Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Львів
Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка
2007

УДК 537(076)
ББК В33я73-5
Ш-79

Рецензенти:

д-р фіз-мат. наук, професор *С. І. Мудрий*
(Львівський національний університет імені Івана Франка)

канд. фіз-мат. наук, доцент *Ф. М. Гончар*
(Національний університет "Львівська політехніка")

Рекомендовано до друку Вченою радою фізичного факультету
Протокол № 6 від 26.06.2007 р.

Ш-79 **Електрика та магнетизм: Лабораторний практикум** / Уклад. Я. І. Шопа, В. М. Лесівців. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2007. – 106 с.

Навчальний посібник "Електрика та магнетизм: Лабораторний практикум" призначений для підготовки до виконання лабораторних робіт з курсу "Електрика та магнетизм" студентами фізичного факультету.

Посібник знайомить студентів з основними принципами електричних вимірювань, зберігання та опрацювання результатів. У ньому відображено сучасні тенденції у розвитку експериментальних методів дослідження, які передбачають широке використання комп'ютерної техніки.

УДК 537(076)
ББК В33я73-5

© Шопа Я. І., Лесівців В. М., 2007
© Львівський національний університет імені Івана Франка, 2007

Вступ

Лабораторний практикум з курсу “Електрика та магнетизм” для студентів фізичного факультету передбачає виконання низки стандартних робіт, описаних у цьому методичному виданні. Теоретичний вступ до кожної з них дає мінімальні відомості про досліджуване явище чи фізичний об’єкт, яких достатньо для підготовки та проведення відповідного експерименту.

Переважна частина цих лабораторних робіт передбачена також для студентів природничих факультетів університету, які можуть використовувати описи та завдання, коректуючи умови їхнього виконання за вказівками викладача.

Практикум побудований з використанням сучасної апаратури, елементів комп’ютеризації вимірювань, зберігання та опрацювання результатів. Програми для цифрових вимірювальних пристроїв є в готовому вигляді, хоча можливим є й самостійне програмування. Для успішного виконання цих робіт потрібні знання та уміння, набуті під час вивчення курсу “Програмування та математичне моделювання”. Окрім того, студентам доцільно ознайомитися із прикладними програмами для аналізу експериментальних результатів.

Для укладання тематики та змісту лабораторних робіт автори використали переліки, рекомендовані навчально-методичними центрами, видані раніше методичні матеріали кафедри загальної фізики фізичного факультету, кафедри фізики напівпровідників факультету електроніки, а також програми інших вищих навчальних закладів.

Електронний варіант цього навчального посібника у форматі *.pdf можна одержати в лабораторії електрики та магнетизму, він також доступний на інтернет-сторінці кафедри загальної фізики www.physics.wups.lviv.ua:8102/depts/KZF/index.htm.

Лабораторна робота 1

Електричні вимірювання та методи вимірювань

Мета роботи: засвоїти методи вимірювання електричних величин за допомогою мультиметрів, використання аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів сигналів, вивчити схеми їхнього зв'язку з комп'ютерами, принципи програмного керування вимірювальними системами, опрацювання експериментальних результатів.

1.1 Прилади для вимірювання електричних величин

Електричні вимірювання призначені для експериментального пошуку фізичних величин із використанням відповідної системи одиниць. Розрізняють різні види засобів електричних вимірювань: *міри* для відтворення фізичної величини, *електричні вимірювальні прилади*, *перетворювачі* неелектричних величин в електричні та електричних величин в електричні, *електричні вимірювальні установки і системи* – сукупність різних засобів для автоматичного отримання та опрацювання вимірювальної інформації, зокрема й комп'ютерні.

Останні досягнення електроніки та комп'ютерної техніки дають змогу легко реалізувати електричні вимірювання та керування фізичними параметрами об'єктів, використовуючи нові апаратні та програмні засоби. Дешеві й доступні мікроконтролери (однокристальні електронно-обчислювальні пристрої) за своїми функціональними можливостями перевершують багато традиційних приладів. Тому в більшості лабораторних робіт з цього курсу передбачені автоматизовані електричні вимірювання. Зауважимо, що найбільші досягнення сучасної експериментальної фізики стали можливими саме завдяки новим методам вимірювань.

1.1.1 Комп'ютер у фізичному експерименті

Будь-який, навіть не новий персональний комп'ютер (ПК) володіє достатніми ресурсами для створення систем збору даних, їхнього опрацювання, нормування (приведення шкали), апроксимації, часової прив'язки, розрахунку статистичних параметрів, накопичення результатів, архівування та пересилання каналами зв'язку. Вимірювальні комплекси на основі ПК, зокрема й портативних, стають дедалі популярнішими в фізиці.

Вимірювання фізичних параметрів (напруга, струм, напруженість магнітного поля, температура тощо) передбачають точну оцінку аналогових величин. Комп'ютер же працює лише з дискретними (цифровими) сигналами. Отже, для вимірювань з ПК потрібен додатковий перетворювач сигналів – аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Інтегральні АЦП також є основою сучасних *цифрових мультиметрів* з рідкокристалічними індикаторами, чи дисплеями, кожний елемент яких керується своїм цифровим сигналом.

Комп'ютер може керувати АЦП чи мультиметрами або через послідовні чи паралельні порти (кілька їх в ПК зазвичай не зайняті периферійними пристроями), або безпосередньо через системні шини (якщо АЦП перебуває на електронній платі розширення). Сьогодні виготовляють велику кількість приладів для розв'язання завдань, пов'язаних із комп'ютеризацією вимірювань.

Розглянемо деякі приклади такої апаратури, які реалізовано в лабораторії. Ознайомившись з тим, як персональний комп'ютер керує цифро-аналоговим чи аналого-цифровим перетворювачем, кроковим двигуном тощо, відображає та зберігає отриману від зовнішніх приладів інформацію, ви зможете застосувати ці знання для виконання інших лабораторних робіт з цього курсу.

Важливим елементом кожного фізичного вимірювання є опрацювання результатів. Застосовуючи нескладні комп'ютерні програми, ви суттєво полегшите розрахунки, їхнє графічне оформлення, укладання звітів про виконання лабораторних робіт.

1.1.2 Зв'язок ПК з вимірювальними приладами

Для зв'язку ПК із зовнішніми пристроями використовують послідовні (напр. COM1, COM2 стандарту RS232 чи USB) та паралельні (напр. LPT1, LPT2 стандарту Centronics) порти (рис. 1.1). Правила їхнього програмування можна відшукати у відповідній літературі.

Експериментатори також доповнюють ПК додатковими інтерфейсами, для яких передбачені вільні місця на системних шинах материнської плати. Їхні схеми можуть бути різноманітними, але неодмінним є оригінальна адреса, яка не перекривається з адресами інших існуючих в ПК фізичних пристроїв (контролерів дисків, відео- та звукових карт, ігрових портів тощо).

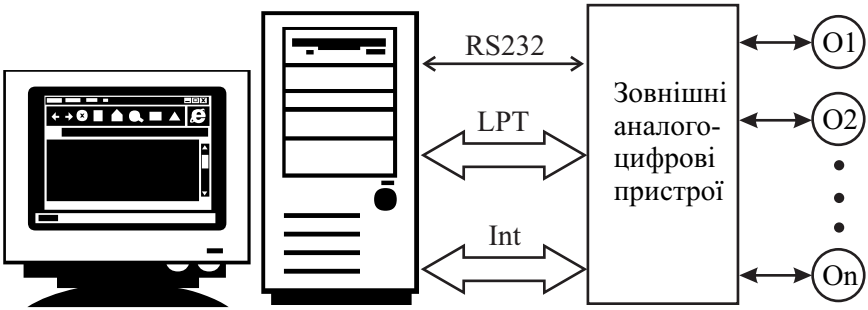

Рис. 1.1. Схема зв'язку ПК з аналого-цифровими пристроями для керування вимірюваннями фізичних величин об'єктів O1, O2, ..., On. RS232 – стандартний послідовний порт, LPT – стандартний паралельний порт, Int – додатковий паралельний інтерфейс

Саме така електронна плата з дешифратором адреси призначена для зв'язку персонального комп'ютера з аналого-цифровими пристроями (вольтметрами, блоками живлення, кроковими двигунами, цифро-аналоговими перетворювачами), які використовуються у схемах апаратури під час виконання лабораторних робіт з курсу електрики та магнетизму. Під'єднуючи до вихідних регістрів цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), цей пристрій мо-

жна перетворити в генератор сигналів довільної форми, максимальна частота яких досягатиме сотень кГц. Аналогічні технічні рішення використовують й для інших завдань, пов'язаних із електричними вимірюваннями.

Якщо комп'ютер має звукову карту, то вона, зазвичай, обладнана електронною схемою вимірювання одразу чотирьох опорів. Принцип її роботи ґрунтується на встановленні часу зарядки конденсатора через невідомий опір від напруги 5 В. Для точного вимірювання опору потрібно у текст програми, написаний на мові Pascal, включати фрагменти на мові Assembler. Тоді швидкість її виконання максимальна.

Така ж нескладна программа дає змогу використати звукову карту комп'ютера як лабораторний генератор сигналів під час проведення різних фізичних експериментів. Частоту сигналу можна змінювати від 1 до 22050 Гц із дискретністю 1 Гц, форма сигналу – синусоїда, прямокутний чи трикутний сигнал. Передбачена можливість регулювати амплітуду сигналу.

Чим меншою є амплітуда сигналу й чим вища його частота, тим більше форма сигналу відрізняється від ідеальної. Це відомий недолік кожного цифрового пристрою, який синтезує аналоговий сигнал, для його усунення потрібно збільшувати розрядність ЦАП і частоту дискретизації.

1.1.3 Мультиметри та цифрові вольтметри

Сучасні цифрові мультиметри (*multi-* в складних словах означає *багато-*) є компактними переносними вимірювальними приладами з багатьма функціями та можливістю під'єднання до ПК через стандартний інтерфейс RS232. За допомогою спеціальної програми вони можуть працювати з різними операційними системами. Мультиметр може вимірювати декілька величин, в декількох діапазонах кожну. Вибір величини і діапазону її вимірювання здійснюють поворотом перемикача, деякі мультиметри вибирають діапазон автоматично.

Цифровий мультиметр (ЦМ) є вимірювачем напруги з допомогою АЦП, але після доповнення різними схемами, що перетворюють інші безпосередньо вимірювані фізичні величини в напруги, він стає універсальним і зручним приладом. Результати вимірювання перед відображенням можуть бути опрацьовані комп'ютером за наперед заданим алгоритмом, а також збережені у файлі на ПК, переглянуті і роздруковані.

У лабораторному практикумі з електрики та магнетизму використовують мультиметр UT70C. Його структурна схема містить (рис. 1.2): вхідний пристрій (ВП), який перетворює усі вимірювані величини в постійну напругу U_{-}; АЦП, що перетворює цю напругу в цифровий код; цифровий відліковий пристрій (ЦВП) з дисплеєм на рідких кристалах для відображення інформації (чотири десяткових цифри та знак, залежно від вимірюваної величини). Для зв'язку з ПК передбачено стандартний послідовний інтерфейс RS232 з безконтактною оптичною двосторонньою передачею сигналів.

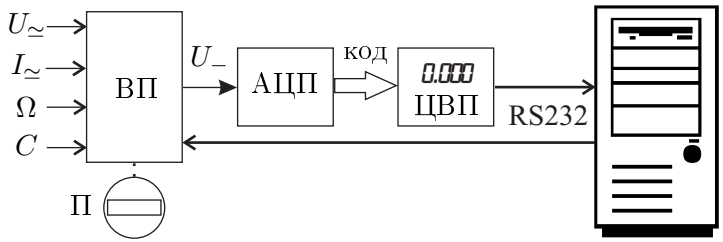

Рис. 1.2. Структурна схема мультиметра. ВП – вхідний пристрій, П – перемикач вимірюваних величин, АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦВП – цифровий відліковий пристрій

Програма читання даних з мультиметра написана в середовищі Delphi з використанням стандартних компонент, окрім того його можна використовувати як самостійний прилад з широкими функціональними можливостями та високою точністю вимірювань.

1.1.4 Крокові двигуни

Крокові двигуни вже давно й успішно застосовують у найрізноманітніших приладах. Їх можна зустріти в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а також у промисловому й спеціальному устаткуванні. Крроковий двигун (КД) – це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси в дискретні механічні переміщення.

КД відносять до класу безколекторних двигунів постійного струму, вони мають високу надійність і великий термін служби. У КД обертовий момент створюють магнітні потоки статора й ротора. Він пропорційний струмові в обмотках двигуна та кількості витків на них. Якщо хоча б одна обмотка крокового двигуна (їх, зазвичай, називають фазами) ввімкнена, ротор фіксується у певному положенні. Для зміни цього положення потрібно перемкнути фази. Найчастіше можна зустріти три- і чотирифазні КД. Перевагами КД є: можливість здійснювати точне позиціювання та регулювання швидкості без сенсора зворотного зв'язку; кут повороту ротора визначається лише кількістю імпульсів, які подані на двигун; двигун забезпечує повний механічний момент у режимі зупинки (якщо на обмотках зберігається напруга живлення); прецизійне позиціювання й повторюваність; можливість швидкого старту/зупинки/реверсу; висока надійність, пов'язана з відсутністю щіток, термін служби КД фактично визначається терміном служби підшипників; можливість отримання дуже низьких швидкостей обертання для навантаження, приєднаного безпосередньо до валу двигуна без проміжного редуктора; перекриття досить великого діапазону швидкості, яка пропорційна до частоти вхідних імпульсів.

Крроковими двигунами легко керувати програмно з допомогою комп'ютерів, хоча для цього оптимальніше використовувати спеціальні цифрові мікросхеми. Приклади програм керування крроковими двигунами можна переглянути безпосередньо на комп'ютерах.

1.2 Програмне забезпечення вимірювань та опрацювання результатів

Експерименти у більшості лабораторних робіт можна виконувати за допомогою спеціальних готових програм, які працюють у середовищі Windows. Така схема програмування вибрана для створення зручних інтерактивних візуальних засобів керування та вимірювання.

Результати вимірювань зберігають в текстових файлах у вигляді таблиць з кількома колонками. Потім ці експериментальні дані зазвичай вимагають опрацювання: модифікації величин, поправок у розмірності, усереднення, побудови графіків, апроксимації, інтерполяції чи екстраполяції заданими функціями, знаходження похибок, розрахунків параметрів електричних кіл тощо.

Можливості для опрацювання даних надають багато програм, що працюють з операційними системами Windows, наприклад, Origin, Numeri, Mathcad, Excel та ін. Тому для успішного виконання завдань до лабораторних робіт доцільно опанувати одну з таких програм й використовувати під час занять.

Порядок виконання роботи:

Макет для виконання лабораторних робіт з курсу "Електрика та магнетизм" виготовлено у вигляді єдиної електронної плати, на якій розташовані по два стандартні розняття для осцилографів і звукових карт ПК (рис. 1.3). Їх можна використати для складання електричних схем тоді, коли потрібно генерувати та вимірювати змінні електричні напруги.

Розняття COM-порта призначене для зв'язку макета з ПК. Основним елементом макета є мікроконтролер – однокристальна ЕОМ з рідкокристалічним дисплеєм. Після укладання відповідних програм та запису їх у пам'ять мікроконтролера ці пристрої стають універсальними вимірювальними приладами та генерато-

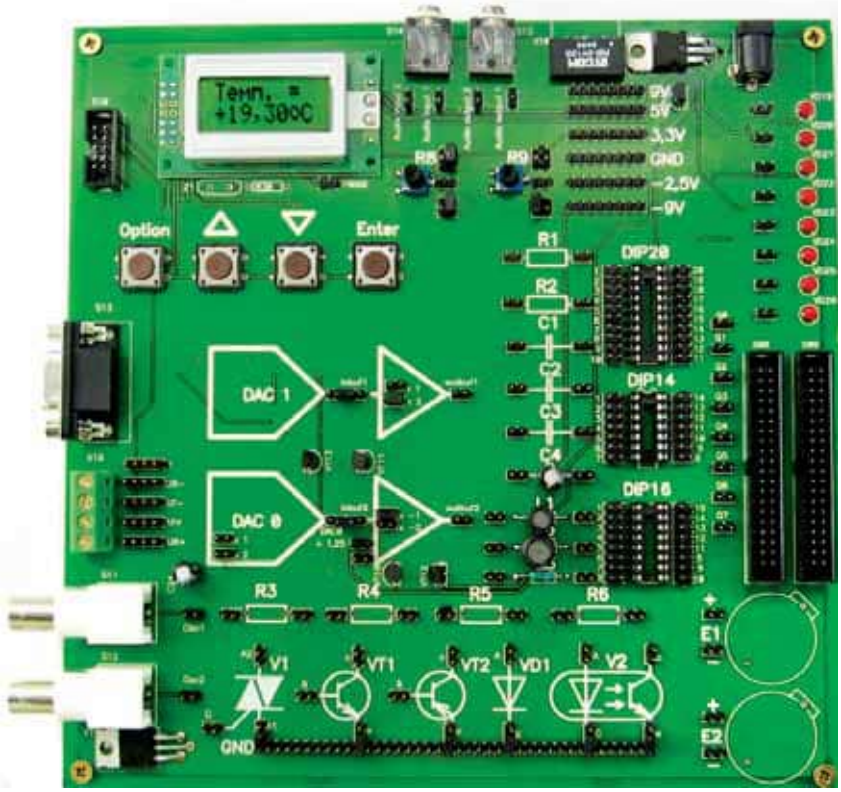

Рис. 1.3. Макет універсальної електронної плати з мікроконтролером, рідкокристалічним дисплеєм та основними елементами електричних схем для виконання лабораторних робіт

рами різних сигналів. Зрозуміло, що створення програмного забезпечення не входить до завдань цього лабораторного практикуму. Студенти використовують вже готові програми, слідкуючи лише за електричними схемами та вимірюваними величинами.

Після ввімкнення живлення макету (9 В від зовнішнього джерела) дисплей відображає у рядках запрошення вибору опції – режиму роботи контролера. Залежно від тематики лабораторної

роботи, це може бути вимірювання термо-е.р.с., індикація температури пристрою (температури кімнати, як це видно на рис. 1.3), генератор, АЦП, регульоване джерело постійної напруги. За допомогою відповідних дротових з'єднань ці елементи вмикають у електричні кола й проводять вимірювання згідно описів до лабораторних робіт.

Окрім того, на макеті зосереджені основні елементи більшості електричних схем: резистори, конденсатори, котушки індуктивності, діоди й транзистори, джерела живлення з різними е.р.с. Зручні, компактні розняття дають змогу швидко укладати потрібні електричні схеми разом з іншими зовнішніми приладами.

1. Ознайомтеся із описом та правилами експлуатації вимірювальних та цифрових приладів у лабораторії електрики та магнетизму – мультиметром, макетом з елементами схем, цифро-аналоговим перетворювачем на ньому, з'єднаннями та засобами керування.

2. Зберіть схему вимірювання напруги мультиметром та з'єднайте його з комп'ютером, використовуючи інтерфейс зв'язку стандарту RS232. Переконайтеся у правильному функціонуванні запропонованого програмного забезпечення.

3. За відомими метрологічними характеристиками ЦМ (див. технічний опис приладу) визначте граничну абсолютну похибку прямого вимірювання електричного опору R.

4. Користуючись еталонним засобом (точним опором) визначте абсолютну та відносну похибки вимірювання. Перевірте, чи не суперечать ці похибки граничним значенням.

5. Проведіть вимірювання невідомих напруг елементів живлення, величин опорів, ємностей конденсаторів, які розташовані на макетах. Порівняйте отримані величини з написами їхніх номінальних значень, та визначте абсолютне і відносне відхилення, похибку вимірювання приладу.

6. Порівняйте похибки вимірювання аналогових (наприклад електромеханічних зі стрілкою та шкалою) та цифрових (з дисплеями) приладів, засоби зміни їхньої чутливості, перемикання на різні фізичні величини.

7. Увімкніть живлення макету. Почергово вибираючи опції вимірювання температури, термо-е.р.с., напруги, запишіть отримані величини.

Контрольні запитання:

1. Які засоби електричних вимірювань ви знаєте, для визначення яких фізичних величин їх використовують?

2. Чому електричні вимірювання передбачають застосування еталонів та мір?

3. Як встановити похибку вимірювання цифровими та аналоговими приладами?

4. Якими засобами можна виміряти аналогову величину та перевести її у цифровий код? Обґрунтуйте зв'язок між розрядністю та точністю вимірювання з використанням АЦП.

5. Які способи керування зовнішніми аналого-цифровими пристроями вам відомі? Запишіть кілька прикладів програмного звертання до регістрів комп'ютера.

6. Перелічіть переваги крокових двигунів та знайдіть приклади їхнього застосування для електричних вимірювань.

7. Що таке мікроконтролер, які його функції застосовані для електричних вимірювань?

8. Які комп'ютерні програми для опрацювання результатів експерименту ви освоїли?

Лабораторна робота 2

Вимірювання параметрів електричних сигналів за допомогою осцилографа

Мета роботи: ознайомитися із сучасними типами електронних осцилографів, засвоїти методи вимірювання електричних величин за допомогою аналогових осцилографів, навчитися працювати з найпростішими цифровими осцилографами.

2.1 Структура осцилографа

Електронний осцилограф дає змогу вимірювати параметри постійних і змінних електричних сигналів, його робота ґрунтується на керуванні напрямком руху пучка електронів. Основним вузлом осцилографа є електронно-променева трубка (ЕПТ), яка перетворює величину досліджуваної напруги в переміщення електронного променя. У більшості осцилографів використовують ЕПТ з підігрівним катодом і електростатичним керуванням (рис. 2.1). Джерело пучка електронів (електронна гармата) складається підігрівача катода П, самого катода К та керуючих електродів (модулятора М, фокусуючого анода А1, прискорюючого анода А2). Змінюючи потенціал модулятора, можна регулювати густину електронів у пучку, тобто яскравість зображення на екрані. Від напруги на прискорюючому аноді залежить чутливість ЕПТ до напруги на відхиляючих вертикальних (X–X) та горизонтальних (Y–Y) пластинах. Третій анод А3 розташований поблизу екрана Е – внутрішньої торцевої поверхні ЕПТ. Вона покрита люмінофором – матеріалом, який світиться під дією електронного бомбування.

Якщо до вертикальних (X–X) пластин прикласти змінну напругу, то на екрані світитиметься горизонтальна пряма лінія. Вертикальне ж зміщення h променя від центра екрана є пропорційним до напруги U, прикладеної до горизонтальних (Y–Y) пластин,

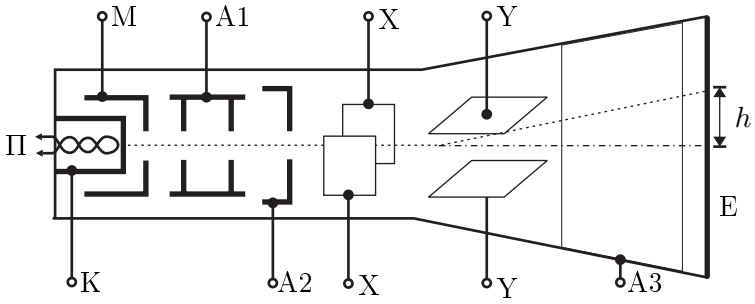

Рис. 2.1. Будова ЕПТ осцилографа з електростатичним керуванням

зокрема $h = s_l U$. Коефіцієнт пропорційності s_l перебуває в межах 0,1–1 мм/В для сучасних ЕПТ.

Для спостереження характеру часової зміни досліджуваної напруги $U(t)$ використовують лінійну часову розгортку, коли на пластини горизонтального відхилення (X–X) подають лінійно залежну від часу напругу (рис. 2.2), яку часто називають пилкоподібною. За час прямого ходу розгортки $t_{\text{пр}}$ промінь пересувається горизонтально, а за час зворотного ходу швидко ($t_{\text{зв}} \ll t_{\text{пр}}$) повертається назад, тому його непомітно на екрані. Тривале свічення екрана створює статичну картину, яку зручно спостерігати і вимірювати.

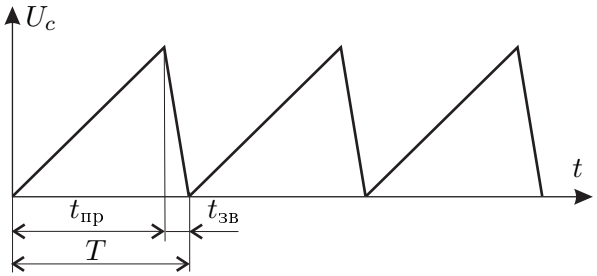

Рис. 2.2. Вигляд напруги лінійної часової розгортки. $t_{\text{пр}}$ – час прямого ходу розгортки, $t_{\text{зв}}$ – час зворотного ходу

Окрім ЕПТ і схем керування електронним пучком (канали X та Y) осцилограф має низку додаткових вузлів (живлення, калібрування, синхронізації). Окремий тип – це запам'ятовуючі осцилографи, які зберігають однократні (неперіодичні) сигнали впродовж тривалого часу, навіть після вимкнення приладу.

2.2 Вимірювання параметрів сигналу за допомогою осцилографа

2.2.1 Вимірювання напруги і струму

Із принципу дії ЕПТ випливає, що осцилограф є приладом, який реагує на зміну напруги. Отже, його можна використовувати для безпосереднього вимірювання напруги U і непрямого вимірювання струму $I = U/R$ за величиною падіння напруги на відомому опорі R.

Для цього сигнал слід подати на вхід "Y" осцилографа й отримати осцилограму, яка зручна для спостереження. Синусоїдальний змінний сигнал даватиме відповідну картину синусоїди з віддалю l_y між максимумом та мінімумом за відліком шкали екрана осцилографа. Тоді його амплітуда

$$U_m = S_U l_y/2. \tag{2.1}$$

Значення S_U у В/мм можна визначити за положенням перемикача `Чутливість` на панелі керування підсиленням осцилографа. Перевірити форму сигналу можна підбираючи перемикачем `Тривалість розгортки` оптимальну для спостереження його часових змін.

Аналогічно вимірюють осцилографом величину постійної напруги U_0 (попередньо слід встановити положення лінії l_0 на екрані за відсутності сигналу) та l_U з увімкненою постійною напругою. Отже,

$$U_0 = (l_U - l_0)S_U. \tag{2.2}$$

Точність вимірювання напруг і струмів за допомогою осцилографа є порівняно невеликою, всього 5–10 %, і залежить від властивостей ЕПТ та підсилювача вертикального відхилення електронного променя.

Однією з найважливіших характеристик осцилографа є залежність його чутливості S_U від частоти ω змінного сигналу, її називають амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ). Для вимірювань важливо, щоб чутливість осцилографа не залежала від частоти. Однак завжди існує максимальна робоча частота ω_c, оскільки час t_c проходження електронів крізь пластини відхиляючої системи ЕПТ скінчений.

2.2.2 Вимірювання частоти і фази

Частоту змінного сигналу вимірюють порівнюючи його період T із відомим періодом іншого сигналу. Однак найпростіше використовувати метод калібрування горизонтальної розгортки осцилографа, часову шкалу вздовж осі X встановлюють перемикачем `Тривалість розгортки`, яка, залежно від його положення, має розмірність с/см, мс/см, мкс/см.

Точні результати порівняння частот можна одержати методом фігур Ліссажу, коли на одну пару пластин подають синусоїдальну напругу певної частоти, а на другу пару – досліджувану синусоїдальну напругу невідомої частоти. Кожну фігуру Ліссажу можна вписати в прямокутник, сторони якого дорівнюють подвійним амплітудам сигналів (рис. 2.3).

Відношення кількості n торкань нерухомої фігури на екрані з однією із вертикальних сторін прямокутника до кількості m торкань тієї ж фігури з однією із його горизонтальних сторін дає кратність n/m частот порівнюваних сигналів.

Якщо напругу невідомої частоти f_x подати на вхід "Y" осцилографа, а напругу відомої частоти f_0 – на вхід "X", то з відношення $f_x/f_0 = m/n$ можна визначити невідому величину f_x. Найкраще

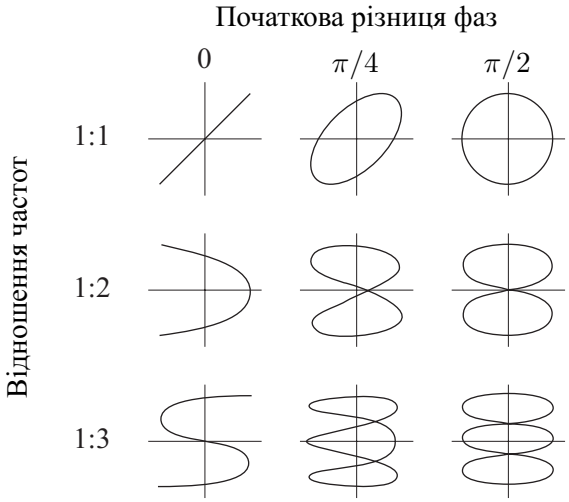

Рис. 2.3. Фігури Ліссажу для різного співвідношення частот і фаз двох досліджуваних сигналів

підбирати відому частоту f_0 генератора так, щоб фігура мала найпростіший вигляд – еліпс, коло, пряма (рис. 2.3).

Якщо важко добитися нерухомості фігури (таке трапляється, якщо частоти нестабільні), то, вимірюючи частоту обертання фігури Δf, можна ввести поправку:

$$f_x = f_0 \frac{m}{n} \pm \Delta f, \tag{2.3}$$

де знак поправки залежить від напрямку обертання фігури, який можна встановити шляхом невеликого збільшення чи зменшення однієї з частот.

Фазові зсуви між двома змінними напругами однакової частоти визначають, порівнюючи відповідні два сигнали на екрані двоканального чи двопроменевого осцилографа. Крім того, фазовий зсув також вимірюють за допомогою фігур Ліссажу.

2.3 Цифрові осцилографи та їхнє використання

Традиційні осцилографи, або, як їх також називають, аналогові осцилографи реального часу (АОРЧ), вже не відповідають сучасним вимогам експериментальної фізики. Часто вони лише якісно відображають форму сигналу, не даючи змоги точно його вимірювати й запам'ятовувати. Навіть найкращі зразки АОРЧ не реєструють сигнали з частотою понад 1 ГГц, важко забезпечити рівномірність їхньої чутливості від частоти.

Сучасна електронна промисловість виготовляє компактні цифрові запам'ятовуючі осцилографи (ЦЗО). Ці засоби вимірювання володіють характеристиками, які ще вчора були недосяжними для АОРЧ. Техніка вимірювань на ЦЗО дещо відрізняється, але зручності використання, особливо комп'ютерного аналізу сигналів, надають їм додаткові переваги порівняно з аналоговими високочастотними осцилографами.

Недоліками ЦЗО є неточне відтворення складних динамічних сигналів, пропуск частини інформації через обмежену частоту дискретизації, відображення сигналу на екрані із певним запізненням, оскільки його попередньо слід опрацювати.

За допомогою спеціального програмного забезпечення навіть звичайний ПК можна переобладнати в осцилограф, аналізатор спектру сигналу, частотомір або генератор сигналу заданої форми. Такі програми емулюють на екрані комп'ютера роботу цих приладів, природно, з своєю специфікою і в межах частотного діапазону звукової карти (ЗК). Типова ЗК має на панелі три гнізда для сигналів: `Line-in`, `Mic`, `Line-out (Speakers)`, які відповідають лінійному входу, мікрофонному входу, лінійному виходу (для колонок гучномовців чи навушників).

Программа `Digital Oscilloscope` створює двопроменевий ЦЗО. Сигнали можна подавати на обидва канали ЗК (правий і лівий). Максимальна частота дискретизації для ЗК найчастіше дорівнює 44,1 кГц, тому максимальна частота сигналу зазвичай

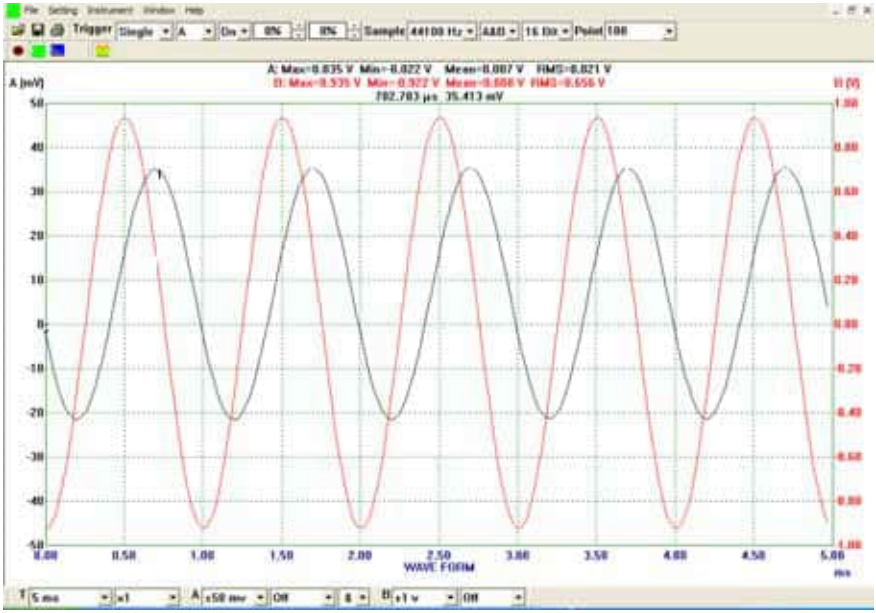

Рис. 2.4. Вигляд екрану монітора ПК під час роботи програми цифрового осцилографа з використанням стандартної ЗК

у два рази менша (20 кГц) від частоти дискретизації. Вікно програми дещо нагадує панель осцилографа (рис. 2.4). Традиційними для АОРЧ регуляторами можна керувати так само, як це характерно для комп'ютерних програм. Вгорі екрана можна побачити звичні засоби керування: синхронізація (`Trigger`), період дискретизації сигналу (`Sampling`).

Внизу екрана розташовані перемикачі тривалості розгортки (`T`), чутливості та множники чутливості обох каналів (`A`) та (`B`). Можна зберігати досліджуваний сигнал у вигляді зображення, чи текстового файлу, а згодом опрацьовувати ці дані.

У програмі передбачено також калібрування (рядок меню `Setting/Calibration`), яке дуже важливе для правильного вимірювання. Послаблення ж сигналу найкраще проводити засобами

операційної системи Windows (зокрема регулятором гучності звуку, через т.зв. системний трей). Максимальна вхідна напруга не має перевищувати 0,5–2,0 В, інакше можна вивести з ладу ЗК чи навіть ПК.

Алгоритми опрацювання сигналів цифровими засобами дають змогу суттєво поліпшити якість та кількість отримуваної інформації. Зокрема, вони передбачають:

- реконструкцію (інтерполяцію) сигналу за обмеженою кількістю відліків;
- вирівнювання амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) осцилографа;
- корекцію фазово-частотної характеристики осцилографа;
- фільтрацію власних шумів осцилографа;
- програмне розширення смуги пропускання осцилографа.

Подаючи на вхід синусоїдальний сигнал з частотою f_s, частоту дискретизації приладу доцільно встановити не менше, ніж $5f_s$. Тоді на один період сигналу припадатиме 5 відліків. Це не дає змоги формувати на екрані осцилограму у вигляді синуса простим з'єднанням точок – лінійною інтерполяцією, але її можна відтворити досить точно програмною інтерполяцією (рис. 2.5).

За теоремою Котельникова–Найквіста кожну неперервну функцію (аналоговий сигнал), в якій максимальні частоти обмежені $f_{\max}$, можна повністю визначити дискретними відліками, якщо їх брати з інтервалами часу не більшими від $\Delta t = 1/2f_{\max}$. Частоту $f_d = 1/\Delta t$ називають частотою дискретизації. Тоді аналоговий сигнал відновлюють за формулою:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{2Tf_{\max}} s(n\Delta t)\frac{\sin(2\pi f_{\max}(x - n\Delta t))}{2\pi f_{\max}(x - n\Delta t)}, \qquad (2.4)$$

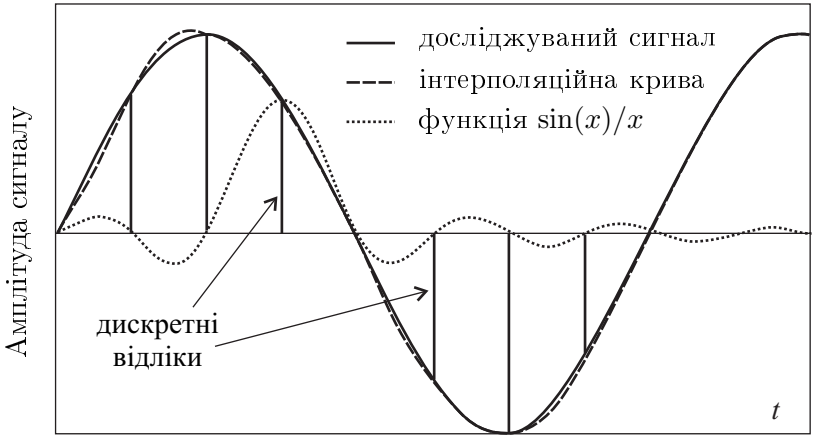

Рис. 2.5. Алгоритм інтерполяції $\sin(x)/x$, який використовують у цифрових осцилографах. Довжини вертикальних відрізків є дискретними відліками досліджуваного сигналу

де s – дискретні відліки функції $y(t)$; T – інтервал часу, для якого проводять реконструкцію. Ця формула є основою алгоритму інтерполяції, за яким функція відтворюється сумою функцій $\sin(x)/x$, з центрами взятими в кожній окремій точці дискретизації (рис. 2.5). Недоліком такого способу інтерполяції є затрати додаткового часу на розрахунки, проте в сучасних цифрових осцилографах використовують потужні сигнальні процесори.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтеся з основними засобами налаштування аналогового осцилографа реального часу: чутливості, тривалості горизонтальної розгортки, яскравості й фокусування променя, підсвічуванням шкали тощо.

2. Зберіть схему вимірювання змінних електричних сигналів за допомогою аналогового осцилографа. Як джерело викори-

стайте генератор сигналів від звукової карти ПК. Виконайте потрібні з'єднання на макеті та переконайтеся у правильності ввімкнення осцилографа та генератора.

3. Отримайте осцилограму, підбираючи підсилення та тривалість горизонтальної розгортки. Ознайомтеся з основними методами синхронізації горизонтальної розгортки – внутрішньою та зовнішньою; додатним та від'ємним перепадом напруги; запуском лише за наявності сигналу.

4. Виміряйте амплітуду сигналу та встановіть числове значення діючої напруги. Визначте період і частоту сигналу. Пам'ятайте правило вимірювання осцилографом, за яким відлік величини є найточнішим тоді, коли він перевищує половину розмірів екрана.

5. Отримайте фігури Ліссажу, використовуючи сигнали від генератора або від звукових карт комп'ютера. Правила увімкнення можна довідатися у викладача. Програмно задаючи частоти двох сигналів, отримайте картини згідно з рис. 2.3 та перевірте формулу (2.3).

6. Використайте стандартні звукові карти комп'ютера в якості цифрового запам'ятовуючого осцилографа. Виконайте налаштування ЗК для калібрування його шкали.

7. Визначте характеристики такого пристрою: смугу частот досліджуваного сигналу, частоту дискретизації, чутливість, максимальну та мінімальну напруги.

8. Збережіть результати вимірювань за допомогою цифрового осцилографа у вигляді зображення й текстового файлу. Опрацюйте ці результати іншими програмами, надрукуйте графіки досліджених сигналів.

Контрольні запитання:

1. Поясніть будову та принцип дії електронно-променевої трубки. Які у неї переваги й недоліки під час вимірювань на осцилографі? Назвіть кілька відомих вам приладів, у яких використовують ЕПТ. Чи існують їхні аналоги, але з іншими технологіями відображення без ЕПТ?

2. Як формують горизонтальну розгортку електронного променя? Для чого потрібна її синхронізація? Чим на вашу думку обмежена максимальна швидкість руху світлової плями від електронного променя на екрані ЕПТ?

3. Поясніть методи вимірювання частоти та амплітуди сигналів за допомогою аналогового осцилографа? Як можна зберігати результати вимірювань АОРЧ?

4. Як працює цифровий осцилограф? Чи використовують у ньому ЕПТ? Що таке частота дискретизації? Порівняйте два типи осцилографів – аналоговий та цифровий, вказавши на їхні переваги та недоліки.

5. Якими мають бути вимоги до багатоканальних осцилографів? Для чого потрібні такі прилади?

6. Поясніть процес утворення фігур Ліссажу та їхнє використання для визначення відношення частот.

7. Що таке амплітудно-частотна характеристика осцилографа? Від чого залежить максимальна робоча частота осцилографа та якою має бути будова ЕПТ, щоб цю частоту можна збільшити?

Лабораторна робота 3

Вивчення закону Ома та правил Кірхгофа

Мета роботи: експериментальна перевірка законів Ома для повного кола та ділянки кола, правил Кірхгофа для вузлів та замкнутих контурів.

3.1 Закон Ома для постійного струму. Опір провідників

Провідниками є тіла, в яких за наявності електричного поля виникає електричний струм. Для них справедливим є експериментально встановлений *закон Ома*, за яким сила струму I пропорційна до падіння напруги U на однорідному провіднику $I = U/R$ з коефіцієнтом пропорційності $1/R$, величину ж R називають *електричним опором*.

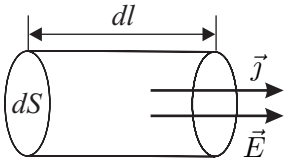

Рис. 3.1. До пояснення закону Ома в диференційній формі

Закон Ома прийнято записувати в диференційній формі. Виділимо елементарний циліндричний об'єм з площею основи dS і висотою dl, твірні якого паралельні до вектора густини струму $\vec{j}$ (рис. 3.1). Тоді сила струму через поперечний перетин циліндра дорівнюватиме jdS, напруга на ньому Edl, а опір $\rho\dfrac{dl}{dS}$. Отже, записана вище формула для зв'язку між струмом та напругою на

такому провіднику виглядатиме так:

$$jdS = \frac{dS}{\rho dl} \cdot Edl. \tag{3.1}$$

Оскільки носії заряду рухаються паралельно до вектора напруженості електричного поля $\vec{E}$, то

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho}\vec{E} = \sigma\vec{E}, \tag{3.2}$$

де величина $\sigma = 1/\rho$ називається коефіцієнтом провідності, чи просто *провідністю* матеріалу. Одиницю, яка має розмірність обернену до Ома, називають *Сіменсом* (См), отже, розмірність провідності См/м.

3.2 Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

Розрахунки електричних кіл можна суттєво спростити, використовуючи два правила Кірхгофа. *Перше правило* стосується вузлів кіл: алгебраїчна сума всіх струмів, які сходяться в будь-якій точці розгалуження, дорівнює нулеві $\sum I_k = 0$. Вважають, що струми, які протікають до вузла й від нього, мають протилежні знаки.

Справді, розгляньмо розгалужене коло на рис. 3.2 (ліворуч). Воно має точки A, B, C, D, E з різними потенціалами, в них сходяться три й більше провідників. Між точками розгалуження є ділянки кола 1, 2, ..., 7 з певними опорами R_1, R_2, ..., R_7 та джерелами е.р.с. $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$,... Виберімо довільну точку розгалуження, наприклад точку E, в якій сходяться три ділянки (3, 4 і 7) зі струмами I_3, I_4 та I_7. Вважатимемо струми додатними, якщо вони напрямлені до точки розгалуження (I_3), і від'ємними, якщо вони напрямлені від точки розгалуження (I_4 та I_7). Алгебраїчна сума усіх струмів дорівнює зарядові, який приходить до точки E за одиницю часу. Якщо струми в колі постійні, то сума цих струмів має дорівнювати нулеві, інакше потенціал точки E, а отже, й

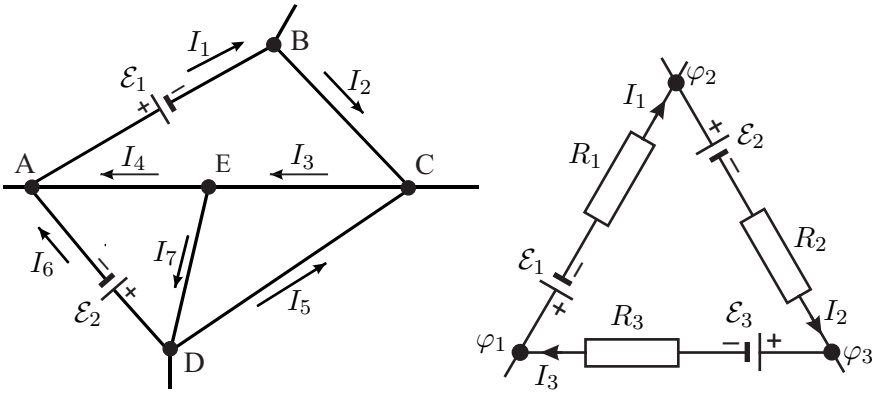

Рис. 3.2. Розгалужені електричні кола, які ілюструють правила Кірхгофа

струм у колі залежав би від часу. Ці міркування справедливі для кожної з точок на рис. 3.2.

Розгляньмо тепер замкнений контур на рис. 3.2 (праворуч) і застосуймо закон Ома до окремих його ділянок. Тоді для різниць потенціалів матимемо:

$$\begin{aligned} U_{21} &= \varphi_2 - \varphi_1 = I_1 R_1 + \mathcal{E}_1, \\ U_{32} &= \varphi_3 - \varphi_2 = I_2 R_2 + \mathcal{E}_2, \\ U_{31} &= \varphi_3 - \varphi_1 = I_3 R_3 + \mathcal{E}_3. \end{aligned} \tag{3.3}$$

Додаючи ці рівняння, одержимо рівність

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3, \tag{3.4}$$

яка виражає *друге правило Кірхгофа* – алгебраїчна сума добутків сил струмів на опори ділянок кіл замкнутого контура дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с., які діють у цьому контурі. Воно дає змогу спрощувати розрахунки електричних кіл порівняно із законом Ома, важливо лише, щоб ці рівняння були незалежними.

Правила Кірхгофа не відображають нових властивостей електричного поля. Перше правило означає не що інше, як умову

стаціонарності струмів. Друге правило ми отримали тому, що електрична напруга по замкненому контуру дорівнює нулеві, а отже, це правило є наслідком основної властивості електростатичного поля, за якою робота переміщення заряду замкненим контуром дорівнює нулеві. Однак обидва правила Кірхгофа дуже корисні під час розв'язування задач.

Укладені за першим та другим правилами Кірхгофа рівняння утворюють систему елгебраїчних рівнянь першого порядку. Кількість рівнянь дорівнює кількості струмів, які протікають у розгалуженому колі. Розв'язок цієї системи дає змогу визначити будь-яку невідому величину (силу струму, опір, е.р.с. джерела струму) на будь-якій ділянці кола. Якщо внаслідок обчислення деякі струми будуть отримані зі знаком мінус, то це означає, що їхні справжні напрямки протилежні до позначених на схемі.

3.3 Закон Ома для повного кола

Закон Ома у формі рівняння (3.1), чи просто $U = IR$ справедливий лише для однорідної ділянки кола, на якій немає стрибків потенціалів, зумовлених контактними явищами чи дією електрорушійних сил.

Електричне коло переважно складається з джерела струму, провідників і опору навантаження. Оскільки опір провідників зазвичай дуже малий, то струм у колі дорівнюватиме

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}, \tag{3.5}$$

де $\mathcal{E}$ – е.р.с. джерела; r – опір джерела; R – опір навантаження. Напруга на навантаженні (напруга на затискачах джерела)

$$U = IR = \mathcal{E}\frac{R}{r + R} \tag{3.6}$$

є меншою від $\mathcal{E}$. Якщо $R = \infty$ (коло розімкнуте), то $U = \mathcal{E}$.

Електрична потужність P, яку забезпечує джерело струму, дорівнює $P = \mathcal{E}I$, а з врахуванням (3.5):

$$P = \frac{\mathcal{E}^2}{r+R}. \tag{3.7}$$

Проте на навантаженні R виділяється тільки частина цієї потужності

$$P_{\text{н}} = RI^2 = \frac{\mathcal{E}^2}{r+R} \cdot \frac{R}{r+R}, \tag{3.8}$$

яку можна вважати корисною. Інша частина витрачається в джерелі струму й не є корисною.

Можна ввести к.к.д. η джерела струму, як відношення корисної потужності до усієї потужності:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P} = \frac{R}{r+R}. \tag{3.9}$$

З цієї формули видно, що з метою збільшення к.к.д. опір навантаження має значно перевищувати опір джерела струму. Однак, легко показати, що найбільшу потужність можна відібрати за умови $R = r$, тоді к.к.д. $\eta = 0{,}5$.

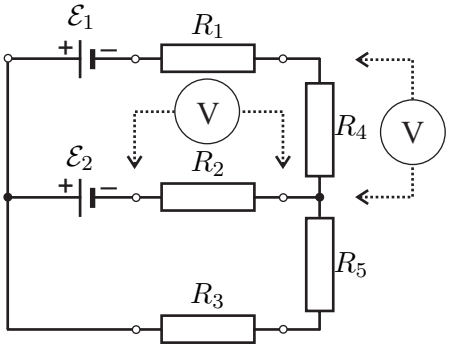

Рис. 3.3. Схема електричного кола для перевірки закону Ома та правил Кірхгофа

Порядок виконання роботи:

1. Попередньо виміряйте мультиметром величини опорів R_1 – R_5 (рис. 3.3) для розрахунків струмів, що протікатимуть крізь них в електричному колі.

2. Складіть електричне коло за рис. 3.3, використовуючи готові елементи макету – резистори та батареї живлення.

3. Почергово приєднуючи мультиметр до кожного резистора та джерела, виміряйте напруги на них. За цими даними перевірте закон Ома для повного кола та правила Кірхгофа.

4. Виконайте аналогічні вимірювання й розрахунки, попередньо змінивши полярність одного із джерел живлення $\mathcal{E}_1$ чи $\mathcal{E}_2$, які зображені на схемі.

5. Використайте комп'ютерну програму моделювання електричного кола з рис. 3.3. Використайте потрібну кількість амперметрів та вольтметрів для контролю за усіма елементами кола. Порівняйте результати комп'ютерного моделювання з даними, які були одержані експериментально.

Контрольні запитання:

1. Запишіть основні співвідношення, які описують процеси протікання постійного струму в електричному колі.

2. Сформулюйте правила Кірхгофа та поясніть їхній фізичний зміст.

3. Як пояснити від'ємні значення струму?

4. Як виміряти е.р.с. джерела струму та його внутрішній опір?

5. За яких умов потрібно використовувати закон Ома для повного кола?

Лабораторна робота 4

Дослідження електростатичного поля

Мета роботи: побудова еквіпотенціальних ліній електростатичного поля для різної конфігурації електродів шляхом експериментального моделювання в провідному середовищі, крізь яке протікає струм.

4.1 Електростатичне поле

У просторі із системою заряджених тіл існує силове електростатичне поле, яке визначається силою, що діє на "пробний заряд" у певній точці простору. Пробний заряд q_0 має бути точковим і достатньо малим за величиною, щоб не вносити істотних спотворень у силове поле, утворене системою зарядів. Щоб напруженість $\vec{E}$ електростатичного поля не залежала від величини заряду q, її визначають як відношення сили $\vec{F}$, що діє на заряд, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \tag{4.1}$$

Електростатичне поле можна зобразити графічно у вигляді силових ліній (ліній напруженості). Вектор напруженості $\vec{E}$ у кожній точці такої лінії має напрям дотичної до неї. Густина ліній характеризує величину напруженості електростатичного поля. Поблизу точкових зарядів ці лінії густішають, а напруженість $\vec{E}$ зростає. Напрям електростатичного поля, як видно з (4.1), збігається з напрямом сили, яка діє на позитивний заряд у цій точці простору. Силові лінії $\vec{E}$ починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах, або йдуть на нескінченність. Силові лінії електростатичного поля незамкнуті. Силу, яка діє на точковий заряд q, повністю визначає величина самого заряду й напру-

женість електростатичного поля в цій точці простору.

$$\vec{F} = q\vec{E}. \tag{4.2}$$

Для вектора $\vec{E}$ справедливий принцип суперпозиції: напруженість поля, утвореного декількома зарядами, дорівнює векторній сумі напруженостей, які створені кожним зарядом зокрема

$$\vec{E} = \vec{E_1} + \vec{E_2} + \vec{E_3} + \ldots + \vec{E_n} = \sum_i \vec{E_i}. \tag{4.3}$$

Сили взаємодії двох точкових зарядів паралельні до лінії, яка їх з'єднує, і залежать лише від відстані між ними. Оскільки сила, що діє на заряд в електростатичному полі, є центральною, то її можна віднести до консервативних сил. Внаслідок цього робота переміщення заряду в електростатичному полі не залежить від траєкторії руху, її визначає лише початкове й кінцеве положення заряду на цій траєкторії. Тому стаціонарне електростатичне поле є потенціальним.

У кожній точці такого поля можна, окрім силової характеристики $\vec{E}$, ввести енергетичну характеристику – потенціал φ. Під час переміщення заряду q довільним шляхом від точки з потенціалом φ_1 до точки з потенціалом φ_2 сили електростатичного поля виконують роботу

$$A_{12} = q(\varphi_2 - \varphi_1). \tag{4.4}$$

Отже, різницю потенціалів $\Delta\varphi_{12}$ між точками 1 і 2 можна ввести, як відношення роботи A_{12} до величини заряду q:

$$\Delta\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = A_{12}/q. \tag{4.5}$$

Під час нескінченно малого переміщення $\vec{dl}$ сила $\vec{F}$ виконує елементарну роботу $dA = \vec{F} \cdot \vec{dl} = q\vec{E} \cdot \vec{dl}$. Цю ж роботу можна виразити також через приріст потенціалу $dA = -q \cdot d\varphi$. Прирівнявши обидві роботи, одержуємо: $\vec{E} \cdot \vec{dl} = |\vec{E}| \cdot |\vec{dl}| \cos\alpha = E_{dl} \cdot |\vec{dl}| = -d\varphi$.

Отже, зв'язок між проекцією вектора $\vec{E}$ на напрям переміщення $\vec{dl}$ і потенціалом φ електричного поля

$$E_{dl} = -\frac{d\varphi}{dl}. \tag{4.6}$$

Тоді для компонент вектора $\vec{E}$ можна записати

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}, \quad E_y = -\frac{d\varphi}{dy}, \quad E_z = -\frac{d\varphi}{dz}, \tag{4.7}$$

а сам вектор

$$\vec{E} = -\left(\frac{d\varphi}{dx}\vec{\imath} + \frac{d\varphi}{dy}\vec{\jmath} + \frac{d\varphi}{dz}\vec{k}\right) = -\mathrm{grad}\,\varphi = -\vec{\nabla}\varphi. \tag{4.8}$$

Це рівняння дає зв'язок між силовою і енергетичною характеристиками електричного поля. Поверхні однакового потенціалу $\varphi = \mathrm{const}$ називають *еквіпотенціальними*. Під час переміщення заряду по такій поверхні робота електростатичного поля дорівнює нулеві. Це означає, що вектор $\vec{E}$ перпендикулярний до цієї поверхні. Але оскільки цей же вектор паралельний до силової лінії, то силові лінії електростатичного поля перетинають еквіпотенціальні поверхні під прямим кутом.

4.2 Методика вимірювання та апаратура

У слабко провідне середовище (недистильовану воду) поміщають два металеві провідники, приєднані до джерела змінного струму. Оскільки провідність середовища набагато менша від провідності металевих електродів, то потенціал в різних точках цих електродів можна вважати однаковим. При цьому топографія поля в просторі між ними буде такою ж, якою була б топографія електростатичного поля між зарядженими провідниками в однорідному непровідному середовищі.

Використання змінного струму запобігає виділенню на електродах складових частин електроліту, яким є недистильована вода. Для змінного струму в електроліті змінне електричне поле не є потенціальним, оскільки напруга змінюється з часом. Але різні еквіпотенціальні поверхні характеризуються різним значенням амплітуди змінної напруги. Напругу будь-якої точки всередині ванни відносно одного з електродів легко виміряти вольтметром з великим вхідним опором. Ці вимірювання дають змогу визначити форму еквіпотенціальних ліній поля, яке утворене у ванні.

Отримавши картину еквіпотенціальних ліній, можна побудувати відповідну картину силових ліній. Окрім того, на підставі формули (4.6) можна оцінити числове значення напруженості електричного поля в будь-якому місці ванни.

$$|\vec{E}| = \frac{|\varphi_2 - \varphi_1|}{\Delta l}. \tag{4.9}$$

Апаратура для вимірювань (рис. 4.1) складається з електролітичної ванни 1, виготовленої з діелектрика й заповненої водою; двох металевих електродів 2 і 3 у вигляді пластин або тіл іншої геометричної форми, приєднаних до джерела змінної напруги 4; зонда 5, призначеного для встановлення величини потенціалу електричного поля; цифрового вольтметра (мультиметра) 6, який вимірює напругу між електродом 2 і зондом 5; а також провідного тіла (наприклад, металевого кільця 7), призначеного для занурення в електроліт (воду) з метою створення в ньому неоднорідного електричного поля.

Вольтметр через стандартний інтерфейс RS232 зв'язаний з комп'ютером, тому його відліки можна програмно читати й зберігати у пам'яті ПК. Координати зонда (x та y) установлюють автоматично за допомогою двох крокових двигунів, обертання яких відповідні механізми перетворюють у зміну лінійного положення зонда. Використовуючи принцип роботи сканера, ці координати також вводять у комп'ютер. Кількість відліків та крок переміщення зонда між ними задають перед початком вимірювань. Вели-

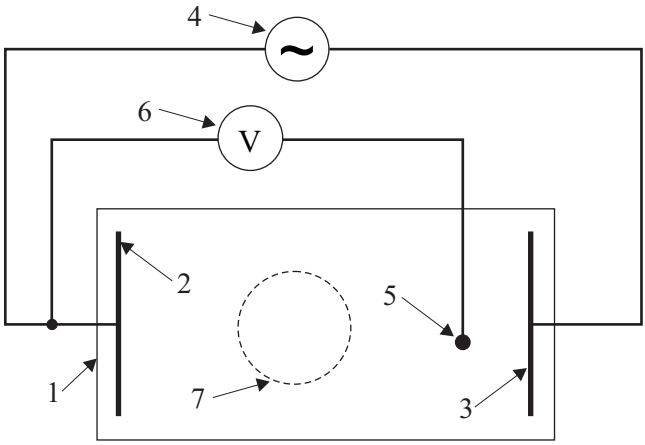

Рис. 4.1. Схема апаратури для вимірювання просторового розподілу потенціалу електростатичного поля. 1 – ванна з водою, 2,3 – електроди, 4 – джерело змінної напруги, 5 – рухомий зонд, 6 – мультиметр з інтерфейсом RS232, 7 – провідне тіло. Комп'ютер для керування вимірюваннями та лінії його з'єднання з апаратурою не зображені

чини напруги $U(x, y)$ для відповідних координат x та y записують у текстовий файл, який можна імпортувати програмами подальшого опрацювання експериментальних даних.

За цими результатами легко відтворити картину електростатичного поля у реальному масштабі. Зонд 5 переміщається між електродами доти, поки не буде виміряно принаймні 300 потенціалів поля, приблизно рівномірно розташованих між електродами 2 і 3. Також передбачено встановлення додаткових електродів по периферії ванни з окремими електричними контактами для зміни конфігурації досліджуваного поля.

Побудувавши декілька еквіпотенціальних поверхонь, отримаємо картину поля між електродами. Різниця потенціалів між двома еквіпотенціальними поверхнями та відома відстань між ними дають змогу, як показано вище, оцінити величину напруженості електричного поля в будь-якій точці між електродами.

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтеся зі схемою вимірювання (рис. 4.1). Для вимірювань достатньо під'єднати мультиметр до готового пристрою та перемкнути його на вимірювання змінної напруги. ПК керує вимірюваннями через порти RS232 та LPT.

2. Погодьте з викладачем конфігурацію досліджуваного поля, яка залежить від форми та кількості електродів, наявності тіл всередині ванни. Уважно вивчіть програму керування вимірюваннями та формат файлів для запису експериментальних результатів.

3. Приєднайте електроди (за вказівками викладача) до джерела змінної напруги. Введіть початкові умови: координати зонда перед вимірюваннями, крок вздовж осей x та y. На мультиметрі встановіть режим вимірювання змінної напруги з діапазоном 80 В та перевірте його роботу з відповідною програмою.

4. Для тестування апаратури доцільно попередньо виміряти потенціали для невеликої кількості точок з великим кроком між ними. Далі задавши межі переміщення зонда по всій ширині ванни за допомогою програмно керованих крокових двигунів, отримайте значення потенціалу принаймні для 500 рівномірно віддалених точок.

5. Опрацюйте отримані експериментальні результати за допомогою комп'ютерних програм, які дають змогу побудувати тривимірний (3D) графік еквіпотенціальних поверхонь.

6. За отриманою картиною еквіпотенціальних ліній проведіть 7–10 силових ліній між електродами.

7. Оцініть величину напруженості електричного поля E в декількох точках ванни.

8. Проведіть такі ж вимірювання для іншої конфігурації електростатичного поля. Покладіть у ванну провідне (металеве) тіло, отримайте картину поля і порівняйте результати за відсутності і за наявності провідного тіла між електродами.

Контрольні запитання:

1. Що таке напруженість і потенціал електростатичного поля? Який зв'язок між проекцією вектора напруженості на деякий напрям і потенціалом?

2. Як за картиною еквіпотенціальних ліній побудувати силові лінії електростатичного поля?

3. Доведіть, що силові лінії перетинають еквіпотенціальні поверхні під прямим кутом.

4. Як впливає провідне тіло на характер електростатичного поля?

5. Який кут між силовими лініями та поверхнею зарядженого провідника безпосередньо біля самого провідника?

6. Чому дорівнює напруженість і потенціал всередині зарядженого провідника при рівноважному розподілі його заряду?

7. Як можна розрахувати напруженість і потенціал поля точкового заряду?

8. Як можна розрахувати напруженість і потенціал поля, якщо заряджене тіло не можна вважати точковим зарядом?

9. Сформулюйте теорему Остроградського–Ґауса для вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі. Поясніть, для чого і як її застосовують.

Лабораторна робота 5

Вимірювання електричних властивостей сегнетоелектриків

Мета роботи: вивчення процесів перемикання сегнетоелектриків електричним полем, вимірювання параметрів петлі гістерезису, перевірка закону Кюрі–Вейса.

5.1 Сегнетоелектрики в електричному полі

Існують діелектрики, які за відсутності зовнішнього електричного поля володіють спонтанною поляризацією в певному температурному інтервалі. Оскільки це явище вперше спостерігали на кристалах сегнетової солі, вони одержали назву *сегнетоелектрики* (в англомовній літературі – *ferroelectrics*).

Важливою особливістю полярних діелектриків є нелінійна залежність поляризації P від прикладеного до кристалу електричного поля E. Зокрема, для слабких полів у звичайному (лінійному) діелектрику простежується лінійна залежність (рис. 5.1, *а*), а для сегнетоелектрика характерною є петля діелектричного гістерезису (від грец. $\eta\iota\sigma\tau\varepsilon\rho\varepsilon\sigma\iota\sigma$ – запізнення) (рис. 5.1, *б*).

Початкове ввімкнення електричного поля відповідає кривій 1 на рис. 5.1, *б*. Зменшення поляризації P відбувається вже за гілкою 2. Коли напруженість поля E досягає нуля, поляризація залишається ненульовою. Тільки за умови досягнення протилежної за знаком напруженості E_c вона досягає нуля. Величину E_c називають *коерцитивним полем*. Подальша зміна електричного поля дає симетричну картину, яка завершує петлю гістерезису за кривою 3.

Із петлі гістерезису можна визначити три параметри: коерцитивне поле E_c, залишкову поляризацію P_r і поляризацію насичення, або спонтанну поляризацію P_s (рис. 5.1, *б*).

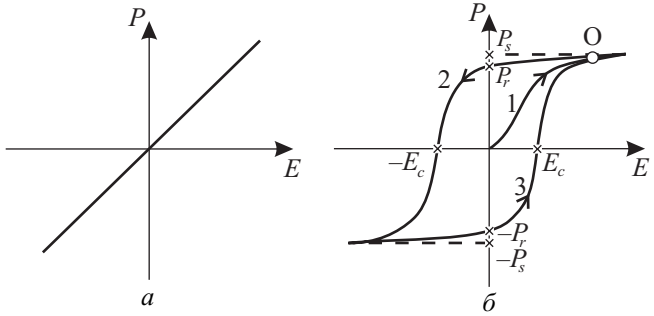

Рис. 5.1. Залежність поляризації від прикладеного до кристалу електричного поля. *а* – звичайний (лінійний) діелектрик; *б* – сегнетоелектрик

Таку поведінку поляризації пояснюють наявністю в сегнетоелектриків невеликих об'ємів – *доменів*, у межах яких елементарні дипольні моменти паралельні.

Сегнетоелектрикам зазвичай притаманні доволі великі (понад 10^2–10^4) значення діелектричної проникності ε порівняно з неполярними діелектриками, для яких ε перебуває в межах 1–10. Але після нагрівання сегнетоелектрика до деякої характерної для нього температури T_0 (цю температуру називають *точкою Кюрі*) відбувається фазовий перехід (ФП), гістерезисні явища зникають, сегнетоелектрик стає звичайним діелектриком і переходить у т.зв. *параелектричну* фазу.

Для більшості сегнетоелектриків можна простежити також значне зростання діелектричної проникності ε у ділянці температур, що поблизу ФП. Біля температури T_C діелектричну проникність описують *законом Кюрі–Вейса*:

$$\varepsilon = \frac{C_p}{T - T_C} \text{ (в парафазі)}; \qquad \varepsilon = \frac{C_f}{T_C - T} \text{ (в сегнетофазі)}, \quad (5.1)$$

де T_C – температура Кюрі–Вейса; C_p, C_f – константи Кюрі для пара- і сегнетофаз, причому найчастіше справедливий вираз $C_p/C_f = 2$, який також називають *законом двійки*. У полярних

діелектриках T_0 відповідає спаданню до нуля величини спонтанної поляризації P_s. Температури T_0 і T_C можуть відрізнятись для різних матеріалів на деяку величину, яка іноді сягає 10 К.

Окрім параметрів T_0, ε, C_p, C_f і T_C дуже важливою характеристикою полярних діелектриків є тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ – величина без розмірності, яку визначають за відношенням уявної частини комплексної величини ε до дійсної.

5.2 Вимірювання параметрів сегнетоелектричної петлі гістерезису

Спостерігати сегнетоелектричну петлю гістерезису безпосередньо на екрані осцилографа можна за порівняно простою схемою Сойєра–Тауера, яка зображена на рис. 5.2. Сьогодні її використовують у багатьох науково-дослідних лабораторіях світу.

До генератора сигналу звукової частоти (використовують деколи й мережу змінного струму 50 Гц) приєднано трансформатор, на вторинній обмотці якого можна одержати змінну напругу з амплітудою до 300 В. Для кристалу тригліцинсульфату (скорочено ТГС) коерцитивне поле E_c порівняно невелике (< 100 В/см), тому для товщини зразка $d \approx 3$ мм такої амплітуди достатньо.

Опори R_1 та R_2 (один із них змінний) утворюють регульований подільник, який дає змогу подавати на "X"-вхід осцилографа невелику напругу, потрібну для горизонтального відхилення електронного променя від центра екрана.

Паралельно до подільника послідовно ввімкнені два конденсатори, один з них є досліджуваним кристалом з невідомою ємністю C_x, а другий еталонним конденсатором з ємністю $C = 2$ мкФ. Якщо забезпечити умову $C_x \ll C$ (зазвичай ємність кристалу не перевищує 1 нФ), то напруга на кристалі $U_x \gg U_c$, але вона буде пропорційною до величини горизонтального відхилення променя.

На "Y"-вхід осцилографа подають напругу U_c з еталонного конденсатора, вона пропорційна до заряду q на ньому й на се-

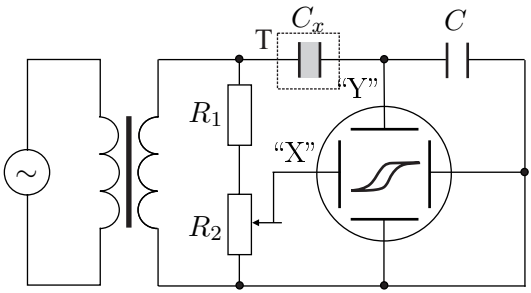

Рис. 5.2. Схема Сойєра–Тауера для вимірювання параметрів сегнетоелектричної петлі гістерезису. T – термостат. Інші позначення за текстом

гнетоелектрику. Отже, $C_x U_x = C U_c$, а поляризація P на кристалі дорівнює поверхневій густині заряду $P = \sigma = q/S$, де S – площа кристала.

Вимірювання спонтанної поляризації P_s зводиться до вимірювання площі кристалічного конденсатора й величини напруги U_c на еталонному конденсаторі, як інтерполяції від ділянки насичення до нульового значення електричного поля (точка P_s рис. 5.1):

$$P_s = \frac{C U_c}{S}. \tag{5.2}$$

З петлі гістерезису можна визначити також коерцитивне поле E_c, яке пропорційне її півширині й дорівнює $E_c = U_x/d$, де d – товщина кристала.

Для оцінки якості конденсатора з діелектриком використовують поняття *добротності* Q, яка пов'язана із *тангенсом діелектричних втрат* $\operatorname{tg}\delta = 1/Q$. За визначенням добротність конденсатора дорівнює

$$Q = \frac{W}{W_T}, \tag{5.3}$$

де W – максимальна енергія конденсатора, а W_T – її втрати за один період зміни напруги. Втрати енергії віднесені до об'єму V

сегнетоелектрика $w_T = W_T/V$ обумовлені гістерезисом, тому їх можна виразити як

$$w_T = \frac{1}{2}\int_0^T DdE. \tag{5.4}$$

Оскільки для сегнетоелектрика діелектрична проникність $\varepsilon \gg 1$, то індукція $D = \varepsilon_0\varepsilon E = \varepsilon_0(1+\varkappa)E \approx P$, а формула для втрат:

$$w_T = \frac{1}{2}\int_0^T PdE = \frac{1}{2}\int_0^T \frac{q}{S}\frac{dU}{d} = \frac{1}{2V}\int_0^T qdU. \tag{5.5}$$

Використовуючи формулу для енергії конденсатора $W = \frac{1}{2}qU$, одержуємо вираз для тангенса діелектричних втрат

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\frac{1}{2}\int_0^T qdU}{\frac{q_0U_0}{2}} = \frac{S_q}{U_0q_0}. \tag{5.6}$$

Тут U_0, q_0 – напруга й заряд, які відповідають точці O на рис. 5.1; а S_q – площа петлі гістерезису в змінних (U, q), до яких легко перейти: $q = SP$, $U = Ed$.

Порядок виконання роботи:

Схема Сойєра–Тауера (рис. 5.2) зібрана в окремому блоці, для її використання достатньо приєднати осцилограф (входи "X" та "Y") і звуковий генератор. Можна також скористатися цифровим осцилографом на ПК, увімкнувши для цього відповідний режим.

Окрім того, передбачено нагрівання кристала та вимірювання його температури за допомогою термопари та АЦП на макеті. Залежно від поданої на термостат напруги від окремого регульованого джерела, всередині його робочого об'єму встановлюється певна температура. Для ТГС точка Кюрі $T_C = T_0 = 49\,^\circ\mathrm{C}$.

1. Складіть електричну схему згідно з рис. 5.2. Використайте цифровий осцилограф для спостереження часової залежності сигналів U_x та U_c. Підберіть оптимальні умови для цього (частоту генератора, напругу, чутливість осцилографа).

2. Ознайомтеся з процесом зміни та стабілізації температури кристала. За вказівками викладача виберіть потрібний режим нагрівання. Пам'ятайте, що процес зміни температури є повільним і вимагає принаймні 5–7 хвилин для стабілізації.

3. Встановіть масштаби екрана осцилографа. Попередньо його слід прокалібрувати згідно опису. Для градуювання осі X потрібно також виміряти вольтметром напругу U_x на вторинній обмотці трансформатора. Максимальне горизонтальне відхилення променя відповідатиме напрузі $\sqrt{2}U_x$.

4. Виміряйте та запишіть параметри петлі гістерезису, на підставі яких визначте спонтанну поляризацію P_s за формулою (5.2), коерцитивне поле E_c, тангенс діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ за формулою (5.6) і добротність Q.

5. Аналогічні вимірювання виконайте для температур в інтервалі 20–55 °C з кроком 5 °C. Побудуйте температурні залежності цих сегнетоелектричних параметрів.

Контрольні запитання:

1. Поясніть суть сегнетоелектричних явищ та причину виникнення гістерезису. Що таке точка Кюрі?

2. Як залежать від температури кристала спонтанна поляризація, коерцитивне поле і добротність?

3. Поясніть закон Кюрі–Вейса. Як ці властивості сегнетоелектрика можна використовувати на практиці? Що для цього доцільно забезпечити?

4. Який фізичний зміст діелектричних втрат та добротності конденсатора?

5. Назвіть кілька відомих вам сегнетоелектричних кристалів та запишіть їхні хімічні формули.

Лабораторна робота 6

Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі

Мета роботи: експериментальне визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.

6.1 Магнітне поле Землі

Магнітне поле Землі впливає на роботу багатьох пристроїв, тому його величину й напрям потрібно точно знати для кожної місцевості. Добре відомо, що вільно підвішена магнітна стрілка зорієнтується вздовж дотичної до силових ліній магнітного поля Землі. Отже, горизонтально вона висітиме лише на магнітному екваторі, а в інших точках – під кутом *магнітного нахилення* θ до горизонту, який залежить від широти місцевості. На магнітних полюсах $\theta = 90^\circ$ і стрілка встановиться вертикально.

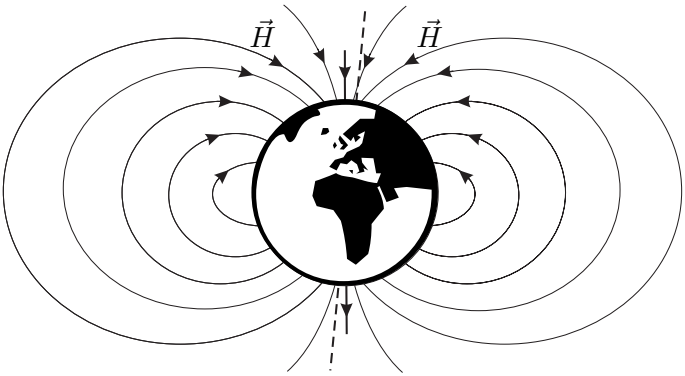

Рис. 6.1. Магнітне поле Землі подібне до поля магніту, орієнтованого приблизно з півночі на південь. Штрихова лінія – вісь обертання Землі

Відомо, що розташування географічного та магнітного полюсів не збігається (рис. 6.1). Південний магнітний полюс розташований біля північних берегів Америки (приблизно $75°50'$ північної широти та $96°$ західної довготи. У південній півкулі точка сходження ліній магнітного поля (північний магнітний полюс) лежить на $70°10'$ південної широти та $150°45'$ східної довготи. Магнітна вісь – пряма, яка з'єднує обидва магнітні полюси, не є земним діаметром, оскільки не проходить через центр Землі.

Це призводить до того, що вертикальна площина з магнітною стрілкою зазвичай не паралельна до географічного меридіана, а утворює невеликий кут *магнітного схилення* φ, як зображено на рис. 6.2.

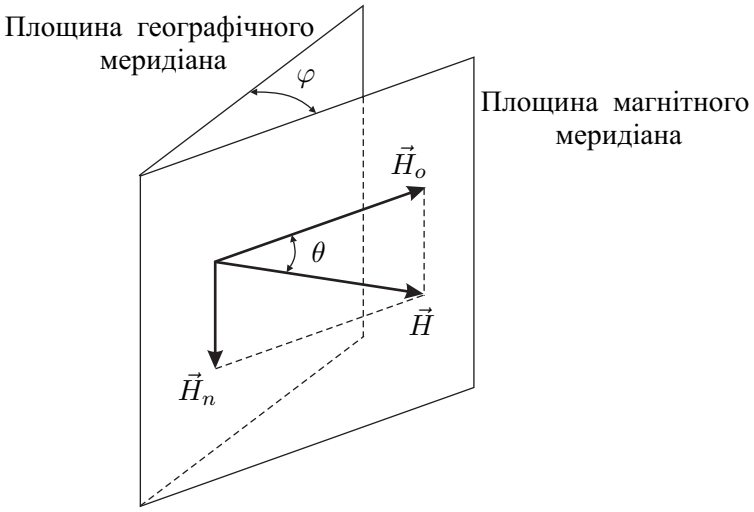

Рис. 6.2. Основні параметри магнітного поля Землі. θ – магнітне нахилення, φ – магнітне схилення.

Отже, вектор $\vec{H}$ напруженості магнітного поля Землі має горизонтальну $\vec{H}_o$ і вертикальну $\vec{H}_n$ складові, $\vec{H} = \vec{H}_o + \vec{H}_n$. Якщо виміряти лише горизонтальну складову $\vec{H}_o$ то, знаючи кут нахи-

лення θ, можна знайти величину й напрям вектора $\vec{H}$ та заодно й вектора індукції магнітного поля Землі $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$.

6.2 Тангенс-гальванометр

Прилад для вимірювання горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі – тангенс-гальванометр – складається з вертикально розташованого колового провідника (котушки з n витків дроту) та магнітної стрілки, яка розташована у його центрі й може вільно обертатися навколо вертикальної осі. Струм у коловому провіднику створює магнітне поле з напруженістю $\vec{H}_i$, пропорційною до величини струму I.

Розгляньмо перетин котушки горизонтальною площиною (рис. 6.3). Внаслідок дії двох полів: магнітного поля Землі (зокрема горизонтальної його складової $\vec{H}_o$) і магнітного поля струму з напруженістю $\vec{H}_i$ стрілка встановиться паралельно до вектора $\vec{H}_1$, який є сумою $\vec{H}_1 = \vec{H}_o + \vec{H}_i$, причому

$$H_i = H_o \operatorname{tg} \beta. \tag{6.1}$$

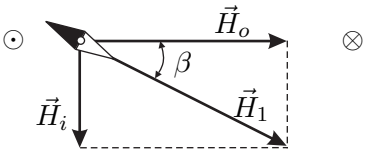

Рис. 6.3. Схема полів, які діють на магнітну стрілку тангенс-гальванометра. Символами $\otimes$ та $\odot$ зображені напрямки струму в горизонтальному перетині колового провідника

Оскільки в центрі котушки зі струмом напруженість магнітного поля $H_i = \dfrac{nI}{2r}$, то

$$I = \frac{2rH_o}{n} \operatorname{tg} \beta = C \operatorname{tg} \beta, \tag{6.2}$$

де $C = 2rH_o/n$. Для конкретного місця на Землі ця величина має бути сталою, тому її можна вважати *константою тангенс-гальванометра*. Якщо кут $\beta = 45°$, то $C = I$. Величина ж горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі дорівнює

$$H_o = \frac{Cn}{2r}. \tag{6.3}$$

Отримані співвідношення справедливі за умови, що магнітна стрілка набагато менша від радіуса колового провідника.

Порядок виконання роботи:

Компас з кутовими поділками для відліку положення стрілки розташовано у центрі круглої вертикальної котушки на підставці. Електрична схема для вимірювань включає джерело регульованої напруги (тут використовують ЦАП, який входить до макету і має ручне керування від кнопок ∇ та $\triangle$), вольтметр (мультиметр) V і колову котушку з опором $R_к$ та кількістю витків $n = 100$ (рис. 6.4). Оскільки мультиметр вимірює суму напруг U на опорі R та на котушці, то сила струму, який протікає крізь витки котушки дорівнюватиме $I = U/(R + R_к)$. Отже, змінюючи напругу U (від $-6{,}6$ до $+6{,}6$ В за характеристиками макета), можна плавно змінювати величину та напрям струму I.

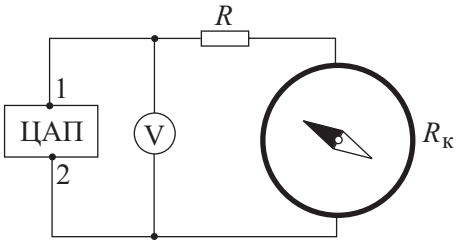

Рис. 6.4. Схема ввімкнення тангенс-гальванометра, вольтметра (мультиметра) V та ЦАП (джерела напруги) для вимірювання напруженості магнітного поля Землі. 1 – контакт „Outbuf1", 2 – контакт „GND" на макеті

1. Складіть електричну схему згідно з рис. 6.4. Мультиметр перемкніть на вимірювання постійної напруги. Повертаючи підставку тангенс-гальванометра, встановіть площину котушки паралельно до магнітної стрілки. Запишіть кутове положення стрілки β_0 за відсутності струму в колі.

2. Виберіть на макеті опцію, яка відповідатиме роботі його мікроконтролера, як ЦАП. Використовуючи кнопки ∇ та $\triangle$, змінюйте напругу від 0 до максимальної за показами дисплея (для зміни знаку переставляйте контакти 1 і 2). Для кожного значення напруги U (відлік мультиметра) визначайте кут β повороту магнітної стрілки і заносьте ці дані в таблицю на ПК.

3. Побудуйте залежність $I = f[\mathrm{tg}(\beta - \beta_0)]$, яка згідно формули (6.2) має бути лінійною. Числове значення R та $R_{\text{к}}$ отримайте у викладача. Визначте константу тангенс-гальванометра C. Обчисліть значення H_o за формулою (6.3).

4. Використовуючи відоме значення кута магнітного нахилення θ для нашої місцевості, обчисліть величину повної напруженості $H = H_o/\cos\theta$ магнітного поля Землі.

Контрольні запитання:

1. Що таке напруженість та індукція магнітного поля?

2. Які основні параметри магнітного поля Землі? Знайдіть приклади пристроїв, на роботу яких впливає це поле.

3. Яка відмінність між географічними та магнітними полюсами?

4. Поясніть будову та принцип дії тангенс-гальванометра?

5. При яких кутах відхилення магнітної стрілки результати вимірювань найточніші?

Лабораторна робота 7

Дослідження ефекту Холла

Мета роботи: вивчення процесів взаємодії рухомих зарядів з магнітним полем, вимірювання константи Холла, ознайомлення з сенсорами магнітного поля.

7.1 Ефект Холла в напівпровідниках

Розгляньмо пластинку напівпровідника p-типу, через яку протікає електричний струм I перпендикулярно до зовнішнього магнітного поля з індукцією $\vec{B}$ (рис. 7.1). На додатний заряд q, який є носієм струму, в магнітному полі діє сила Лоренца

$$\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}], \tag{7.1}$$

де v – швидкість руху заряду.

Сила Лоренца відхиляє заряди (в напівпровідниках p-типу – це дірки) до верхньої грані напівпровідника, їхня концентрація там більшає, а біля нижньої – меншає. Внаслідок такого просторового перерозподілу зарядів виникає електричне поле з напруженістю $\vec{E}$, скероване від верхньої грані до нижньої. Це поле також

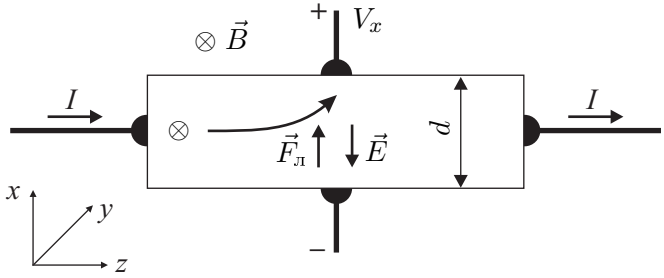

Рис. 7.1. Виникнення е.р.с. Холла у напівпровіднику

діє на заряди зі силою $q\vec{E}$, яка за напрямком протилежна до сили Лоренца. Розділення зарядів припиниться за умови рівності цих двох сил $q\vec{E} = q[\vec{v}\vec{B}]$. Тоді дірки вже не відхилятимуться, а різниця потенціалів між верхньою й нижньою гранями зразка дорівнюватиме

$$V_x = Ed = vBd. \tag{7.2}$$

Виникнення поперечної е.р.с. в напівпровіднику зі струмом, який перебуває в магнітному полі, називають ефектом Холла, а напругу V_x відповідно напругою Холла. Оскільки сила струму через пластинку $I = jS = qpvad$ (тут a, d – товщина та ширина пластинки, p – концентрація дірок), то підставивши у формулу (7.2) вираз для швидкості v, одержимо

$$V_x = \frac{IB}{qpa} = \frac{R}{a}IB. \tag{7.3}$$

Величину $R = 1/qp$ називають коефіцієнтом Холла.

Зауважимо, що ефект Холла можливий і в металах, де носіями струму є електрони. У напівпровіднику з електронною провідністю для аналогічного ж напрямку B та I (рис. 7.1) сила Лоренца відхиляє електрони також до верхньої грані. Це пояснюється тим, що для електронів протилежними порівняно з дірками будуть і заряд, і швидкість. Коефіцієнт Холла для напівпровідника n–типу $R = -1/qn$, а напруга V_x має протилежний знак. Але внаслідок розсіяння носіїв їхні швидкості у напівпровіднику неоднакові, тому в правій частині формули для коефіцієнта Холла R вводять множник A, величина якого перебуває у межах 1–2.

Оскільки електрони й дірки відхиляються магнітним полем в один бік, то величина R буде меншою, ніж для напівпровідника з носіями одного знаку й визначатиметься складнішою формулою

$$R = \frac{A}{q}\frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)^2}, \tag{7.4}$$

де μ_n, μ_p – рухливість електронів і дірок, відповідно.

Вимірюючи коефіцієнт Холла R, наприклад, у напівпровіднику n-типу і електропровідність ($\sigma_n = q\mu_n n$), можна визначити μ_n і n (якщо відомий коефіцієнт A). За умови постійного струму через зразок величина V_x визначається тільки індукцією магнітного поля B. Це дає змогу створювати *сенсори Холла* для вимірювання величини магнітних полів.

Якщо сенсор Холла помістити у змінне магнітне поле, то його можна використовувати для перетворення постійного струму у змінний з частотою магнітного поля. В таких схемах роботу сенсора характеризують коефіцієнтом використання

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}}, \tag{7.5}$$

який є відношенням потужності $P_{\text{н}}$, що виділяється на навантаженні у зовнішньому колі, до потужності $P_{\text{вх}}$ у вхідному колі. З'ясовується, що коефіцієнт η пропорційний до квадрату рухливості μ основних носіїв заряду, тому для виготовлення сенсорів Холла використовують напівпровідники з високою провідністю.

7.2 Методика вимірювання основних параметрів ефекту Холла

Для вимірювання е.р.с. Холла використовують зразок певної товщини d і пропускають крізь нього відомий струм I. Під час експерименту слід враховувати й можливість інших ефектів: гальваномагнітного, термомагнітного тощо. Для виключення їхнього впливу на результат можна скористатися властивістю парності – незалежністю цих ефектів від напрямку магнітного поля.

Магнітне поле створюють постійним магнітом або електромагнітом (двома котушками, ввімкненими послідовно). Змінювати величину індукції магнітного поля у зразку можна шляхом зміни віддалі від нього до постійного магніту або сили струму через котушки, яка буде пропорційною до напруги $U_{\text{М}}$. Цю напругу

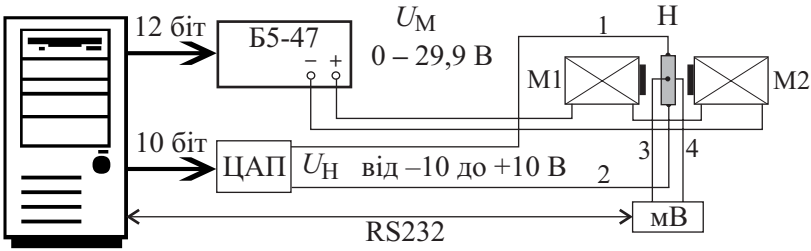

Рис. 7.2. Схема електричних з'єднань між приладами для дослідження ефекту Холла. Н – елемент (сенсор) Холла, М1,М2 – електромагніти, мВ – мультиметр, ввімкнений для вимірювання постійної напруги діапазону 80 мВ. 1,2 – провідники для подання напруги на сенсор, 3,4 – провідники для вимірювання е.р.с. Холла

програмно задають блоком живлення Б5-47, під'єднаним до ПК. Градуювання (залежність величини індукції B магнітного поля котушок від напруги $U_М$), які потрібні для розрахунків, проводять додатковим приладом для вимірювання магнітної індукції.

На рис. 7.2 зображена схема електричних з'єднань для дослідження ефекту Холла. Сила струму I через зразок пропорційна до прикладеної до нього напруги U_H, яку створює ЦАП, також керований від комп'ютера. Попередньо слід виміряти мультиметром електричний опір R зразка, тоді сила струму крізь нього дорівнюватиме $I = U_H/R$.

Програма керування апаратурою дає змогу вимірювати й зберігати експериментальні результати. Попередньо слід встановити межі й кроки змін напруги на сенсорі та на електромагніті. Таблиця з результатами вимірювань має три колонки даних: напруга $U_М$ на електромагніті; напруга U_H на зразку; е.р.с. Холла V_x.

Досліджувані зразки (сенсори Холла) виготовлені з напівпровідника у вигляді тонких пластинок, змонтованих на тримачах. Встановлення характеру провідності проводять за знаком е.р.с. Холла. Для цього потрібно знати напрямок струму у зразку й напрямок магнітного поля.

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть схему вимірювання за рис. 7.2. Ознайомтеся з приладом для вимірювання індукції магнітного поля в проміжку між магнітами.

2. Виміряйте електричний опір зразка мультиметром за відсутності напруги на ньому. Згодом використайте його значення для розрахунку струму через зразок.

3. Виміряйте сімейство залежностей $V_x = f(I)$ для різних величин індукції магнітного поля B та апроксимуйте їх прямими лініями. Знайдіть кутові коефіцієнти a нахилу цих прямих.

4. Побудуйте графік залежності $a = f(B)$, за кутовим коефіцієнтом цієї прямої визначте коефіцієнт Холла.

5. За знаком е.р.с. Холла встановіть, якого типу носії дають найбільший внесок у провідність зразка.

Контрольні запитання:

1. Що називають коефіцієнтом Холла? В яких речовин – напівпровідників чи металів – константа Холла сильніше залежить від температури?

2. Чи залежить результат вимірювання коефіцієнта Холла від розмірів зразка?

3. Знайдіть приклади застосування ефекту Холла в електронній апаратурі, побутовій техніці тощо. Які матеріали та які їхні розміри найкраще застосовувати для створення сенсорів Холла?

4. Скільки контактів мають сенсори Холла? Зобразіть схематично різні їхні конструкції.

Лабораторна робота 8

Спостереження процесів намагнічення ферромагнетиків

Мета роботи: вивчення процесів намагнічування ферромагнетиків, вимірювання їхніх характеристик, визначення магнітної проникності.

8.1 Ферромагнетики в магнітному полі

Повна індукція $\vec{B}$ магнітного поля в магнетиках є сумою індукції $\vec{B}_0$ зовнішнього поля та індукції $\vec{B}_m$ магнітного поля, утвореного самим магнетиком: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$. Відношення повної індукції $\vec{B}$ в досліджуваному середовищі до індукції $\vec{B}_0$ називають магнітною проникністю $\mu = \vec{B}/\vec{B}_0$.

Матеріали, для яких $\mu > 1$, називають *парамагнетиками*, вони збільшують магнітну індукцію (наприклад, в алюмінію $\mu =$ 1,000023; у повітрі $\mu =$ 1,00000038). У *діамагнетиків* магнітна проникність $\mu < 1$, тому в них магнітна індукція зменшується порівняно із зовнішньою (наприклад, у золота $\mu =$ 0,999961; у міді $\mu =$ 0,9999897).

Однак є речовини з магнітною проникністю, що набагато перевищує одиницю, це – *феррромагнетики*. Виявляється також, що μ сильно залежить від напруженості $\vec{H}$ зовнішнього магнітного поля. Наприклад, у слабких полях магнітна проникність може досягати десятків тисяч, а в сильних – μ меншає до сотень чи десятків одиниць.

Причина сильного намагнічення ферромагнетиків полягає в тому, що зовнішнє магнітне поле орієнтує магнітні моменти $\vec{p}_m$ елементарних струмів атомів чи молекул. Намагніченість матеріалу можна оцінити за величиною вектора $\vec{J} = \sum \vec{p}_m$ розрахованого

для одиниці об'єму. Можна також довести, що повна індукція

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0\mu\vec{H}, \qquad \vec{J} = (\mu - 1)\vec{H}. \tag{8.1}$$

Крива намагнічення ферромагнетика (залежність $B = f(H)$) має форму петлі, яку називають *петлею гістерезису* (рис. 8.1). Точки її перетину з осями координат визначають залишкову індукцію B_r і коерцитивну силу H_c. За цією кривою можна визначити також магнітну проникність $\mu = B/(\mu_0 H)$ для кожної точки.

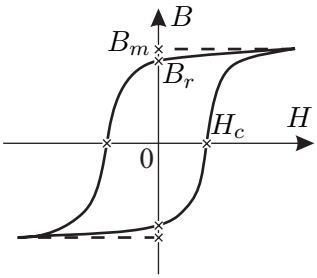

Рис. 8.1. Петля гістерезису для ферромагнетика

Важливо зазначити, що магнітна проникність меншає із зростанням температури ферромагнетика. Після досягнення деякої температури проникність μ стає близькою до одиниці. Цю характерну для кожного ферромагнітного матеріалу температуру називають *точкою Кюрі*.

8.2 Визначення магнітних характеристик з допомогою осцилографа

Осцилографічний спосіб дає змогу візуально спостерігати динамічні криві намагнічення в широкому діапазоні частот, вивчати характер впливу різних факторів (наприклад, підмагнічування магнітним полем, змін режимів) на форму й розміри динамічної

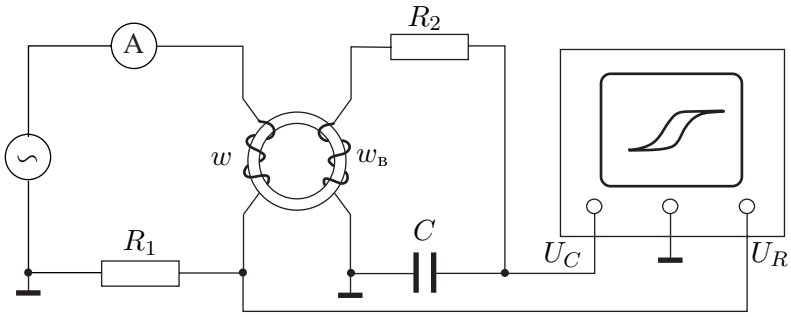

Рис. 8.2. Схема для визначення динамічних характеристик намагнічення за допомогою осцилографа

петлі. На рис. 8.2 зображена схема для спостереження кривої намагнічення та визначення її характеристик.

На пластини осцилографа подають дві напруги, які пропорційні відповідно напруженості H поля намагнічення та магнітної індукції B у самому матеріалі. Для одержання напруги, яка пропорційна до H, у коло ввімкнено резистор R_1. Тому можна записати:

$$U_R = IR_1 = \frac{\pi d_c R_1}{w} H_t, \tag{8.2}$$

де w – кількість витків котушки намагнічення; H_t – миттєве значення поля намагнічення; d_c – середній діаметр зразка (кільця).

Для одержання напруги, яка пропорційна до магнітної індукції B, до виходу вимірювальної котушки з кількістю витків w_B ввімкнено коло з резистора R_2 і конденсатора C (інтегруюча ланка). Е.р.с. на цій котушці $\varepsilon = -w_B \dfrac{d\Phi}{dt}$. Якщо забезпечити умову $R_2 \gg 1/(\omega C)$, то миттєве значення напруги на конденсаторі

$$U_C = \frac{1}{C} \int \frac{\varepsilon}{R_2} dt = -\frac{w_B s_{зр}}{R_2 C} B_t, \tag{8.3}$$

де $s_{зр}$ – площа поперечного перетину зразка. Отже, напруга на

конденсаторі C пропорційна до миттєвого значення індукції магнітного поля в матеріалі зразка.

Для кількісного визначення B і H потрібні перерахунки, оскільки осцилограф дає змогу вимірювати напруги U_x та U_y за відхиленнями променя по горизонталі та вертикалі. Миттєві значення B_t і H_t для довільної точки на петлі гістерезису можна розрахувати за формулами:

$$H_t = \frac{w}{R_1 l_\text{с}} U_x; \quad B_t = \frac{R_2 C}{w_B s_\text{зр}} U_y. \tag{8.4}$$

Окремо слід пам'ятати про калібрування осцилографа, оскільки після його вмикання масштаби осей зазвичай неточні.

8.3 Вимірювання магнітної проникності методом моста змінного струму

Один із способів вимірювання магнітної сприйнятливості ґрунтується на використанні моста змінного струму. В одне із плечей моста ввімкнена котушка з індуктивністю L_x та опором R_x. Сердечником котушки є досліджуваний магнітний матеріал. На рис. 8.3 зображена відповідна електрична схема, яку часто використовують для контролю параметрів ферромагнітних матеріалів на виробництві.

За умови рівноваги моста формули для невідомих величин, які позначені на схемі, можна записати так:

$$R_x = \frac{\omega^2 C^2 R_1 R_2 R_3}{1 + (R_3 \omega C)^2}; \qquad L_x = \frac{R_1 R_2 C}{1 + (R_3 \omega C)^2}. \tag{8.5}$$

Замість індикатора нуля I в електричне коло вмикають вольтметр змінного струму чи осцилограф. Змінюючи частоту генератора, добиваються мінімального сигналу і розраховують невідомі величини L_x та R_x. Для отримання достовірних результатів потрібно проводити вимірювання у слабких магнітних полях (невеликих напругах генератора), оскільки зростання напруженості H

магнітного поля призводить до спотворення сигналу на котушці, виникнення вищих гармонік (сигналів на частотах $2\omega, 3\omega, \ldots$).

Магнітну проникність μ досліджуваного зразка ферромагнетика визначають за співвідношеннями:

$$\mu = \frac{L_x \pi d_{\text{с}}}{\mu_0 w^2 s_{\text{зр}} \cos\delta}, \qquad \delta = \operatorname{arctg} \frac{R_x - R}{\omega L_x}, \tag{8.6}$$

де $d_{\text{с}}$ – середній діаметр зразка; w – кількість витків котушки; $s_{\text{зр}}$ – площа поперечного перетину зразка; R – активний опір котушки.

Порядок виконання роботи:

1. Зберіть схему для спостереження петель гістерезису згідно рис. 8.2, використовуючи готовий макет з контактами для з'єднань. Запишіть потрібні для розрахунків параметри, які можна отримати у викладача.

2. Для правильного функціонування апаратури попередньо налаштуйте цифровий осцилограф. Слід пам'ятати, що чутливість вздовж осей X та Y для кожного випадку визначають положенням відповідних перемикачів. Підберіть оптимальні

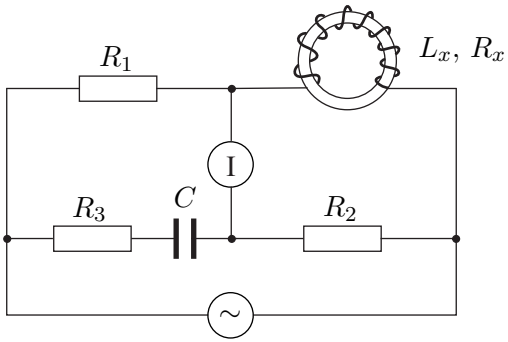

Рис. 8.3. Схема вимірювання магнітної проникності за допомогою моста змінного струму. I – індикатор (вольтметр змінного струму чи осцилограф)

умови для спостереження петлі гістерезису (частоту генератора, напругу, чутливість осцилографа).

3. Постарайтесь, щоб отримана петля займала більшу частину екрана осцилографа. Встановіть масштаби осей в одиницях А/м (для X) та Тл (для Y), використовуючи формули (8.4). Попередньо прокалібруйте цифровий осцилограф, подаючи на нього змінну напругу відомої амплітуди.

4. За формою петлі визначте максимальну магнітну індукцію B_m і напруженість H_m магнітного поля, а також значення коерцитивної сили H_c та залишкової магнітної індукції B_r.

5. З'єднайте пристрої за мостовою схемою (рис. 8.3). Плавно змінюючи частоту ω генератора, визначте її величину, при якій сигнал на індикаторі мінімальний.

6. Зробіть потрібні розрахунки за формулами (8.5) та (8.6) й визначте магнітну проникність матеріалу тороїдальної котушки.

Контрольні запитання:

1. Поясніть явища діа-, пара- і ферромагнетизму. Що таке точка Кюрі у ферромагнетиків?

2. Чому відбувається насичення ферромагнетика в сильних магнітних полях?

3. У яких відомих вам пристроях використовуються ферромагнетики? Які їхні переваги і недоліки?

4. Як впливає зміна частоти генератора на петлю магнітного гістерезису?

5. З яких матеріалів виготовляють постійні магніти?

Лабораторна робота 9

Дослідження явища самоіндукції

Мета роботи: Вивчення явища самоіндукції, виникнення е.р.с. Дослідження залежності сили струму і напруги від часу на різних ділянках електричного кола з індуктивністю під час його замикання і розмикання.

9.1 Явище самоіндукції

Навколо будь-якого замкненого контура провідника зі струмом завжди є магнітне поле, яке створює магнітний потік (потік магнітної індукції) через власний контур провідника. Цей потік прямо пропорційний струмові, який є у провіднику:

$$\Phi = LI, \tag{9.1}$$

де коефіцієнт пропорційності L називають *індуктивністю контура*. В системі СІ одиницею індуктивності є 1 Генрі (Гн). Індуктивність залежить від форми й розмірів контура, а також від магнітних властивостей навколишнього середовища.

Явище самоіндукції є проявом явища електромагнітної індукції за умов, коли змінний магнітний потік, що пронизує контур провідника, створений власним змінним електричним струмом, який є в цьому провіднику. За законом електромагнітної індукції в контурі, який пронизує змінний магнітний потік, виникає електрорушійна сила індукції $\mathcal{E}_{\text{ci}}$ (е.р.с. самоіндукції), пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що пронизує цей контур:

$$\mathcal{E}_{\text{ci}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{9.2}$$

Для випадку самоіндукції:

$$\mathcal{E}_{\text{ci}} = -L\frac{dI}{dt}. \tag{9.3}$$

Знак "−" вказує на те, що е.р.с. самоіндукції, а отже, й індукційний струм протидіє зміні електричного струму в контурі. Наявність індуктивності в електричному контурі призводить до того, що контур набуває своєрідної електричної інертності – будь-яка зміна струму гальмується, причому, тим дужче, чим більшою є індуктивність контура.

9.2 Струми у колі з індуктивністю

Розгляньмо два випадки прояву явища самоіндукції: під час замикання контура зі сталою е.р.с. і під час його розмикання.

У момент замикання контура внаслідок наявності індуктивності струм у контурі встановиться не відразу. Під час зростання струму виникає е.р.с. самоіндукції, яка напрямлена проти струму, тобто, проти увімкненої сталої е.р.с. $\mathcal{E}_0$. За законом Ома

$$IR = \mathcal{E}_0 - L\frac{dI}{dt}, \tag{9.4}$$

де R – повний опір кола (котушки індуктивності, зовнішнього опору, внутрішнього опору джерела). Перепишемо це рівняння у вигляді:

$$L\frac{dI}{dt} + IR = \mathcal{E}_0. \tag{9.5}$$

Це – неоднорідне диференціальне рівняння, розв'язок якого складається з частинного розв'язку й загального розв'язку відповідного однорідного рівняння:

$$I = \frac{\mathcal{E}_0}{R}\left(1 - e^{-R(t-t_0)/L}\right). \tag{9.6}$$

Остання формула вказує на те, що під час замикання електричного кола зростання струму відбувається не миттєво, а поступово, як це зображено на рис. 9.1. Сила струму $I(\infty) = \mathcal{E}_0/R$, яка відповідає закону Ома, теоретично досягається лише за умови нескінченного часу.

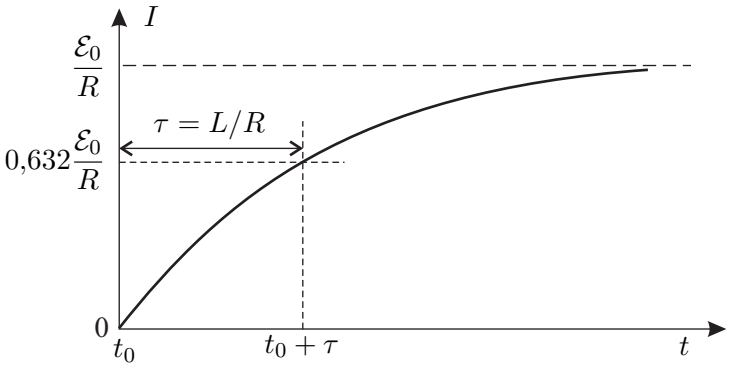

Рис. 9.1. Зростання струму у колі з індуктивністю після вмикання зовнішньої е.р.с. $\mathcal{E}_0$

Враховуючи експоненціальну залежність $I(t)$, можна ввести час $\tau = L/R$ наростання сили струму від нуля до величини $I = (1 - e^{-1})\mathcal{E}_0/R \approx 0{,}632\mathcal{E}_0/R$, коли показник експоненти дорівнюватиме одиниці (рис. 9.1).

Для процесу вимикання джерела зовнішньої е.р.с. (наприклад, її закорочення) закон Ома слід записати у вигляді:

$$IR = \mathcal{E}_{\text{ci}} = -L\frac{dI}{dt}. \tag{9.7}$$

Розв'язок рівняння (9.7) із врахуванням початкових умов (в момент вимкнення джерела струм $I(t_0) = \mathcal{E}_0/R$) дає:

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}_0}{R}\exp\left(-\frac{R}{L}(t - t_0)\right), \tag{9.8}$$

а для е.р.с. самоіндукції –

$$\mathcal{E}_{\text{ci}} = -L\frac{dI}{dt} = \mathcal{E}_0\exp\left(-\frac{R}{L}(t - t_0)\right). \tag{9.9}$$

Часова залежність сили струму I до і після вимкнення зображена на рис. 9.2. Тут за час $\tau = L/R$ струм меншає від максимального $\mathcal{E}_0/R$ до величини $e^{-1}\mathcal{E}_0/R \approx 0{,}368\mathcal{E}_0/R$.

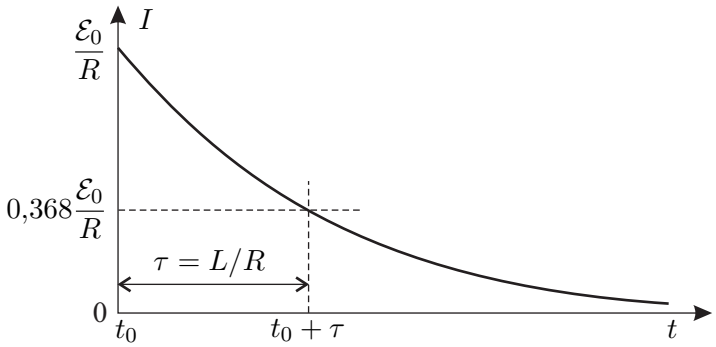

Рис. 9.2. Зміни сили струму у колі з індуктивністю під час вимикання зовнішньої е.р.с. $\mathcal{E}_0$

Струм у контурі, обумовлений самоіндукцією контура після вимикання зовнішньої е.р.с., називають *екстраструмом розмикання*, а після вмикання – *екстраструмом замикання*. Екстраструми можуть призвести до пробою ізоляції й пошкодження електроприладів, якщо не вживати запобіжних заходів.

9.3 Методика дослідження явища самоіндукції

Для дослідження явища самоіндукції складають електричне коло із послідовно з'єднаних котушки індуктивності L, резистора з опором R і генератора імпульсів прямокутної форми, який періодично вмикає і вимикає напругу величиною 3,3 В. Спостереження за формою сигналів на виході генератора (контакт `Outbuf1` на макеті) та на опорі R проводять за допомогою двоканального осцилографа. Доцільніше використати цифровий, утворюваний за допомогою програми `Oscilloscope` (див. лабораторну роботу 2), який дає змогу зберігати результати у файлі текстового формату.

Відповідна схема апаратури зображена на рис. 9.3. До контактів `Outbuf1` та `GND` під'єднані котушка індуктивності L та резистор R. У момент вмикання напруги на генераторі струм завдяки

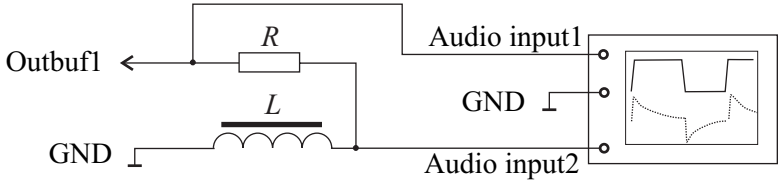

Рис. 9.3. Схема апаратури для дослідження явища самоіндукції

самоіндукції зростає поступово, а в момент вимикання поступово спадає. Напруга на опорі R, яку реєструє один із каналів осцилографа, завжди пропорційна силі струму I у колі.

На залежність сили струму від часу впливають параметри кола: опір резистора R та індуктивність котушки L. Оскільки причиною явища самоіндукції є наявність індуктивності в колі, то важливим є дослідити, як на форму кривої впливає зміна індуктивності.

Завданням роботи є вимірювання часу, упродовж якого встановлюється електричний струм у колі під час його замикання, та дослідження його часової залежності під час вимикання е.р.с. генератора. Вимірювання доцільно провести для різних значень індуктивності котушки L та опору R.

Порядок виконання роботи:

1. Виміряйте за допомогою мультиметра повний опір кола, яке складається з резистора R (його числову величину погодьте з викладачем) та індуктивності L.

2. Зберіть схему вимірювання згідно з рис. 9.3, увімкніть цифровий чи аналоговий осцилограф та генератор прямокутних імпульсів на макеті.

3. За допомогою кнопок $\triangle$ та $\triangledown$ підберіть таку частоту, щоб одержати на екрані нерухому картину кількох періодів імпульсів, подібних до зображених на рис. 9.1 та 9.2.

4. Знаючи чутливість осцилографа та величину опору R, визначте залежність сили струму I в колі від часу упродовж одного періоду імпульсів.

5. Збережіть отримані на екрані цифрового осцилографа результати та опрацюйте їх за допомогою комп'ютерних програм. Отримайте графіки залежності сили струму від часу.

6. Визначте за кожним із графіків час τ встановлення електричного струму (див. рис. 9.1 та 9.2) і за виміряним значенням опору R знайдіть індуктивність котушки $L = \tau R$.

7. Вимірювання виконайте для двох котушок індуктивності та двох опорів.

Контрольні запитання:

1. У чому полягає суть явища електромагнітної індукції?

2. Які кількісні характеристики явища самоіндукції?

3. Від чого залежить е.р.с. самоіндукції? Запишіть формулу. Звідки вона випливає?

4. На що вказує знак мінус у формулі для е.р.с. самоіндукції?

5. Як впливає індуктивність контура на зміну електричного струму під час замикання і розмикання електричного кола?

6. Запишіть формулу залежності від часу електричного струму в колі з індуктивністю під час замикання електричного кола. Поясніть її.

7. Поясніть причину появи екстраструму розмикання, який може значно перевищувати номінальний струм у колі.

Лабораторна робота 10

Встановлення залежності опору металу і напівпровідника від температури

Мета роботи: визначення температурного коефіцієнту опору металу та енергії активації напівпровідника на підставі експериментального вимірювання залежності опору від температури.

10.1 Опір металів

Здатність проводити електричний струм характеризують питомим опором ρ чи питомою провідністю $\sigma = 1/\rho$. Для більшості металів питомий опір зростає з температурою. Це зумовлено тим, що з підвищенням температури зростає інтенсивність негармонічних коливань кристалічної ґратки. Внаслідок цього направленому рухові носіїв струму виникає протидія.

Відношення приросту опору провідника після його нагрівання на 1 K до початкового опору R_0, називають *температурним коефіцієнтом опору* α. Отже,

$$R = R_0(1 + \alpha T). \tag{10.1}$$

У загальному випадку коефіцієнт α також залежить від температури, тому часто прийнято використовувати його середнє значення α_c. Якщо опір провідника при температурі T_0 дорівнює R_0, а при температурі T дорівнює R_T, то середнє значення

$$\alpha_c = \frac{R_T - R_0}{R_0}\frac{1}{T - T_0}. \tag{10.2}$$

Існують спеціальні сплави, опір яких майже не залежить від температури, наприклад, *константан* (сплав міді та нікелю) і *манганін* (сплав міді, нікелю та марганцю). Ці матеріали використовують у вимірювальних приладах, де опори потрібно підтримувати сталими під час зміни температури довкілля.

10.2 Провідність та опір напівпровідників

Однією з ознак напівпровідників, за якою вони різняться від металів, є залежність їхньої питомої провідності σ від температури. При низьких температурах вона меншає, і при абсолютному нулі напівпровідник стає ізолятором. При високих температурах електрична провідність напівпровідників наближається до провідності металів.

Електрони провідності утворюються в напівпровідниках внаслідок дії зовнішніх факторів (температури, освітлення, сильного електричного поля). Концентрація n вільних електронів в одиниці об'єму з підвищенням температури зростає за експоненційним законом

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \tag{10.3}$$

де ΔE – ширина забороненої зони; n_0 – коефіцієнт, величина якого залежить від матеріалу. Величину ΔE називають також *енергією активації*.

Кожному електронові у зоні провідності відповідає вакантне місце у валентній зоні з додатним елементарним зарядом. Його називають *діркою*. В чистому (без домішок) напівпровіднику кількість вільних електронів має дорівнювати кількості дірок. Отже, концентрація дірок у валентній зоні

$$p = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right). \tag{10.4}$$

Температурну залежність питомої провідності напівпровідників можна подати у вигляді:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \tag{10.5}$$

де величина σ_0 – пропорційна добутку pn концентрацій електронів і дірок.

Тоді експериментальну залежність опору напівпровідників від температури можна добре описати виразом:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right). \tag{10.6}$$

Логарифмуючи рівняння (10.6), отримаємо

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT}. \tag{10.7}$$

Отже, логарифм опору напівпровідників є лінійною функцією від величини $1/T$ з кутовим коефіцієнтом $\Delta E/2k$.

Порядок виконання роботи:

Для вимірювання опорів використовують різні методи та прилади, але всі вони ґрунтуються на законі Ома. Сучасні мультиметри, зокрема, володіють високою точністю завдяки прецизійним АЦП та джерелам стабільних напруг. В них передбачена можливість прямого вимірювання R, але залежно від його величини потрібно правильно вибрати діапазон. Зауважимо, що пряме вимірювання опору не завжди застосовне (інколи, наприклад, потрібно забезпечувати сталий струм через опір, а не сталу напругу на ньому).

У лабораторній роботі передбачено вимірювання температурних залежностей величин двох опорів – металевого та напівпровідникового (R_1, R_2 на рис. 10.1), які перебувають у термостаті Т. Контроль температури можна здійснювати за допомогою термопари, спай якої перебуває в термостаті, а контакти приєднані до АЦП макета для вимірювання термо-е.р.с.

На нагрівник термостата подають напругу від блока живлення БЖ. Її величину потрібно підбирати експериментально залежно від конструкції термостата, його теплоємності, потужності нагрівача тощо.

Величину кожного із опорів вимірюють за допомогою мультиметра М після стабілізації температури. Вибір опору виконують

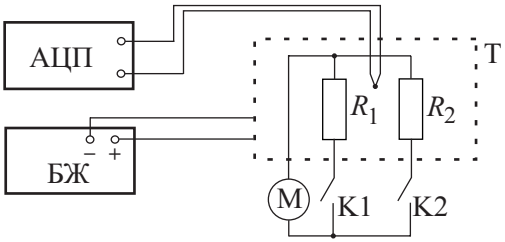

Рис. 10.1. Схема апаратури для вимірювання температурної залежності опору матеріалів

натисканням відповідної кнопки (K1, K2) та занесенням у таблицю на ПК величин R_1 та R_2.

1. Зберіть схему за рис. 10.1, увімкніть мультиметр M та переконайтеся у правильному вимірюванні опорів після натискання кожної кнопки зокрема.

2. Термопару приєднайте до АЦП на макеті та після вмикання живлення виберіть опцію "Термо-е.р.с."

3. Ознайомтеся з комп'ютерною програмою для опрацювання результатів вимірювань, зокрема, виберіть таблицю, у яку слід буде записувати величину термо-е.р.с. $\mathcal{E}$, температуру T, опори R_1 та R_2.

4. Виміряйте опори для кімнатної температури, після ввімкнення джерела живлення Б5-43 встановіть напругу за вказівками викладача та збільшуйте її надалі пропорційно до зростання температури опорів у термостаті.

5. Під час нагрівання вимірюйте опір кожного з досліджуваних зразків від кімнатної температури до 400 K. Виконуйте перемикання мультиметра між зразками та слідкуйте за правильним вибором діапазону його вимірювань.

6. Побудуйте залежності $R_{1,2} = f(T)$ – величин обох досліджуваних опорів від температури. Формулу для перерахунку температури T за даними термо-е.р.с. $\mathcal{E}$ отримайте у викладача. За характером залежностей встановіть, який із матеріалів є провідником, а який напівпровідником.

7. Для металу, опір якого має залежати від температури лінійно, згідно формули (10.1), визначне величину R_0 початкового опору для температури 0 °C та температурний коефіцієнт опору α.

8. Для напівпровідника побудуйте залежність $\ln R = f(1/T)$, переконайтеся у її лінійному характері. Апроксимуйте цю залежність рівнянням прямої (10.7) та за її кутовим коефіцієнтом визначте енергію активації ΔE.

Контрольні запитання:

1. Яка природа провідності та фізична причина опору металів? Чи можна змінити опір металевого зразка?

2. У чому полягає відмінність температурної залежності опору напівпровідника й металу? Яка фізична причина цього?

3. Що таке енергія активації? Як впливає температура на провідність напівпровідника й чому?

4. Чому наявність домішки в напівпровіднику впливає на величину енергії активації?

5. Якими засобами можна виміряти опір провідника? Назвіть кілька прикладів, зокрема, й з використанням цифрових пристроїв.

6. Поясніть суть явища надпровідності. За яких умов його можна спостерігати? Чи всі метали можуть ставати надпровідниками? Назвіть кілька відомих надпровідників.

Лабораторна робота 11

Вивчення термоелектричних явищ

Мета роботи: вивчення явищ Зеєбека та Пельтьє, вимірювання термо-е.р.с., градуювання диференційної термопари, ознайомлення з роботою мікрохолодильника.

11.1 Контактна різниця потенціалів. Ефект Зеєбека

Між тепловими і електричними процесами в провідниках існує певний взаємозв'язок, який зумовлює низку термоелектричних явищ (найвідоміші з них – ефекти Зеєбека, Пельтьє і Томсона).

Електричний контакт двох різних провідників (рис. 11.1, *а*) призводить до появи зовнішньої контактної різниці потенціалів U'_{12}, яку можна визначити за формулою:

$$U'_{12} = -\frac{A_1 - A_2}{e}, \tag{11.1}$$

де A_1, A_2 – роботи виходу, відповідно, для першого та другого металів; e – величина заряду електрона. Інша причина появи контактної різниці потенціалів між металами М1 і М2 з точки зору класичної теорії – різний тиск електронного газу, який є причиною внутрішньої контактної різниці потенціалів:

$$U''_{12} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}, \tag{11.2}$$

де n_{01} та n_{02} – концентрації електронів провідності, відповідно, у першому та другому металі; T – абсолютна температура контактів; k – постійна Больцмана. Прилад, який схематично зображено на рис. 11.1, *а*, вимірює сумарну контактну різницю потенціалів, зумовлену одночасною дією обох факторів:

$$\triangle\varphi_{12} = U'_{12} + U''_{12} = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}. \tag{11.3}$$

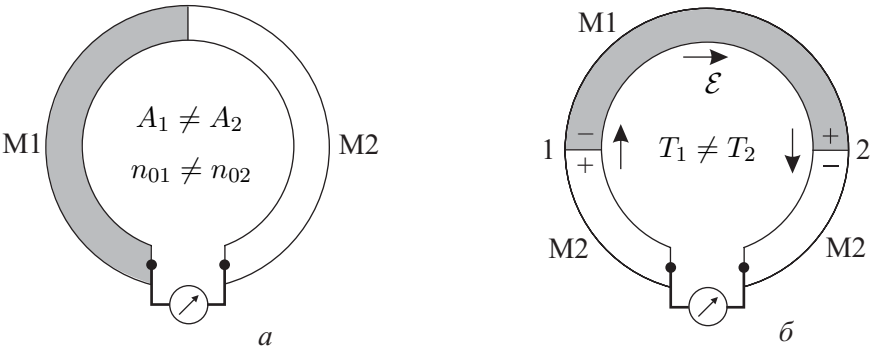

Рис. 11.1. Виникнення контактної різниці потенціалів (а) і термо-е.р.с. (б) в електричному колі з двома контактами (1,2) двох різних металів (M1,M2)

Формула (11.3) є аналітичним виразом *першого закону Вольти*. Вона показує, що контактна різниця потенціалів двох металів залежить тільки від їхньої хімічної природи та температури.

Розглянемо систему m послідовно з'єднаних металевих провідників. Якщо температура всіх провідників однакова, то різниця потенціалів між вільними кінцями кола дорівнює алгебраїчній сумі стрибків потенціалів на всіх контактах:

$$\varphi_1 - \varphi_m = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \ldots + (\varphi_{m-1} - \varphi_m) = \varphi_1 - \varphi_m \quad (11.4)$$

і визначається тільки крайніми провідниками $(1, m)$. Ця формула є аналітичним виразом *другого закону Вольти*.

Явище (ефект) Зеєбека полягає у виникненні е.р.с. у колі з двома контактами, утвореними двома різними металами (M1, M2), якщо температури двох контактів неоднакові (рис. 11.1, *б*).

Якщо два спаї нагріти до різних температур T_1 і T_2, то виникає термо-е.р.с.

$$\mathcal{E} = \frac{k(T_2 - T_1)}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} = C(T_2 - T_1), \quad (11.5)$$

де $C = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$ – коефіцієнт термо-е.р.с., який дорівнює е.р.с. за

різниці температур в $T_2 - T_1 = 1$ К. Однак коефіцієнт C (його також називають *термосилою*, *питомою термо-е.р.с.*, *термоелектричною здатністю пари*) залежить від використовуваних матеріалів та температурних інтервалів, у яких перебувають обидва спаї. Тому під час збільшення різниці $T_2 - T_1$ величина $\mathcal{E}$ може навіть змінювати свій знак. Наприклад, якщо один спай пари залізо-мідь утримувати при 0 °C, а інший нагрівати, то при 540 °C термо-е.р.с. стає нульовою, а потім набуває іншого знаку.

Пристрій, який складається із двох різних провідників (зварених чи спаяних між собою), називають *термопарою*. Його використовують для вимірювання температури. Якщо спаїв два, то один з них підтримують при сталій температурі (наприклад 273 К), а другий служить для контролю за температурою об'єкту. Такий термометр називають *диференційною термопарою*.

Як джерела струму термопари з металів та їхніх сплавів (термобатареї) неефективні, їхній к.к.д. не перевищує 0,5%. Значно більшим к.к.д. (до 7%) володіють термобатареї з напівпровідників. Відомі приклади застосування таких батарей для живлення космічних апаратів неперервно упродовж кількох десятиліть.

11.2 Ефект Пельтьє

Інше термоелектричне явище відкрив Пельтьє в 1834 р. Суть його полягає в тому, що під час протікання струму в електричному колі, укладеному з різних металів (чи напівпровідників), на одних спаях відбувається виділення тепла, а на других – його поглинання. Отже, цей ефект є оберненим до ефекту Зеєбека. Кількість тепла, що виділяється при цьому, визначається виразом

$$Q_{AB} = \Pi_{12} \cdot q = \Pi_{12} I t, \tag{11.6}$$

де q – заряд, який пройшов через спай від металу (напівпровідника) 1 до металу (напівпровідника) 2; t – час; I – сила струму; Π_{12} – коефіцієнт пропорційності (*коефіцієнт Пельтьє*).

Теплоту Пельтьє вважають додатною, якщо вона виділяється, і від'ємною, якщо вона поглинається. Ця теплота пропорційна струмові I, а не його квадрату, як у випадку тепла Джоуля–Ленца. Зміна напрямку струму супроводжується зміною величини Q. Отже, замість виділення відбувається поглинання такої ж кількості тепла, а $\Pi_{12} = -\Pi_{21}$. Між коефіцієнтом Пельтьє та коефіцієнтом термо-е.р.с. існує зв'язок

$$\Pi_{12} = CT, \tag{11.7}$$

який можна отримати з термодинамічних міркувань. Для металів коефіцієнт Пельтьє має порядок величини 10^{-2}–10^{-3} В, а для напівпровідників 10^{-1}–10^{-3} В.

Ефект Пельтьє пояснюють тим, що під дією контактної різниці потенціалів електрони пришвидшуються або уповільнюються. Якщо рух електронів пришвидшується, їхня кінетична енергія зростає і виділяється у вигляді теплоти, і навпаки – зменшення кінетичної енергії поповнюється за рахунок теплових коливань атомів другого металу.

У холодильних установках застосовують спеціальні *елементи Пельтьє*, які мають два спаї й дають змогу пропускати великі (до десятків А) струми.

На підставі термодинамічних міркувань Томсон передбачив, що тепло має виділятися чи поглинатися під час протікання струму однорідним провідником, вздовж якого існує градієнт температури. Питома потужність, що виділяється внаслідок *ефекту Томсона*, дорівнює

$$w = \tau \frac{dT}{dx} j, \tag{11.8}$$

де $\dfrac{dT}{dx}$ – градієнт температури; j – густина струму; τ – *коефіцієнт Томсона*. Цей коефіцієнт також пов'язаний з коефіцієнтом термо-е.р.с. та коефіцієнтом Пельтьє.

11.3 Схеми для вимірювання термо-е.р.с.

Оскільки величина термо-е.р.с. $\mathcal{E}$ зазвичай дуже мала (порядку мВ), то для надійного її вимірювання потрібно використовувати точні прилади (потенціометри). Сучасні мультиметри з 16–24 розрядними АЦП та стабільними джерелами опорної напруги також забезпечують достатню для таких вимірювань точність.

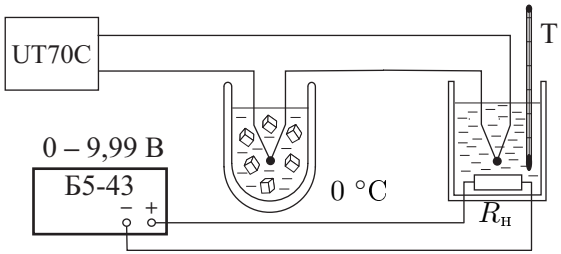

Рис. 11.2. Схема вимірювання термо-е.р.с. звичайної та диференційної термопари

Для дослідження контактних явищ використовують схему, яка зображена на рис. 11.2. Для нагрівання спаїв термопар використовують резистор $R_н$, напругу на нього подають від джерела живлення Б5-43 з мінімальним кроком зміни 0,01 В. Температуру нагрітого спаю контролюють термометром Т. Величину термо-е.р.с. визначають за допомогою мультиметра UT70C.

Різницю температур спаїв елемента Пельтьє під час пропускання струму через нього вимірюють диференційною термопарою, також під'єднаною до АЦП на макеті (рис. 11.3). Величина сили струму крізь елемент Пельтьє пропорційна до напруги, яка встановлена на джерелі живлення Б5-43. Оскільки послідовно з елементом увімкнено резистор R, то цей струм не може перевищувати 2 А.

Відведення тепла від нагрітої поверхні (спаю) елемента Пельтьє забезпечує радіатор та вентилятор, які, зазвичай, застосовують для охолодження процесора ПК. Зауважимо, що така схема

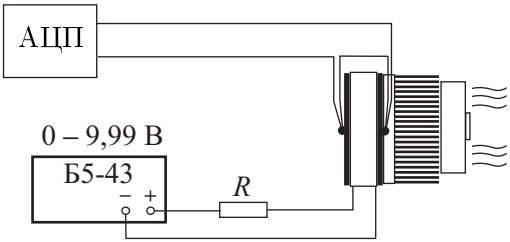

Рис. 11.3. Схема вимірювання процесу виділення та поглинання теплоти в елементі Пельтьє

вимагає певного часу встановлення теплової рівноваги. Сьогодні існують системи охолодження електронних та інших пристроїв з використанням ефекту Пельтьє.

Порядок виконання роботи:

1. Термопару з одного спаю двох металів помістіть в посудину Дьюара з льодом та під'єднайте до мультиметра (рис. 11.2). Запишіть величину термо-е.р.с. для 0 °C.

2. Виміряйте для цієї ж термопари залежність термо-е.р.с. $\mathcal{E}$ від температури, поступово нагріваючи спай термопари та використовуючи термометр для контролю. Дані заносьте у таблицю безпосередньо на ПК.

3. Виконайте аналогічні вимірювання з диференційною термопарою, один спай її помістіть в посудину Дьюара з льодом, а другий поступово нагрівайте та через кожні 5 K записуйте дані у таблицю.

4. Побудуйте залежність $\mathcal{E} = f(T)$ та визначте коефіцієнт термо-е.р.с. C, використовуючи формулу (11.5).

5. Порівняйте одержані результати для обох типів термопар з табличними даними довідника з термоелектрики.

6. Ознайомтеся з будовою елемента Пельтьє та правилами його ввімкнення. За допомогою мультиметра визначте його електричний опір.

7. Складіть електричне коло (рис. 11.3). Узгодьте з викладачем його параметри – максимальну напругу джерела живлення, величину опору R та силу струму. Використайте АЦП для вимірювання термо-е.р.с.

8. Поступово збільшуючи силу струму крізь елемент Пельтьє, виміряйте залежність різниці температур на його протилежних поверхнях від струму. Використайте диференційну термопару та попередні дані про її коефіцієнт C. Силу струму визначайте за падінням напруги на відомому опорі R.

Контрольні запитання:

1. Поясніть фізичний зміст роботи виходу для металу.

2. Що таке зовнішня і внутрішня контактна різниця потенціалів та які причини їхньої появи?

3. Сформулюйте перший та другий закони Вольти.

4. У чому полягають термоелектричні явища Зеєбека і Пельтьє та які механізми їхнього виникнення?

5. Який пристрій називають термопарою, де її застосують? Як виникає термо-е.р.с. термопари? Що таке диференційна термопара?

6. Які переваги та недоліки електричних методів вимірювання температури за допомогою термопар?

7. Яке застосування ефекту Пельтьє? Чим елемент Пельтьє відрізняється за своєю будовою від термопари?

Лабораторна робота 12

Вимірювання характеристик вакуумного діода і тріода

Мета роботи: вивчення будови найпростіших вакуумних електронних приладів, перевірка закону Богуславського–Ленгмюра, вимірювання вольт-амперних характеристик лампових діодів і тріодів, визначення основних їхніх параметрів.

12.1 Закон Богуславського–Ленгмюра

Явище випускання електронів нагрітими тілами називають *термоелектронною емісією*. Серед вакуумних приладів, у яких його використовують, можна виділити електронно-променеві трубки телевізійних приймачів та комп'ютерних моніторів, електронні лампи в деяких спеціальних приладах, катодолюмінесцентні індикатори в побутовій, діагностичній та науковій апаратурі. Основними елементами таких приладів є нагрітий до високої температури катод та анод. Струм між ними підтримують емітовані з поверхні катода електрони.

За відсутності анодної напруги навколо розжареного катода утворюється електронна хмара – просторовий негативний заряд. Об'ємна густина цього просторового заряду тим більша, чим вища температура нагрітого тіла.

Якщо між катодом і анодом створити електричне поле прикладанням певної напруги, то електрони рухатимуться до анода, створюючи струм. Аналітично зв'язок між анодним струмом I_a та анодною напругою U_a можна записати так:

$$I_\mathrm{a} = KU_\mathrm{a}^{3/2}, \tag{12.1}$$

де K – коефіцієнт, залежний від форми й розмірів електродів, а також заряду й маси електрона.

Якщо електроди коаксіальні й циліндричні, то аналогічний до (12.1) вираз називають законом *трьох других* або рівнянням Богуславського–Ленгмюра:

$$I_{\text{a}} = \frac{8\sqrt{2}\,\pi\varepsilon_0}{9}\sqrt{\frac{e}{m}}\cdot\frac{lU_{\text{a}}^{3/2}}{r\beta^2}, \tag{12.2}$$

де e/m – питомий заряд електрона; r – радіус анода; l – довжина катода; β^2 – коефіцієнт, залежний від відношення радіусів анода й катода (він близький до одиниці, якщо це відношення перевищує число 10).

Побудувавши експериментальну залежність анодного струму від анодної напруги в степені $3/2$, можна одержати пряму лінію, кутовий коефіцієнт нахилу якої дорівнює

$$K = \frac{8\sqrt{2}\,\pi\varepsilon_0}{9}\sqrt{\frac{e}{m}}\cdot\frac{l}{r\beta^2}. \tag{12.3}$$

Це дає змогу розрахувати питомий заряд електрона

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{9r\beta^2}{8\sqrt{2}\,\pi\varepsilon_0 l}K\right)^2. \tag{12.4}$$

Відхилення від закону *трьох других* можна пояснити низкою факторів, зумовлених впливом контактної різниці потенціалів між катодом і анодом, неоднаковим потенціалом катода у різних його точках, асиметрією електродів (катода й анода), наявністю залишків газу.

12.2 Характеристики лампового тріода

Ламповий тріод окрім катода й анода має ще третій електрод – сітку, змінюючи її потенціал U_{c} (всі потенціали вимірюють відносно катода) можна регулювати анодний струм I_{a}. Залежно від U_{c} змінюється кількість електронів, які проходять крізь сітку до

анода. Якщо $U_c > 0$, сітка прискорює електрони; при $U_c < 0$ – гальмує. Наявність сітки розширює функціональні можливості тріодів, їх зокрема використовують для підсилення та генерації змінних струмів.

Керуюча сітка дає змогу змінювати анодний струм I_a в тріоді від 0 до деякого максимального $I_{a\ max}$ (переважно від одиниць до десятків мА) залежно від емісійної здатності катода. Залежність I_a від потенціалу сітки U_c називають сітковою характеристикою (рис. 12.1, *а*).

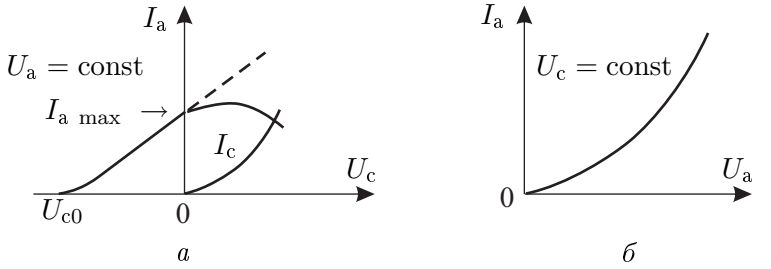

Рис. 12.1. Сіткова (*а*) та анодна (*б*) характеристики лампового тріода

За напруги на сітці, яка є меншою від U_{c0}, анодний струм I_a припиняється, подальше збільшення U_c до 0 спричиняє майже лінійне зростання анодного струму. Якщо $U_c > 0$, то частину електронів перехоплює сітка й I_a починає меншати.

Залежність I_a від потенціалу анода U_a (рис. 12.1, *б*) при $U_c = \text{const}$ називають анодною характеристикою. Основними параметрами тріодів є крутизна лінійної ділянки сіткової характеристики

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}\right)_{U_a}, \tag{12.5}$$

яку вимірюють у мА/В, та коефіцієнт підсилення для сталого струму

$$\mu = \left|\frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}\right|_{I_a}. \tag{12.6}$$

Обернену до коефіцієнта підсилення величину називають *проникністю лампи*

$$D = 1/\mu. \tag{12.7}$$

Анодний струм лампи є функцією двох величин: анодної та сіткової напруг. Оскільки сітка розташована ближче до катода, ніж анод, то зміна напруги на ній значно сильніше впливає на силу анодного струму порівняно зі зміною напруги на аноді лампи.

Описані характеристики належать до т.зв. статичного режиму роботи лампи, коли в її анодному колі немає навантаження (опорів). За наявності такого анодного навантаження параметри лампи та режими її роботи називають *динамічними*.

12.3 Апаратура для вимірювання характеристик вакуумного діода і тріода

Для вивчення законів термоелектронної емісії використовують ламповий діод 1Ц21П (кенотрон). Його анод має форму циліндра, а катод розташований у центрі на осі кенотрона. Струм у колі діода протікатиме лише тоді, коли до анода прикласти додатну напругу. Вольт-амперні характеристики вимірюють за допомогою апаратури, схема якої зображена на рис. 12.2. Струм розжарення катода (отже, і його температуру) регулюють змінним резистором, ввімкненим послідовно з катодом у вторинну обмотку трансформатора.

Анодну напругу U_a в межах 0–99,9 В забезпечує програмно кероване джерело Б5-49. Двійково-десятковий код (12 біт, по 4 біти для кожного десяткового знака) формує ПК. Для правильного функціонування приладу на передній його панелі потрібно встановити: напруга “000”; струм “050”.

Струм I_a у зовнішньому колі вимірює мультиметр UT70C, який має зв’язок з ПК. Результати вимірювання (U_a, I_a) у вигляді таблиці зберігають у текстовому файлі. Опрацювання даних доцільно виконувати програмами пакету Origin.

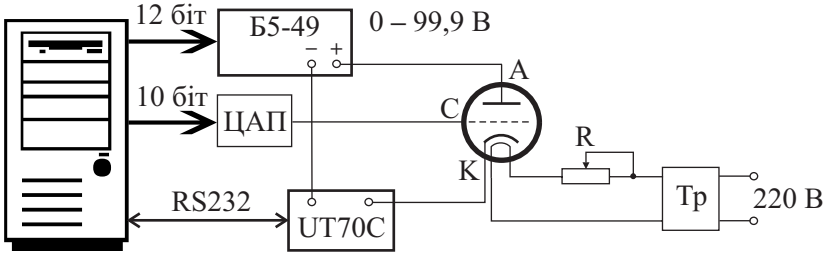

Рис. 12.2. Схема для вимірювання вольт-амперних характеристик вакуумного діода та тріода. K – катод, C – сітка, A – анод, Тр – трансформатор для підігрівання катода, R – змінний резистор для обмеження струму розжарення, UT70C – цифровий мультиметр як міліамперметр

Для вивчення лампового тріода 6С52Н використовують аналогічну схему подання керованої анодної напруги, струму розжарення та вимірювання анодного струму. Напругу для сітки (можливі межі від -10 до $+10$ В) створює цифро-аналоговий перетворювач, 10-ти розрядний код на нього подає ПК. Знак напруги змінюють встановленням додаткового 11-го біта. Струм сітки тріода дуже малий, тому його вимірювання не проводять. Неоптимальні значення напруги U_c на сітці (наприклад, додатні чи менші від -3 В) програмою вимірювань не передбачені.

Порядок виконання роботи:

1. Вивчіть будову вакуумних лампових приладів, зокрема, позначення, розташування контактів, електричні параметри. Ознайомтеся з програмою керування вимірюваннями та опрацювання результатів.

2. Зберіть схему для вимірювання (рис. 12.2). Погодьте з викладачем початкові умови експерименту (діапазони та крок зміни напруг, струмів розжарення, кількість вимірів для кожного пристрою).

3. Виміряйте за допомогою комп'ютерної програми залежність анодного струму від напруги, змінюючи її від нуля до максимальної для різних струмів розжарення катода та побудуйте відповідні графіки.

4. Визначте кутовий коефіцієнт нахилу лінійної залежності $I_\text{a} = f(U^{3/2})$. Використовуйте дані для великих струмів розжарення катода та ділянки, де закон *трьох других* виконується. Оцініть питомий заряд електрона e/m.

5. Зберіть схему для вимірювання вольт-амперних характеристик лампового тріода. Виміряйте залежності анодного струму від анодної напруги для різних напруг на керуючому електроді – сітці. Побудуйте графіки. Визначте крутизну S сіткової характеристики за формулою (12.5) та коефіцієнт підсилення μ за формулою (12.6).

Контрольні запитання:

1. Які основні конструктивні елементи вакуумних електронних ламп?

2. Поясніть закон *трьох других*, можливі відхилення від нього та можливі причини цього.

3. Яка роль сітки у вакуумному тріоді?

4. Відшукайте приклади використання вакуумних електронних приладів в апаратурі лабораторії та вдома. Поясніть їхній принцип дії.

5. Які переваги у вакуумних тріодів над напівпровідниковими аналогами?

Лабораторна робота 13

Напівпровідниковий діод і транзистор

Мета роботи: вивчення електричних властивостей p–n-переходу та пристроїв, у яких його використовують, на прикладах напівпровідникового діода і транзистора.

13.1 Електричні властивості p–n-переходу

Введенням у чистий напівпровідник певних домішок отримують провідність n- або p-типу. Домішкова провідність n-типу виникає внаслідок заміщення частини атомів чистого напівпровідника домішковими атомами з вищою валентністю, зайвий електрон яких не бере участі в ковалентних зв'язках і стає вільним.

Домішкова провідність p-типу виникає після заміщення частини атомів чистого напівпровідника атомами домішок з нижчою валентністю. Тоді домішковому атому не вистачає одного електрона для створення повного ковалентного зв'язку, він захоплює його від сусіднього атома, на місці якого виникає дірка з додатнім зарядом.

Напівпровідниковим діодом називають прилад з двома контактами (анодом і катодом, рис. 13.1), під'єднаними до одного p–n-переходу, який пропускає струм лише в одному напрямку. Якщо напруга між анодом і катодом $U_{\text{ак}} > 0$, діод пропускає струм, якщо $U_{\text{ак}} < 0$, діод закритий і пропускає лише невеликий струм. Прикладання змінної напруги призведе до того, що струм протікатиме переважно в одному напрямку, тобто p–n-перехід працюватиме як випрямляч. Найпоширенішими є германієві та кремнієві діоди, а також діоди з арсеніду галію.

Режим роботи діода визначається його вольт-амперною характеристикою $I = I(U_{\text{ак}})$. Повний прямий струм (електронів і ді-

рок) можна записати:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU_{\text{ак}}}{kT} \right) - 1 \right], \tag{13.1}$$

де I_s – сума струмів, обумовлених тепловою генерацією електронів і дірок. Це – теоретичний зворотній струм, оскільки реальний є значно більшим, ніж I_s.

Прямий струм швидко зростає при малих додатних напругах $U_{\text{ак}}$, однак він не може перевищувати деякого максимального значення $I_{\max}$, інакше відбудеться перегрівання діода та руйнування p–n-переходу. Для струму $I_{\max}/10$ пряма напруга U_D дорівнює приблизно 0,3 В для германію і 0,6 В для кремнію. Вона відповідає перегину на вольт-амперній характеристиці.

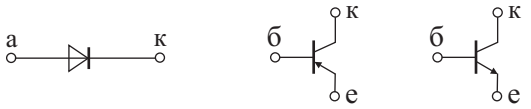

Рис. 13.1. Схематичне зображення напівпровідникового діода і транзисторів *p–n–p* та *n–p–n* типів

13.2 Схеми ввімкнення транзисторів

Біполярним транзистором називають напівпровідниковий прилад з двома p–n-переходами. Розрізняють два типи біполярних транзисторів: p–n–p та n–p–n, залежно від того, якою провідністю володіють колектор (к), база (б) та емітер (е) (рис. 13.1).

Розгляньмо транзистор p–n–p типу. Основними носіями в його колекторі та емітері є дірки, а в базі – електрони. Розрізняють схеми ввімкнення транзистора зі спільним емітером, колектором чи базою (рис. 13.2).

Схему зі спільним емітером (рис. 13.2, *а*) застосовують найчастіше, вона дає добре підсилення струму й напруги. Схему зі

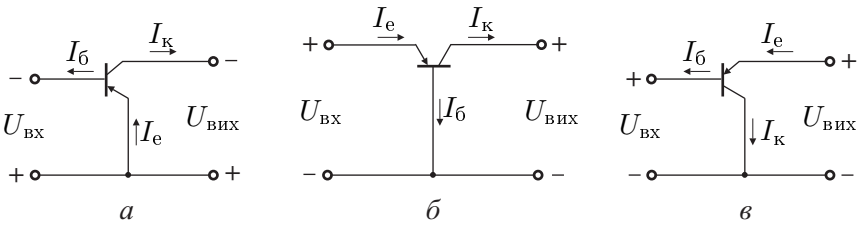

Рис. 13.2. Схеми ввімкнення транзистора *p–n–p* типу: *а* – зі спільним емітером, *б* – базою, *в* – колектором

спільною базою (рис. 13.2, *б*) використовують в деяких випадках у високочастотних підсилювачах. Схема зі спільним колектором (рис. 13.2, *в*) надає найбільше підсилення сили струму.

Зазвичай на перехід емітер-база подають напругу в прямому напрямку, а на перехід база-колектор – у зворотному. Це призводить до зменшення потенціального бар'єру на першому переході й підвищення на другому. Струм з емітера на базу описують формулою, характерною для p–n-переходу:

$$I_е = I_н \left[\exp\left(\frac{U_1}{kT}\right) - 1 \right], \tag{13.2}$$

де $I_н$ – струм насичення, який пропорційний до концентрації електронів у p-ділянці; U_1 – падіння напруги на p–n-переході, коли немає емітерного струму.

Для схеми зі спільною базою (рис. 13.2, *б*) вхідним сигналом є струм емітера $I_{вх} = I_е$, а вихідним – струм колектора $I_к$. Незалежно від схеми ввімкнення транзистори характеризують диференційним *коефіцієнтом прямої передачі струму*, який є відношенням приростів вихідного та вхідного струмів

$$\alpha = \frac{\Delta I_{вих}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_е}. \tag{13.3}$$

У схемі зі спільним емітером вхідним сигналом є малий струм бази $I_{вх} = I_б$, а вихідним – так само струм колектора $I_к$. Отже,

коефіцієнт передачі струму зі спільним емітером

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}}. \tag{13.4}$$

За правилом Кірхгофа $\Delta I_{\text{б}} = \Delta I_{\text{е}} - \Delta I_{\text{к}}$. Підставивши у формулу (13.4) цей вираз, одержимо

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}. \tag{13.5}$$

Якщо підставити типове значення $\alpha = 0{,}98$, то одержимо $\beta = 49$. Отже, у схемі зі спільним емітером можна забезпечити коефіцієнт прямої передачі струму $\beta \gg 1$.

У схемі зі спільним колектором (рис. 13.2, *в*) вхідним є струм бази, а вихідним – струм емітера. Тому коефіцієнт прямої передачі струму для цієї схеми

$$\frac{\Delta I_{\text{е}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \frac{\Delta I_{\text{е}}}{\Delta I_{\text{е}} - \Delta I_{\text{к}}} = \beta + 1. \tag{13.6}$$

Але отримати велике підсилення за напругою у схемі зі спільним колектором неможливо, тому її рідше використовують порівняно з попередніми.

Статичні характеристики транзистора відображають залежності між струмами і напругами на його входах і виходах. Найпоширеніші вхідні та вихідні статичні характеристики для двох основних схем увімкнення – зі спільною базою та зі спільним емітером.

13.3 Комп'ютеризована апаратура для вимірювань

Електричні характеристики напівпровідникових приладів (діода й транзистора) одержують за допомогою апаратури, схема якої зображена на рис. 13.3 і передбачає повне комп'ютерне керування вимірюваннями. Введення резистора R_1 з відомим опором дає

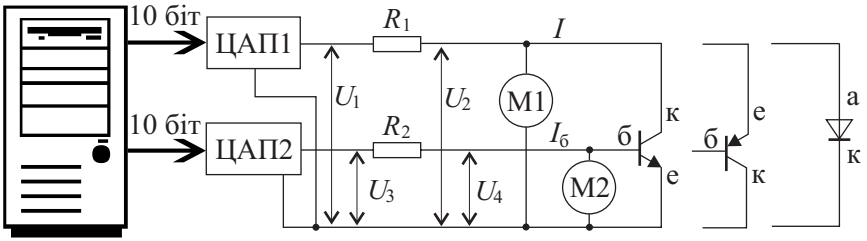

Рис. 13.3. Схема для вимірювання електричних характеристик напівпровідникових діодів і транзисторів

змогу розраховувати силу струму I в досліджуваному приладі. Для цього достатньо знати напруги U_1 та U_2, які позначено на рисунку. Зокрема,

$$I = (U_1 - U_2)/R_1. \tag{13.7}$$

де U_1 – напруга, яку створює перший цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП1), її величину програмно задає ПК, а U_2 – напруга, яку вимірює мультиметр M1. $U_2 = U_{\text{ак}}$ у випадку діода та $U_2 = U_{\text{ке}}$ у випадку транзистора. За цими даними легко побудувати вольт-амперну характеристику діода $I = f(U_{\text{ак}})$ чи т.зв. вихідну характеристику транзистора $I = I_{\text{е}} = f(U_{\text{ке}})$.

Для керування струмом бази $I_{\text{б}}$ транзистора додатково використовують другий цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП2). Оскільки резистор R_2 увімкнений послідовно, то струм бази

$$I_{\text{б}} = (U_3 - U_4)/R_2, \tag{13.8}$$

де U_3 – напруга, яку створює другий цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП2), а U_4 – напруга, яку вимірює мультиметр M2. Очевидно, що $U_4 = U_{\text{бе}}$.

Мультиметр M1 має зв'язок з ПК через паралельний порт RS232. Результати усіх вимірювань U_1 та U_2 у вигляді таблиці зберігають у текстовому файлі. Опрацювання цих даних можна виконати за допомогою відповідних програмам, враховуючи відомі значення опорів R_1, R_2 та формули (13.7)–(13.8).

Порядок виконання роботи:

1. Ознайомтеся з комп'ютерною програмою для керування вимірюваннями та електричними схемами на макеті з діодами й транзисторами типів n–p–n і p–n–p. Під час дослідження діодів ЦАП2 не використовують.

2. Виміряйте вольт-амперні характеристики кількох діодів та побудуйте відповідні графіки у лінійному $I = f(U_{\text{ак}})$ та напівлогарифмічному $\ln I = f(U_{\text{ак}})$ масштабах.

3. Для дослідження статичних характеристик транзистора зберіть схему зі спільним емітером (рис. 13.3).

4. Виміряйте вихідні характеристики транзистора для різних струмів бази $I_{\text{б}}$. Для цього величини напруг U_3 та U_4 записуйте окремо за даними на екрані ПК та показами мультиметра М2 (можна також використати АЦП на макеті).

5. Сімейство вихідних характеристик транзистора подайте графічно та визначте коефіцієнт підсилення β для кількох струмів бази та $U_{\text{ке}} = 6$ В.

Контрольні запитання:

1. У чому полягає принцип роботи напівпровідникового випростувача?

2. Яка відмінність між транзисторами p–n–p та n–p–n типів?

3. Чому транзистор є підсилювачем струму, а не напруги?

4. Як створюють напругу на емітерному та колекторному переході транзистора?

5. Які переваги напівпровідникових діодів над вакуумними?

Лабораторна робота 14

Вивчення електричних кіл змінного струму

Мета роботи: дослідження закону Ома для змінного струму, визначення залежностей активних опорів та зсуву фаз між коливаннями напруги й струму від частоти.

14.1 Змінний електричний струм

Розглянемо основні співвідношення, які описують протікання змінного струму в колі, що складається з послідовно ввімкнених конденсатора C, котушки індуктивності L та активного опору R. Зовнішню змінну напругу $U = U_m \cos \omega t$, прикладену до такого кола, можна вважати е.р.с., що зумовлює змінний електричний струм

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi). \tag{14.1}$$

Для амплітудного значення I_m струму та його фазового зсуву φ відносно напруги можна також записати:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \qquad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}. \tag{14.2}$$

Вирази (14.1) та (14.2) розглядають, як закон Ома для змінного струму. Знаменник у першій формулі (14.2), що має розмірність опору, називають *повним опором*, чи *імпедансом*

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}. \tag{14.3}$$

Реактивним опором X називають величину

$$X = \omega L - 1/\omega C, \tag{14.4}$$

причому $X_L = \omega L$ – *індуктивним опором*, а $X_C = 1/\omega C$ – *ємнісним опором*. Отже, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$. Зауважимо, що індуктивний

опір лінійно зростає із збільшенням частоти ω, тоді як ємнісний – меншає.

14.2 Опори у колах змінного струму

На підставі рівностей (14.1)–(14.2) можна проаналізувати окремі випадки в колах змінного струму.

1. $X_L = 0$, $X_C = 0$, $Z = R$. Отже, на ділянці кола, в яку входить тільки резистор, $\operatorname{tg}\varphi_R = 0$, тому $\varphi_R = 0$. Зміщення фаз між силою струму й напругою в такому колі немає.

2. На ділянці кола, яка містить тільки котушку індуктивності, $\operatorname{tg}\varphi_L = \infty$ та $\varphi_L = \pi/2$. Отже, сила струму за фазою відстає від напруги на $\pi/2$. Якщо ж $R \neq 0$, то $\operatorname{tg}\varphi = \omega L/R$.

3. На ділянці кола, яка містить тільки конденсатор, $\operatorname{tg}\varphi_C = \dfrac{1/(\omega C)}{0} = \infty$, причому $\varphi_C = -\pi/2$. Отже, сила струму за фазою випереджає напругу на $\pi/2$. Якщо ж $R \neq 0$, то $\operatorname{tg}\varphi = -1/(\omega RC)$.

У загальному випадку струм відстає від напруги ($\varphi > 0$), якщо $\omega L > 1/\omega C$ та випереджає напругу ($\varphi < 0$), якщо $\omega L < 1/\omega C$.

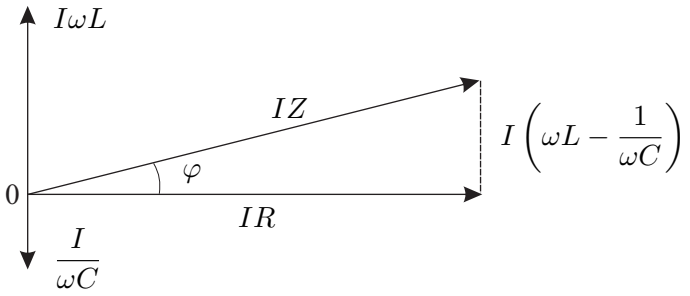

Рис. 14.1. Векторна діаграма для кола змінного струму

Досить зручним і наочним способом подання величин, які змінюються за гармонічним законом, є метод векторних діаграм. На рис. 14.1 зображена векторна діаграма для складної ділянки кола змінного струму.

Вздовж горизонтальної осі відкладено (як вектор) у відносних одиницях миттєве значення напруги $U = IR$ на резисторі. Миттєві значення напруг на котушці індуктивності $I\omega L$ і на конденсаторі $I/(\omega C)$ відкладені на вертикальній осі. Протилежні напрямки цих векторів вказують на те, що ці напруги завжди перебувають у протилежних фазах. Вектор з довжиною IZ є сумою трьох векторів, а кут між напрямками IZ та IR – це різниця фаз φ.

Векторні діаграми дають змогу просто одержати основні рівняння для розрахунків електричних кіл змінного струму, серед яких й (14.1)–(14.3).

14.3 Потужність у колі змінного струму

Потужність $P(t)$, яка виділяється у колі змінного струму, є добутком миттєвих значень струму й напруги

$$P(t) = UI = U_m I_m \cos\omega t \cos(\omega t - \varphi). \tag{14.5}$$

Цю формулу можна перетворити до вигляду, який зручніше аналізувати

$$P(t) = U_m I_m (\cos^2 \omega t \cos\varphi + \sin\omega t \cos\omega t \sin\varphi). \tag{14.6}$$

Для практики важливо знати середню величину потужності. Оскільки $\langle \cos^2 \omega t \rangle = 1/2$, а $\langle \cos\omega t \sin\omega t \rangle = 0$, то

$$\langle P \rangle = \frac{U_m I_m}{2} \cos\varphi. \tag{14.7}$$

Інший вираз одержимо, якщо скористатись векторною діаграмою (рис. 14.1), за якою $U_m \cos\varphi = RI_m$. Тому середня потужність

$$\langle P \rangle = \frac{RI_m^2}{2}. \tag{14.8}$$

Таку потужність створює струм $I = I_m/\sqrt{2}$, тому й величини

$$U = U_m/\sqrt{2}, \qquad I = I_m/\sqrt{2}. \tag{14.9}$$

називають *діючими* (або *ефективними*) значеннями напруги та струму. Усі вольтметри й амперметри змінного струму градуйовані саме за діючими значеннями.

Середня потужність, виражена через ефективну напругу й струм, на підставі (14.7) набуває вигляду:

$$\langle P \rangle = U I \cos\varphi, \tag{14.10}$$

де множник $\cos\varphi$ називають *коефіцієнтом потужності*. Отже, потужність, яка виділяється у колі змінного струму, залежить не тільки від напруги та сили струму, але й від різниці фаз між ними.

Якщо $\varphi = \pi/2$, то середня потужність $\langle P \rangle = 0$ навіть тоді, коли струм та напруга набувають великих значень. За таких умов енергія, яку генератор віддає у зовнішнє коло впродовж чверті періоду, повертається від зовнішнього кола до генератора впродовж наступної чверті періоду.

Залежність потужності від $\cos\varphi$ потрібно враховувати під час проектування пристроїв електротехніки. Оптимальною є ситуація, коли індуктивний опір дорівнює ємнісному, тоді втрати електроенергії на ділянках лінії електропередачі мінімальні.

Порядок виконання роботи:

Експериментальне дослідження електричних кіл змінного струму доцільно проводити з використанням генератора, двоканального осцилографа та мультиметра у режимі вимірювання змінного струму. Об'єктами вивчення є елементи R, L, C та їхні комбінації, можливі схеми яких зображені на рис. 14.2. Формули для розрахунків повного опору Z, реактивного X і тангенса різниці фаз $\operatorname{tg}\varphi$ у випадках *а,б,в* легко одержати з (14.1)–(14.4) та з описаних на с. 91 випадків.

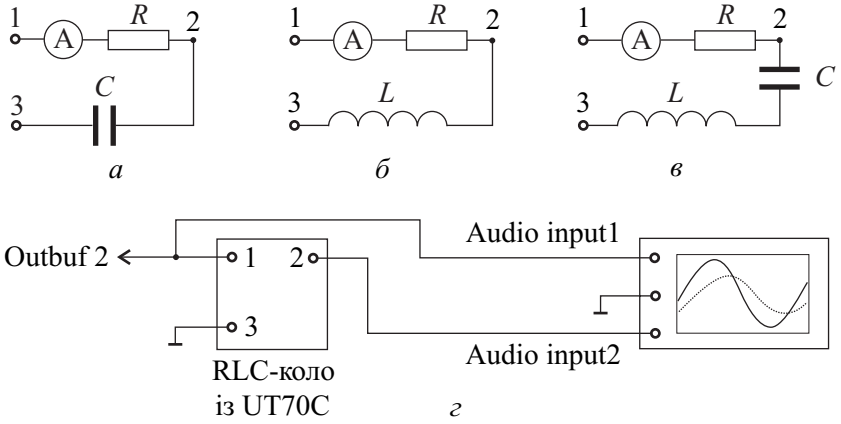

Рис. 14.2. Електричні кола для дослідження процесів протікання змінного струму (*а,б,в*) і схема їхнього ввімкнення до цифрових приладів – генератора та двоканального осцилографа (*г*). Амперметром A на схемах є мультиметр UT70C. 1,2 – точки під'єднання двох каналів осцилографа, 3 – контакт землі GND

Досліджувані елементи слід увімкнути в електричне коло згідно з рис. 14.2, *г*. Тут використано цифровий генератор з макету, частотою якого можна керувати кнопками $\triangle$ та $\triangledown$, його вихід позначено `Outbuf2`. Цифровий осцилограф у ПК дає змогу порівнювати амплітуду U_m напруги, яку створює генератор із амплітудою напруги U_C чи U_L, яка існує на елементах досліджуваного електричного кола змінного струму та визначати різницю фаз φ між змінними сигналами на контактах 1 і 2.

1. Ознайомтеся із розташуванням на лабораторному макеті та керуванням цифровим генератором змінної напруги. Змінюючи частоту f генератора, добийтеся стійкого сигналу на цифровому осцилографі.

2. Почергово дослідіть схеми із послідовно з'єднаних резистора та конденсатора (рис. 14.2, *а*), резистора та котушки індуктивності (*б*), усіх трьох елементів (*в*). Для цього:

ктивності (рис. 14.2, *б*), резистора, конденсатора та котушки індуктивності (рис. 14.2, *в*).

3. Виміряйте залежність від циклічної частоти $\omega = 2\pi f$ діючих значень напруги на елементах C та L за допомогою цифрового осцилографа, а також сили змінного струму I за допомогою мультиметра для кожного електричного кола. Використовуючи ПК, отримайте відповідні графіки $I = f(\omega)$; $U_C = f(\omega)$; $U_L = f(\omega)$.

4. Побудуйте частотні залежності індуктивного опору $X_L = U_L/I_L = f(\omega)$ та величини, оберненої до ємнісного опору $1/X_C = I_C/U_C = f(\omega)$, знайдіть величини L та C за кутовим коефіцієнтом нахилу відповідних прямих.

5. Виміряйте різницю фаз φ між вихідною змінною напругою генератора та змінною напругою на конденсаторі C (рис. 14.2, *а*), котушці індуктивності L (рис. 14.2, *б*) та на цих же елементах у схемі на рис. 14.2, *в*. Побудуйте графік залежності різниці фаз φ від частоти ω для електричного кола з рис. 14.2, *в*.

Контрольні запитання:

1. Поясніть основні відмінності між колами постійного та змінного струму.

2. Які співвідношення між амплітудами та фазами струмів, що протікають через активний опір, індуктивність та ємність і прикладеною до них напругою?

3. Поясніть методику вимірювання амплітуд і фаз змінних напруг за допомогою осцилографа.

4. Для чого потрібні частотні та фазові характеристики кіл змінного струму?

Лабораторна робота 15

Резонансні явища у колах змінного струму

Мета роботи: вивчення резонансних явищ у колах змінного струму, дослідження резонансу напруг та резонансу струмів.

15.1 Резонанс напруг

Резонанс напруг (послідовний резонанс) виникає в колі змінного струму при послідовному з'єднанні конденсатора та котушки індуктивності за умови $X_L = X_C$. Тоді для частоти

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \tag{15.1}$$

повний опір Z мінімальний, він дорівнює активному опору R, а коливання струму та напруги – синфазні ($\varphi = 0$). Це явище називають *резонансом напруг*, а частоту ω_0 – резонансною.

Амплітуда змінної напруги на котушці індуктивності дорівнює $U_L = X_L I_m = \omega L I_m$, а на ємності $U_C = X_C I_m = \frac{1}{\omega C} I_m$. Підставивши у ці формули вираз для резонансної частоти, отримаємо

$$U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}} \sqrt{\frac{L}{C}} I_m = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m. \tag{15.2}$$

Отже, напруги на конденсаторі та котушці індуктивності за умови резонансу однакові за величиною, але протилежні за фазою. Тому їхня сума в довільний момент часу дорівнює нулеві, а вся зовнішня напруга припадає на активний опір R, забезпечуючи найбільшу амплітуду сили струму в колі $I_m = U_m/R$.

Окрім того, якщо $\sqrt{\frac{L}{C}} > R$, то амплітуда напруги на котушці індуктивності та конденсаторі перевищує U_m – амплітуду змінної напруги, яка прикладена до електричного кола.

Резонансу напруг можна досягнути шляхом зміни величин L, C, або при сталих L і C – зміною частоти ω. Режим резонансу напруг у техніці сильних змінних струмів є небезпечним явищем, оскільки може призвести до руйнування елементів електричних кіл.

Характерними особливостями резонансу напруг є:

- імпеданс Z електричного кола мінімальний і дорівнює активному опору;
- амплітуда сили струму максимальна й дорівнює $I_m = U_m/R$;
- амплітуда напруги на активному опорі дорівнює амплітуді зовнішньої прикладеної напруги U_m;
- між напругою та струмом немає зсуву фаз;
- корисна потужність змінного струму максимальна, вся вона передається тільки активному опору.

На підставі співвідношення (15.2) дістанемо ще один вираз для амплітуди напруги на котушці індуктивності:

$$U_{Lm} = I_m \omega L = U_m \omega L/R. \tag{15.3}$$

Отже, амплітудне значення напруги на індуктивності залежить від відношення

$$\frac{\omega L}{R} = Q, \quad \text{або} \quad Q = \frac{1}{\omega RC}. \tag{15.4}$$

Цю величину називають *добротністю контура*. Коли частоти високі, легко забезпечити умову $\omega L \gg R$, тоді добротність $Q \gg 1$, а максимальна резонансна напруга на котушці індуктивності та конденсаторі $U_{Lm} = U_{Cm} = U_m Q$ може бути набагато більшою від амплітуди змінної напруги U_m самого джерела. Це явище використовують, зокрема, для налаштування радіоприймачів на частоту радіосигналу передавача.

15.2 Резонанс струмів

В електричному колі змінного струму за умов паралельного з'єднання котушки індуктивності та конденсатора й рівності частот зовнішньої напруги та резонансної частоти електричного кола ($\omega = \omega_0$) виникає *резонанс струмів* (паралельний резонанс).

Оскільки напруга на обох паралельно з'єднаних елементах однакова, то зсув фаз існує тільки для струмів через котушку індуктивності та конденсатор:

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{U_m \sin(\omega t - \pi/2)}{\omega L}; \\ I_C &= \omega C U_C \sin(\omega t + \pi/2). \end{aligned} \tag{15.5}$$

За умови $\omega L = 1/(\omega C)$ струми в обох гілках однакові за величиною $I_L = I_C = I_0$, але мають протилежні фази й тому взаємно врівноважують один одного. Отже, в резонансі перебувають сили струмів у конденсаторі та котушці індуктивності.

Діюче значення напруги на елементах L і C за умови резонансу струмів дорівнює

$$U_L = U_C = \omega_0 L I_L = \frac{1}{\omega_0 C} I_C = \sqrt{\frac{L}{C}} I_0. \tag{15.6}$$

Це співвідношення вказує на те, що під час резонансу опір паралельно з'єднаних котушки індуктивності та конденсатора дорівнює опору індуктивного або ємнісного елемента.

Однак, кожна котушка індуктивності завжди володіє деяким активним опором R, на рис. 15.1, *в* він зображений окремо. Очевидно, що сила струму, який протікає в такому колі, дорівнює

$$\begin{aligned} I = I_L + I_C = U\left(\frac{1}{R + i\omega L} + i\omega C\right) = U\left(\frac{R - i\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} + i\omega C\right) = \\ = U\frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} - i\frac{U}{R^2 + \omega^2 L^2}[\omega L - \omega C(R^2 + \omega^2 L^2)]. \end{aligned} \tag{15.7}$$

Тоді за умови

$$\omega L - \omega C(R^2 + \omega^2 L^2) = 0 \tag{15.8}$$

електричне коло з рис. 15.1, *в* має властивості чисто активного опору з величиною $\dfrac{R}{R^2 + \omega^2 L^2}$, який є найбільшим для заданих параметрів цього кола (згадаймо, що під час резонансу напруг опір є найменшим). Поділивши всі доданки рівняння (15.8) на $\omega^2 LC$, отримаємо умову резонансу струмів у такому вигляді:

$$\frac{1}{\omega C} - \omega L = \frac{R^2}{\omega L}, \tag{15.9}$$

звідки резонансна частота

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}. \tag{15.10}$$

Зазвичай буває так, що $\omega L \gg R$, тому резонансну частоту можна приблизно визначати за формулою (15.1).

Порядок виконання роботи:

Умову резонансу досягають зміною частоти напруги, прикладеної до кола змінного струму, залишаючи сталою її амплітуду. Для цього зручно використати цифровий генератор на макеті, який описано в *лабораторній роботі 2*. Межі та крок зміни частоти генератора залежить від програмного забезпечення, але їх завжди можна встановити за показами дисплея.

Мультиметр призначений для вимірювання діючих значень змінного струму в колі, а цифровий осцилограф – для вимірювання амплітудних та діючих значень одразу двох змінних напруг: на виході генератора (контакт 1 на схемах рис. 15.1) та в окремо вибраній точці кола на контакті 2 (наприклад, на рис. 15.1, *а* – це місце з'єднання резистора R з конденсатором C). Контакт 3 завжди має бути з'єднаним із землею `GND`.

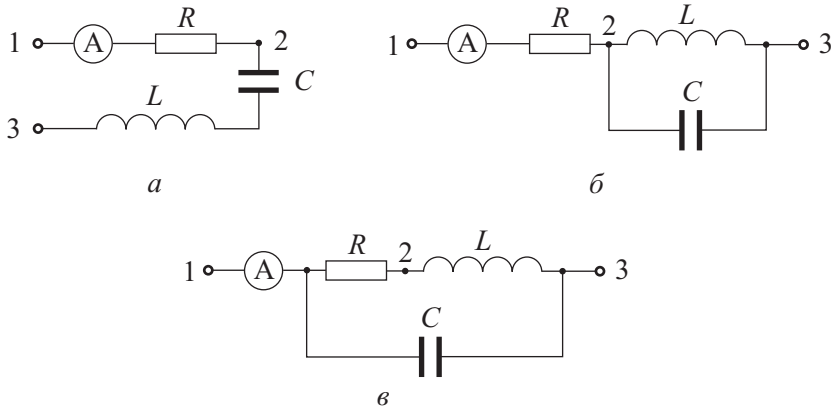

Рис. 15.1. Електричні кола змінного струму для дослідження резонансу напруг (*а*) і резонансу струмів (*б* та *в*). 1 – контакт "Outbuf2" та "Audio input1", 2 – контакт "Audio input2", 3 – контакт землі "GND". Амперметр на схемі – мультиметр для вимірювання діючих значень змінного струму в колах

Така схема дає змогу побудувати залежності від частоти f діючих напруг на всіх елементах кола, струму та різниці фаз між ними. Методику визначення різниці фаз φ за допомогою двоканального осцилографа освойте окремо за вказівками викладача.

1. Використовуючи задані величини L та C оцініть резонансну частоту $f_0 = \omega_0/2\pi$ за формулою (15.1).

2. Складіть електричне коло згідно з рис. 15.1, *а*. Використайте цифровий генератор, вихід якого на макеті позначено `Outbuf2`. Під'єднайте до контактів 1 та 2 цифровий осцилограф ПК (його два входи на макеті це – `Audio input1` та `Audio input2`), а мультиметр використовуйте для вимірювання змінного струму (діапазон мА$\simeq$).

3. Змінюйте частоту f на генераторі та записуйте у таблицю безпосередньо на ПК вимірювані величини: частоту f, струм

I, діючу напругу в точках 1 та 2 (U_1 та U_2 відповідно), різницю фаз між цими змінними напругами φ. Використовуючи відомі значення R, L та C, отримайте також залежності діючих напруг на опорі $U_R = IR$, на котушці індуктивності $U_L = I\omega L$ та на конденсаторі $U_C = I/\omega C$ від частоти.

4. Побудуйте графік залежності сили струму I у колі від частоти f. Визначте максимальну силу струму під час резонансу, частоту ω_0 та порівняйте ці величини із розрахованими за відповідним формулами. Зміною величини опору R забезпечте умови $\sqrt{L/C} < R$ та $\sqrt{L/C} > R$, порівняйте відповідні напруги на котушці індуктивності в ділянці резонансу.

5. Аналогічні вимірювання виконайте для кола з паралельним з'єднанням котушки індуктивності та конденсатора за рис. 15.1, *б* та *в*. Побудуйте графік залежності струму в нерозгалуженій ділянці кола від частоти f.

6. Визначте добротність Q контура LC у схемі за рис. 15.1, *б* і резонансні напруги на котушці індуктивності та конденсаторі.

Контрольні запитання:

1. Поясніть відмінність між явищами резонансу напруг та резонансу струмів.

2. Які співвідношення є спільними для обох видів резонансу?

3. Поясніть фізичний зміст добротності та прокоментуйте свої результати.

4. Де використовують явище резонансу в колах змінного струму? Які його шкідливі наслідки ви знаєте?

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики: Навчальний посібник – Т. 2. Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 2003. – 452 с.

2. Савельев И. В. Курс общей физики: Учебное пособие для студентов втузов: [В 5 кн.]. – Кн. 2. Электричество и магнетизм. – 4-е изд., перераб. – М.: Наука: Физматлит, 1998. – 336 с.

3. Калашников С. Г. Электричество. 5-е изд. – М: Наука, 1985. – 576 с.

4. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.

5. Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. 2-е изд. – М: Высш. шк., 1991. – 289 с.

6. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – Т. 3. Электричество. – М.: Наука, 1983. – 703 с.

7. Загальна фізика: Лабораторний практикум: Навч. посібник/ В. М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін. За заг. ред. І. Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.

8. Козлов В. И. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм. Под ред. А. Н. Матвеева и Д. Ф. Киселева. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 272 с.

9. Электрические измерения: Учебник для вузов. Под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

Зміст

Вступ **3**

1 Електричні вимірювання та методи вимірювань **4**
1.1 Прилади для вимірювання електричних величин . . 4
1.2 Програмне забезпечення вимірювань та опрацювання результатів 10

2 Вимірювання параметрів електричних сигналів за допомогою осцилографа **14**
2.1 Структура осцилографа 14
2.2 Вимірювання параметрів сигналу за допомогою осцилографа 16
2.3 Цифрові осцилографи та їхнє використання 19

3 Вивчення закону Ома та правил Кірхгофа **25**
3.1 Закон Ома для постійного струму. Опір провідників 25
3.2 Розгалужені кола. Правила Кірхгофа 26
3.3 Закон Ома для повного кола 28

4 Дослідження електростатичного поля **31**
4.1 Електростатичне поле 31
4.2 Методика вимірювання та апаратура 33

5 Вимірювання електричних властивостей сегнетоелектриків **38**
5.1 Сегнетоелектрики в електричному полі 38
5.2 Вимірювання параметрів сегнетоелектричної петлі гістерезису 40

6 Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі **44**
6.1 Магнітне поле Землі 44
6.2 Тангенс-гальванометр 46

7 Дослідження ефекту Холла **49**
7.1 Ефект Холла в напівпровідниках 49
7.2 Методика вимірювання основних параметрів ефекту Холла 51

8 Спостереження процесів намагнічення ферромагнетиків **54**
8.1 Ферромагнетики в магнітному полі 54
8.2 Визначення магнітних характеристик з допомогою осцилографа 55
8.3 Вимірювання магнітної проникності методом моста змінного струму 57

9 Дослідження явища самоіндукції **60**
9.1 Явище самоіндукції 60
9.2 Струми у колі з індуктивністю 61
9.3 Методика дослідження явища самоіндукції 63

10 Встановлення залежності опору металу і напівпровідника від температури **66**
10.1 Опір металів 66
10.2 Провідність та опір напівпровідників 67

11 Вивчення термоелектричних явищ **71**
11.1 Контактна різниця потенціалів. Ефект Зеєбека . . . 71
11.2 Ефект Пельтьє 73
11.3 Схеми для вимірювання термо-е.р.с. 75

12 Вимірювання характеристик вакуумного діода і тріода **78**
12.1 Закон Богуславського–Ленгмюра 78
12.2 Характеристики лампового тріода 79
12.3 Апаратура для вимірювання характеристик вакуумного діода і тріода 81

13 Напівпровідниковий діод і транзистор **84**
13.1 Електричні властивості p–n-переходу 84
13.2 Схеми ввімкнення транзисторів 85
13.3 Комп'ютеризована апаратура для вимірювань . . . 87

14 Вивчення електричних кіл змінного струму **90**
14.1 Змінний електричний струм 90
14.2 Опори у колах змінного струму 91
14.3 Потужність у колі змінного струму 92

15 Резонансні явища у колах змінного струму **96**
15.1 Резонанс напруг 96
15.2 Резонанс струмів 98

Література **102**