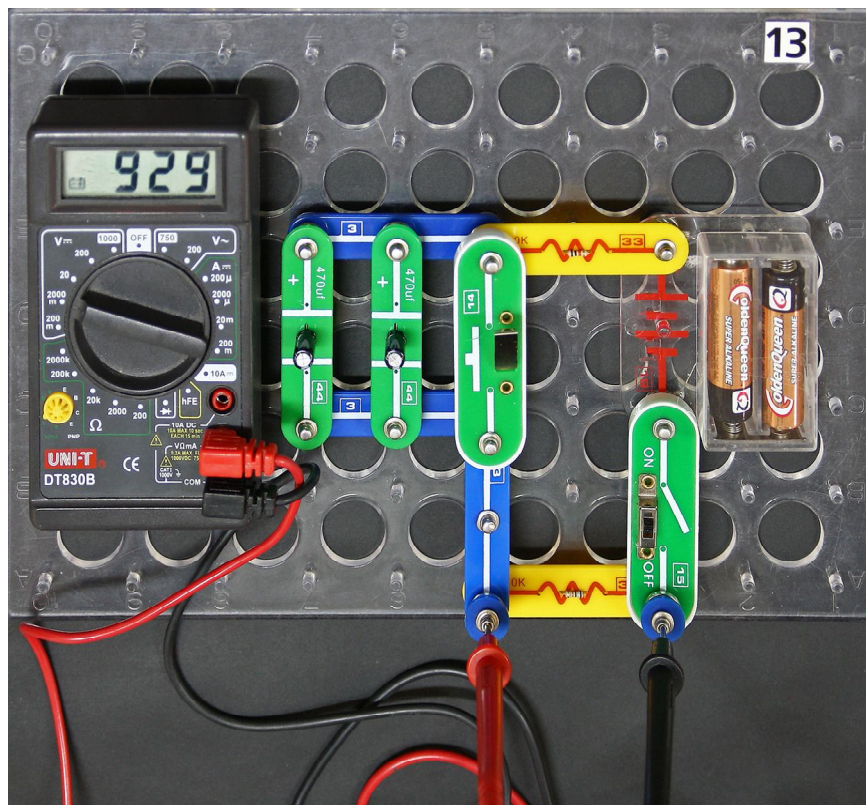


Рис. 4. Зарядження конденсатора

Для вимірювання струму зарядження використовується мілівольтметр від мультиметра, яким вимірюють напругу на опорі R2. Оскільки опір R дорівнює 10 кОм, то покази мілівольтметра, поділені на 10, будуть відповідати значенням струму в мікроамперах. Максимальний струм зарядки може бути близько 160 мкА, тому мультиметр слід вмикати в коло на межі 2000 мВ. Покази мультиметра на рис. 4 відповідають струму 92,9 мкА. Кнопка SB1 потрібна для розрядження конденсатора та для визначення струму зарядження в початковий момент часу.

Схему електричного кола, що використовується для дослідження процесу розрядження конденсатора, наведено на рис. 5, а вигляд панелі з елементами електричного кола – на рис. 6.

Хід роботи

1. Дослідження процесу зарядження конденсатора

1. Зберіть електричне коло згідно рис. 3. Остаточний вигляд зверху на установку з приєднаним джерелом живлення подано на рис. 4. Вимикач [15] повинен бути в положенні „ OFF ”.

2. Натисніть і потримайте декілька секунд кнопку [14] для розрядження конденсатора. Приєднайте до резистора R2 мілівольтметр від мультиметра (межа вимірювання – 2000 мВ).

3. Приготуйте для вмикання секундомір, перевірте його роботу. Приготуйте зошит для запису результатів. Записи доведеться робити швидко, кожні 10 с записувати покази мультиметра.

4. Натисніть кнопку SB1 [14] та утримуйте її в цьому положенні. Переведіть вимикач SA1 [15] у положення „ ON ” і запам'ятайте (або зразу запишіть) покази мультиметра (не забудьте поділити на 10). Це значення відповідає початковому струму заряджання I_0 . Кнопку не відпускайте!

5. Одночасно запусіть секундомір і відпустіть кнопку [14]. Почнеться заряджання конденсатора і секундомір почне відлік часу.

6. У момент, коли на секундомірі з'являться покази „10 с” швидко переведіть погляд на мультиметр і запам'ятайте та запишіть його покази. Від точності записів буде залежати кінцевий результат.

7. Пункт 6 треба виконувати кожні 10 секунд впродовж 100 секунд. Одержите 11 значень сили струму зарядки. Залиште вимикач SA1 в положенні „ ON ” ще на одну – дві хвилини, але вже не ведіть записи. Спостерігайте за змінами сили струму.

8. Повторіть вимірювання, почавши з пункту 4. Якщо результати повторного вимірювання мало відрізняються від першого, то на цьому вимірювання можна припинити.

9. Вимкніть живлення установки, перевівши вимикач SA1 [15] у положення „ OFF ”. Витягніть зі схеми конденсатор C2 та виконайте знову пункти 4 – 7.

10. Результати вимірювань занесіть в таблицю 1.

2. Дослідження процесу розряджання конденсатора

1. Зберіть електричне коло згідно рис. 5. Вигляд панелі з елементами електричного кола наведено на рис. 6. Вимикач SA1 [15] повинен бути в положенні „ OFF ”.

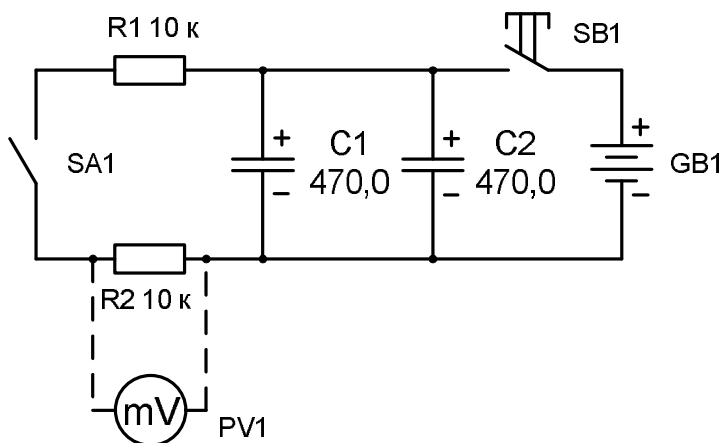


Рис. 5

2. Приготуйте секундомір до роботи, приєднайте мультиметр до резистора R2.

3. Вимикач SA1 [15] переведіть у положення „ ON ” Натисніть і потримайте 2 – 3 секунди кнопку SB1 [14] для заряджання конденсаторів. Покази мілівольтметра (поділені на 10) в цей момент відповідатимуть початковому струму розряджання в мкА, запишіть їх.

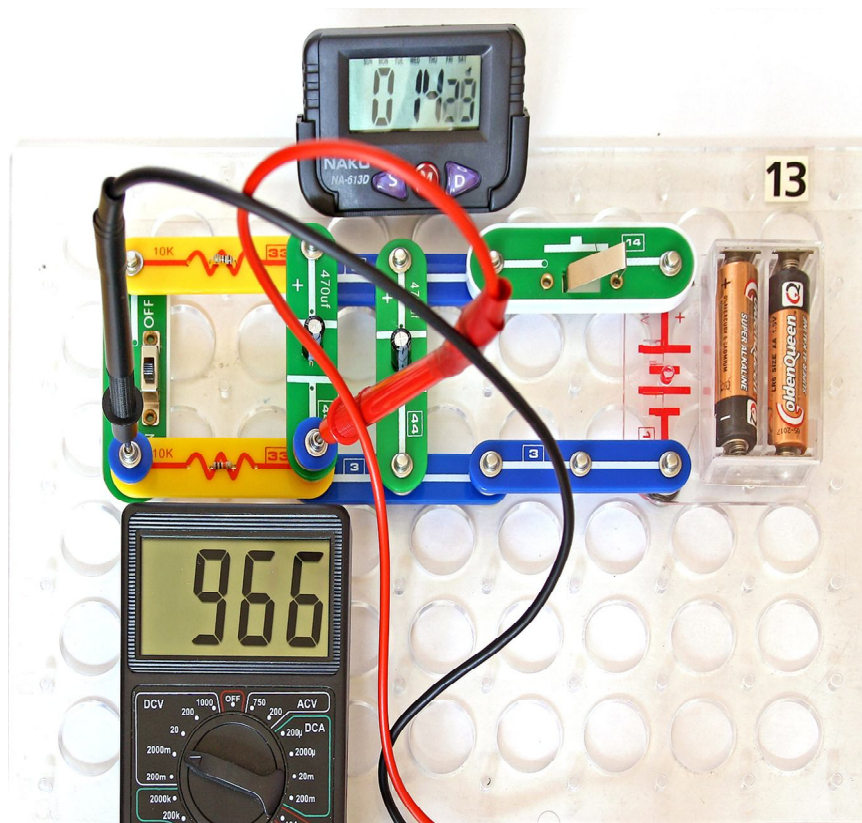


Рис. 6. Розрядження конденсатора

4. Одночасно відпустіть кнопку SB1 і увімкніть секундомір. Через кожні 10 секунд записуйте покази мілівольметра. Продовжуйте запис результатів протягом 100 секунд. Якщо зарядження конденсатора виконано до кінця, то початкова напруга на ньому дорівнюватиме е.р.с. джерела, отже, початковий струм розрядки I_0 дорівнюватиме початковому струму зарядки.

5. Оскільки зарядження й розрядження здійснюються через один і той же опір, то відповідні значення струмів зарядки й розрядки будуть близькими одне до одного. Значні відхилення можуть вказати на якісь помилки при виконанні роботи.

6. Повторіть вимірювання, почавши з пункту 3. Якщо результати повторного вимірювання мало відрізняються від першого, то на цьому вимірювання можна припинити.

7. Результати вимірювань занесіть в таблицю 1.

3. Обробка результатів досліджень

1. Знайдіть середні арифметичні значення струму зарядження та розрядження, одержаних в дослідах 1 і 2, і занесіть їх в таблицю 2.

2. Обчисліть значення i/I_0 та $\ln(i/I_0)$ та занесіть їх табл. 2.

3. За результатами експерименту побудуйте графік залежності $i = f(t)$, аналогічний зображеному на рис. 7.

4. Побудуйте графік залежності $\ln(i/I_0)$ від часу t (як на рис. 8). Якщо одержана залежність $i = f(t)$ експоненціальна, то останній графік буде прямою

лінією. Обчислення й побудову графіків слід виконувати, використовуючи програму Microsoft Excel.

5. За графіком $\ln \frac{i}{I_0} = f(t)$ визначте час релаксації τ . Порівняйте одержане

значення з відомими вам значеннями R та C . Зробіть висновок.

Таблиця 1

Заряджання				Розряджання		
Час, с	Струм, мкА			Час, с	Струм, мкА	
	Дослід 1, C=C1+C2	Дослід 2, C=C1+C2	Дослід 3, C=C1		Дослід 1, C=C1+C2	Дослід 2, C=C1+C2
0				0		
10				10		
20				20		
30				30		
40				40		
50				50		
60				60		
70				70		
80				80		
90				90		
100				100		
110				110		
120				120		

Таблиця 2

Заряджання				Розряджання			
Час, с	Струм, мкА	i/I_0	$\ln i/I_0$	Час, с	Струм, мкА	i/I_0	$\ln i/I_0$
0				0			
10				10			
20				20			
30				30			
40				40			
50				50			
60				60			
70				70			
80				80			
90				90			
100				100			
110				110			
120				120			

Контрольні запитання

1. Що називають електроємністю та в яких одиницях вона вимірюється?
2. Як називається величина RC ? В яких одиницях вона вимірюється?
3. Як змінюється струм під час заряджання й розряджання конденсатора?
4. Як переконатися, що одержана залежність струму заряджання чи розряджання від часу є експоненціальною?
5. Як графічно знайти час релаксації?

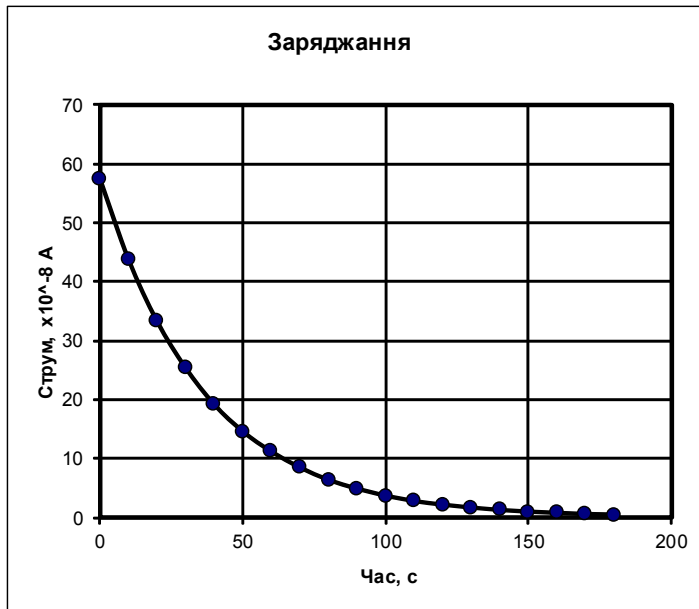


Рис. 5. Графік залежності струму від часу



Рис. 6. Графік залежності $\ln(i/I_0)$ від часу

Лабораторна робота №14 (фронтальна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНУ ІНДУКЦІЇ ФАРАДЕЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДУКЦІЙНИХ ДАТЧИКІВ

Мета роботи: оволодіти сучасною осцилографічною технікою вимірювання фізичних величин та перевірити закон індукції Фарадея та кінематичні закони руху тіла.

Прилади та матеріали: експериментальна установка, що складається з вертикальної скляної трубки з котушками-датчиками, магніту, вимірювальної схеми, пускового пристрою, осцилографа.

Теоретичні відомості

Якщо магніт починає вільно падати з положення, зображеного на рис. 1, то пролітаючи крізь закріплене дротяне кільце (датчик), магніт створює в ньому електричний струм, сила якого змінюється з часом так, як показано на рис. 2. Індукційний струм у кільці викликаний ЕРС індукції, що виникає при перетині провідником ліній магнітного поля. За законом індукції Фарадея

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

ЕРС пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Φ , тобто кількості ліній, що перетинаються кільцем в секунду. Вона тим вище, чим більше швидкість руху магніту. Сила струму I , відповідно до закону Ома для замкнутого кола, пропорційна ЕРС індукції ε :

$$I = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (2)$$

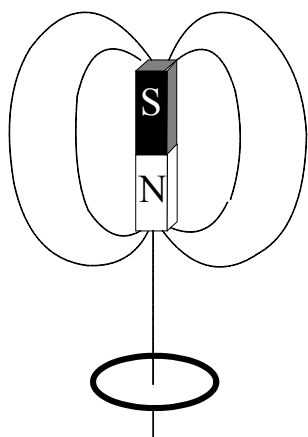


Рис. 1

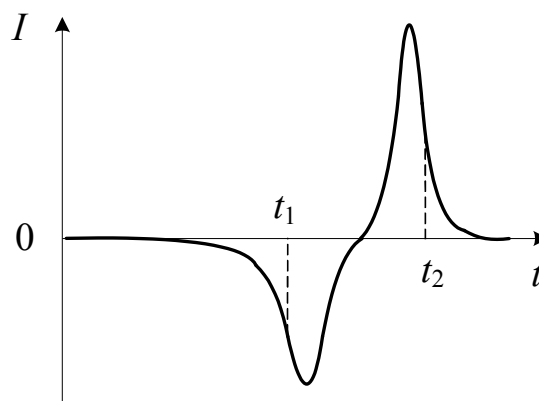


Рис. 2

У момент часу t_1 до кільця наближається магніт і магнітний потік збільшується.

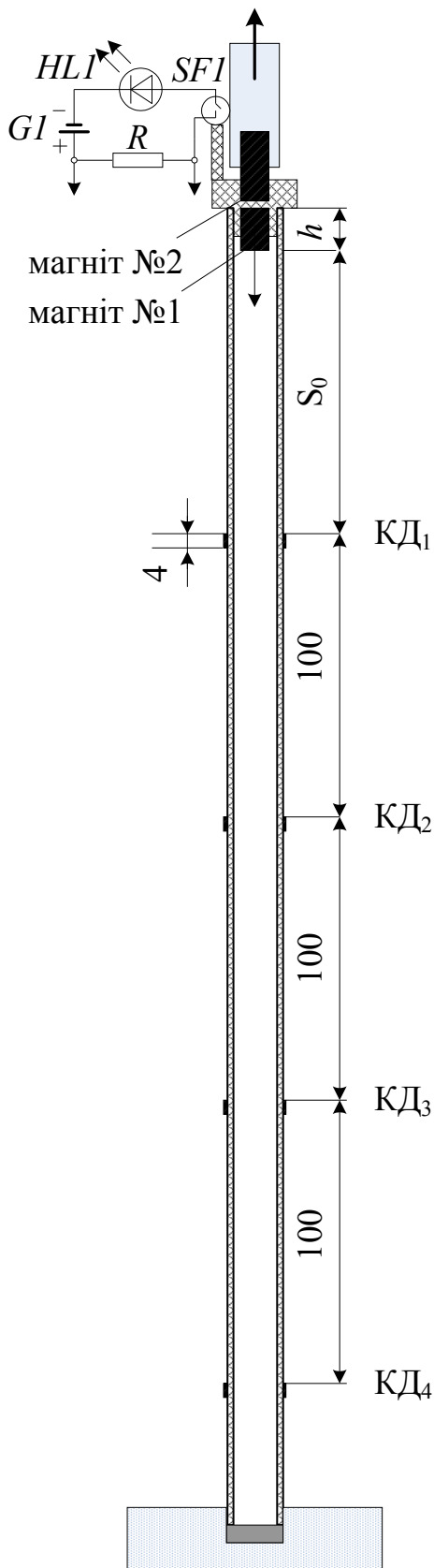


Рис. 3

У момент t_2 магніт віддаляється й магнітний потік зменшується. Отже, струм має різні напрями. У початковий момент магніт знаходиться далеко від кільця, тому лінії поля \vec{B} практично не перетинають провідник. При наближенні до кільця поле зростає і його лінії починають перетинати провідник, викликаючи ЕРС індукції. Швидкість магніту зростає з часом, тому ЕРС швидко зростає при наближенні північного полюса магніту до площини кільця. Коли полюс магніту, пройшовши через площину кільця, починає віддалятися від провідника, то кількість ліній, що перетинаються, зменшується. Тому, незважаючи на зростання швидкості, модуль ЕРС падає. У той момент, коли через площину кільця проходить середина магніту, лінії поля перпендикулярні площині кільця. Провідник у цей момент «ковзає» по лініях поля, не пересікаючи їх. Потік вектора магнітної індукції у цей момент досягає максимального значення, а сила струму дорівнює нулю. При подальшому русі магніту потік починає зменшуватися, а лінії виявляються знов направлені під кутом до площини кільця й перетинаються ним при русі. Це приводить до виникнення ЕРС, напрям якої змінюється на протилежний, оскільки кількість ліній, що виявилися всередині контуру, зменшується, а значить, потік поля тепер не збільшується, а зменшується. Відповідно, виникає індукційний струм, що направлений у протилежний бік. Він збільшується при наближенні південного полюса до площини кільця. Оскільки швидкість магніту тепер значно більше, ніж при проходженні північного полюса, ЕРС значно більше, а значить, і модуль сили струму виявляється більше, ніж на початку руху. Пройшовши максимум, поле магніту й струм починає зменшуватися при віддаленні південного полюса від кільця до нуля. Отже, дотягне кільце (катушку) можна

використовувати як детектор руху магніту. Час на осцилограмі (репер), коли

сила струму перетворюється на нуль дозволяє визначати положення магніту: середина магніту проходить площину кільця.

Схема установки

Для дослідження вільного падіння тіла вибраний циліндровий магніт із сплаву неодиму, заліза й бору діаметром 10 мм і довжиною $h = 15$ мм. Магніт починає падіння від верхнього кінця труби (рис. 3). На зовнішню поверхню трубки намотано чотири котушки КД1-КД4 з відстанню між ними $\Delta S = 100$ мм. Кожна котушка складається з 20 витків мідного покритого ізолюючим лаком дроту діаметром $\varnothing 0,225$ мм довжиною 5 мм. Котушки з'єднані послідовно й під'єднані до цифрового осцилографу Tektronix TPS-2014B.

Початок руху магніту №1 (див. рис. 3) визначається за часом замикання геркона SF1 при зсуві вгору магніту №2, що утримує до цього магніт №1 на стартовій позиції.

Контроль старту – замикання кола герконом – здійснюється за допомогою світлодіода HL1. Розбіжність часу старту $\pm 0,2$ мс.

Установка дозволяє виміряти імпульс наведеної напруги в котушках-детекторах U у залежності від часу руху. Внаслідок чого надаються докази справедливості закону індукції Фарадея та кінематичних рівнянь при вільному падінні тіла.

На рис. 4 наведено осцилограму, яку отримують при падінні магніту.

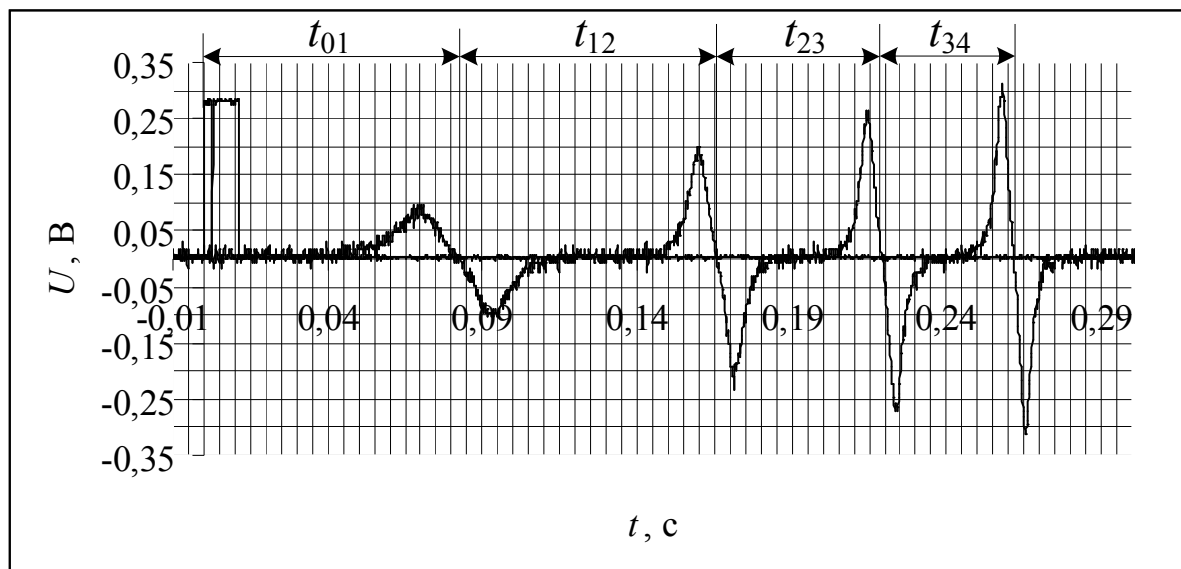


Рис. 4

Хід роботи



Рис. 5. Вигляд експериментальної установки

1. З'єднати вхід №1 осцилографу з виводами вимірювальної схеми геркона (рис. 5).
2. З'єднати вхід №2 осцилографу з виводами котушок.
3. Увімкнути осцилограф.
4. Закріпити магніт №1 за допомогою магніту №2 на стартовій позиції.
5. Виміряти відстань H_{Φ} від середини магніту №1 на стартовій позиції до середини датчика КД4.
6. Натиснути кнопку осцилографу “одиначний запуск”.
7. Швидко підняти магніт №2 вгору.
8. За допомогою курсорів осцилографу виміряти часові інтервали $t_{01}, t_{12}, t_{23}, t_{34}$ (рис. 4) прольоту магніту відстані до котушки КД1 та відстаней між котушками. Результати вимірювань записати в табл. 1.
9. За даними табл. 1 та фактичними відстанями від старту до детекторів отримайте (за допомогою Excel) графік та рівняння залежності $H = f(t^2)$. Порівняйте коефіцієнт при t^2 у рівнянні зі значенням $g/2$.

10. За формулою $H_t = \frac{gt^2}{2}$, де $t = t_{01} + t_{12} + t_{23} + t_{34}$, знайдіть відстань H від середини магніту №1 на стартовій позиції до середини датчика КД4.

11. За формулою

$$H_{\Delta t} = \frac{1}{2g} \left(\frac{\Delta s}{t_{34}} + \frac{gt_{34}}{2} \right)^2 = \Delta S + \frac{1}{2g} \left(\frac{\Delta s}{t_{34}} + \frac{gt_{23}}{2} \right)^2 \quad (3)$$

- знайдіть шлях падіння магніту №1 до котушки КД4. Порівняйте значення H_t , та $H_{\Delta t}$ з фактичною відстанню H_{Φ} , яку долає магніт при падінні.

12. За формулою

$$g = \frac{2\Delta S (1/\Delta t_{34} - 1/\Delta t_{23})}{\Delta t_{23} + \Delta t_{34}} \quad (4)$$

визначте величину прискорення вільного падіння.

13. За формулою $v = gt$ визначте швидкості магніту при проходженні датчиків КД1-КД4. Результати розрахунків записати в табл. 2. За допомогою таблиць Excel отримайте графік залежності $v = f(t)$.

14. За допомогою осцилограм, отриманих при падінні магніту, визначити залежність амплітуди імпульсу наведеної напруги U на кожному датчику від швидкості магніту й таким чином довести справедливості закону індукції Фарадея.

15. Виділіть на осцилограмі негативні й позитивні імпульси індукції, що виникли на окремій котушці, і їх параметри (амплітуду й час) записати в таблиці Excel. Далі обчислити площі під графіками $U=f(t)$, тобто зробити числове інтегрування й отримати величину магнітного потоку Φ та магнітної індукції B згідно формули

$$\Phi = -\frac{1}{n} \int U dt = B \cdot S, \quad (5)$$

де $n = 20$ – кількість витків у котушці, S – її площа.

16. Зробіть висновки.

Таблиця 1

Результати експериментів

№ досліджу	Δt_{01} , мс	Δt_{12} , мс	Δt_{23} , мс	Δt_{34} , мс	S , мм
1					
...					
Середнє Δt_{ij}					

Таблиця 2

Результати розрахунків швидкості

Час, мс	t_0	t_{01}	t_{02}	t_{03}	t_{04}
Швидкість, м/с	0				

Контрольні запитання

1. Чому в моменти часу t_1 і t_2 (рис.2) струм у кільці має різні напрями?
2. Одержати формули (3) та (4).
3. Чим відрізняються цифрові осцилографи від аналогових?

Рекомендована література

1. Детлаф А. А. Курс физики: Учебное пособие для вузов. / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989. – 607с.
2. Загальна фізика : Лабораторний практикум : навч. посібник. / За редакцією І. Г. Горбачука. – К. : Вища школа, 1992. – 509 с.
3. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : Навч. посібник – Т. 2 : Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, Луцик П. П. – К. : Техніка, 2001. – 452 с.
4. Лабораторный практикум по общей физике / Под ред. Е. М. Гершензона, Н. Н. Малова. – М : Просвещение, 1985.
5. Лабораторний практикум з електромагнетизму: методичні рекомендації. / Укладачі Ржепецький В. П., Бурак В. І., Половина Г. П., Дмитриченко Г. П. – Кривий Ріг, КДПУ, 2007. – 48 с.
6. Савельев И. В. Курс общей физики : Учеб. пособие. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 496с.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб. пособие : Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. – 4-е изд., стереот. / Д. В. Сивухин. – М. : Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
8. Физический практикум / под ред. В. П. Дущенко. – М. : Наука, 1980.
9. Фронтальні лабораторні роботи з курсу загальної фізики : методичний посібник / В. М. Здещиц, В. П. Ржепецький. – Кривий Ріг : Криворізький педагогічний інститут ДВНЗ «КНУ», 2012. – 76 с.

Лабораторний практикум
для організації самостійної роботи студентів фізичних спеціальностей
з дисципліни “ Електрика та магнетизм ”



Укладачі:

Здешиц Валерій Максимович – доктор технічних наук, професор кафедри фізики та методики її навчання КПІ ДВНЗ «КНУ».



Ржепечський Василь Петрович – кандидат фіз.- мат. наук, доцент кафедри фізики та методики її навчання КПІ ДВНЗ «КНУ».