

Горват А. А., Грабар О. О.

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Частина 3

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ



Ужгород - 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«Ужгородський національний університет»

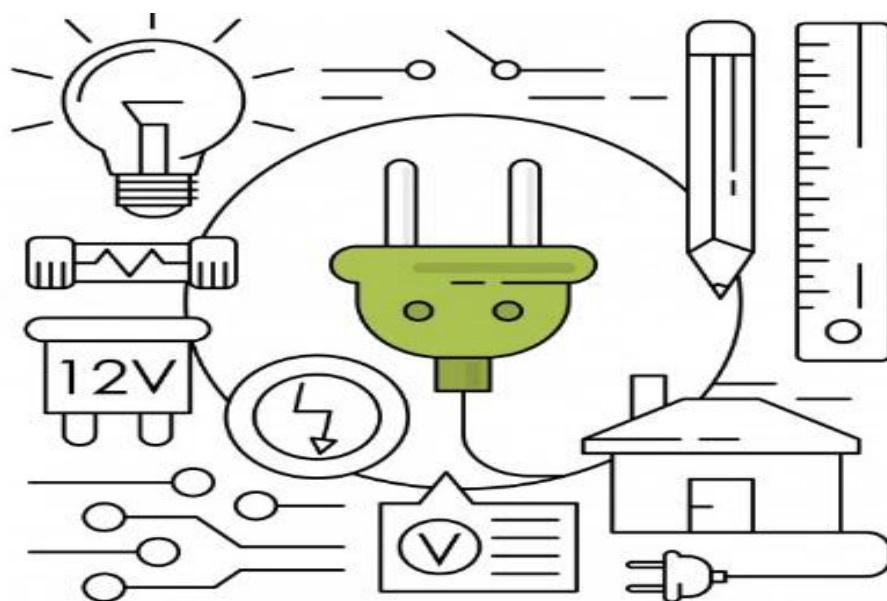
А. А. Горват, О. О. Грабар

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Частина 3

ЕЛЕКТРИКА І
МАГНЕТИЗМ

Навчальний посібник



Ужгород «XXXX» 2022

ББК 22.3 Я73
Г–67
УДК 53 (075.8)

Рекомендовано до друку Вченою радою ДВНЗ
«Ужгородський національний університет»,
протокол № 12 від “21” грудня 2021 року

Горват А.А., Грабар О.О.

Г – 67 ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. Частина 3. Електрика і магнетизм. Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво **XXXX**, 2022р. – 159 с.

У посібнику наведені описи лабораторних робіт загального фізичного практикуму, які містять короткі теоретичні відомості, методику проведення експерименту, опис приладів та завдання і порядок їх виконання з курсу „Електрика і магнетизм, класична оптика” дисципліни "Загальна фізика" для студентів фізичного факультету УжНУ спеціальностей 163 «Біомедична інженерія» і 153 «Мікро-та наносистемна техніка».

Посібник призначений для використання при підготовці до лабораторних занять та для самостійної роботи студентів, які навчаються за вказаними спеціальностями і може бути корисним для студентів інших інженерних спеціальностей.

Р е ц е н з е н т и:

Гомонай Г.М. - доктор фіз.-мат. наук, професор, член-кореспондент НАНУ, директор Інститут електронної фізики НАН України

Жигуц Ю.Ю. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування УжНУ

©2022. Горват А.А., Грабар О.О.

ПЕРЕДМОВА

Лабораторний практикум є найефективнішою формою пізнавальної діяльності студентів, оскільки він дає можливість особисто відтворювати і спостерігати більшість явищ, які вивчаються у фізиці, самостійно перевіряти на досліді фізичні закономірності та наслідки з них, а також знайомитися з будовою та принципом дії приладів і найважливішими методами фізичного експерименту. Як складова частина навчального процесу, виконання лабораторних робіт прищеплює навички самостійної дослідницької роботи і технічно грамотного проведення різноманітних вимірювань, а також закріплює і обґрунтовує теоретичні знання, які одержані на лекціях і практичних заняттях. Унаслідок цього здійснюється один з важливих етапів навчання – поєднання теорії з практикою.

У цьому навчальному посібнику приведено описи лабораторних робіт з електрики і магнетизму. Опис кожної лабораторної роботи містить мету, перелік обладнання, теоретичні відомості, методику проведення досліджень, яка включає схему установки для проведення експерименту, завдання і порядок їх виконання та контрольні запитання.

Особливість даного практикуму полягає в тому, що за бажанням студенти можуть виконувати не тільки завдання і лабораторні роботи, наведені у цьому навчальному посібнику, а і вибирати, погоджуючи з керівником занять, інші теми лабораторних робіт фізичних практикумів, перелік яких наведений у Додатку 1.

Розпочинається посібник, як і лабораторний практикум вступними заняттями, на яких студенти знайомляться з принципом дії будовою та особливостями (межі вимірювання, ціну поділки шкали, клас точності, правила користування приладом і вимоги техніки безпеки) як аналогових так і цифрових електровимірювальних приладів, оскільки електричні методи вимірювання широко використовуються в науці і техніці. Це пояснюється тим, що вони мають низку переваг перед іншими методами. Головні з цих переваг такі:

- поширеність електромагнітних явищ у природі, завдяки чому електричні вимірювання відкривають широкі можливості для вивчення різноманітних властивостей речовин і явищ, контролювання різних процесів;

- відносна легкість взаємного перетворення електричної енергії в інші види енергії – механічну, теплову, хімічну, світлову;

- зручність управління і трансформації електричного струму за допомогою трансформаторів, реостатів, випрямлячів, підсилювачів тощо;
- надзвичайно висока чутливість і велика точність електричних методів вимірювання;
- можливість забезпечення безперервного контролю за протіканням процесів, що важливо для автоматизації досліджень.

Правила техніки безпеки

Тіло людини є провідником, опір якого змінюється в широких межах залежно від ряду факторів. Вологість, забруднення шкіри та інші фактори зменшують його опір. Якщо сила струму більша за 0,05А, то його дія на тіло людини протягом 0,1 с може спричинити небезпечне ураження. Оскільки сила струму залежить від напруги і опору, то за правилами техніки безпеки напруга, більша за 24 В, вважається небезпечною.

Неправильні з'єднання в схемі можуть призводити до виведення з ладу приладів, травматизму й ураження струмом. Тільки за чіткого дотримання вимог правил техніки безпеки можна запобігти цим неприємним ситуаціям.

Наведемо основні правила техніки безпеки.

1. До роботи в лабораторії допускаються лише студенти, які ознайомились із правилами техніки безпеки. Студенти розписуються в журналі обліку проведення інструктажу і несуть відповідальність за їх виконання.
2. Не можна самостійно робити будь-які вмикання або вимикання на головному щиті.
3. Складати коло за схемою можна тільки при вимкненій напрузі.
4. Вмикати струм у складене коло можна тільки після перевірки схеми викладачем або інженером практикуму та отримання їхнього дозволу.
5. Не можна доторкатися до неізольованих частин електричної схеми, які перебувають під напругою (проводи, вимикачі, затискачі, повзунки тощо).
6. Забороняється виконувати будь-які перемикання в схемі під напругою.
7. Не можна залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.
8. Забороняється відключати блокувальні пристрої.

9. Не дозволяється без потреби ходити по лабораторії та виконувати інші лабораторні роботи.

10. Якщо з вами або з вашим товаришем трапився нещасний випадок, слід негайно вимкнути джерело струму, повідомити викладача, подати потерпілому першу допомогу, одночасно викликавши швидку медичну допомогу.

Правила виконання та оформлення робіт

На початку кожного заняття викладач перевіряє теоретичну підготовку, наявність конспекту опрацьованого матеріалу і ставить декілька контрольних запитань студенту відповідно до теми роботи, яка буде виконуватись. Якщо відповіді на контрольні запитання задовільні, то студенту дозволяється виконувати лабораторну роботу.

Усі роботи практикуму студент виконує самостійно, консультуючись з викладачем. Приступаючи до роботи насамперед треба ознайомитись з обладнанням, з'ясувати призначення кожного його елемента. Після цього приступають до складання електричного кола за схемою. При цьому необхідно стежити за надійністю контактів між затискачем приладів і кінцями провідників. У складеній схемі слід встановити стрілки вимірювальних приладів на нуль, визначити ціну їх поділок, прилади з кількома межами вимірювань перемкнути на найбільші номінали. Приладами регулювання режиму електричного кола встановити максимальний опір і мінімальну напругу.

Вмикати живлення до складеної схеми і приступати до виконання експерименту можна тільки після перевірки схеми викладачем і одержання на це його дозволу. Як правило, в кожній лабораторній роботі досліди необхідно повторювати декілька разів і результати вимірювань записати у таблицю.

Джерело струму слід вмикати лише на час проведення вимірювань. Якщо при виконанні роботи окремі частини кола чи прилади сильно нагріваються, необхідно негайно вимкнути струм і попередити викладача.

Експериментальна частина роботи вважається виконаною, якщо одержаний результат або графік розгляне викладач. Після цього необхідно привести в порядок робоче місце, повідомити про це викладача та тільки після його дозволу залишити лабораторію.

По виконаній роботі на наступне заняття студент повинен скласти письмовий звіт (протокол лабораторної роботи) і захистити його. Для

зарахування роботи студент має дати вичерпні відповіді на поставлені запитання. Протокол письмового звіту повинен містити такі елементи:

- повна назва роботи і дата її виконання;
- мета роботи;
- обладнання з зазначенням типу і конкретних технічних характеристик використовуваних приладів;
- короткі теоретичні відомості про досліджуване явище;
- методику виконання вимірювань з обов'язковим відображенням схеми досліджу;
- порядок (хід) виконання роботи;
- результати експерименту у вигляді таблиць і графіків на міліметровому папері, виконаних від руки з використанням лінійки, транспортира або з використанням комп'ютерної техніки (програм Origin, Excel);
- розрахунок похибок;
- запис відповіді для визначуваних величин (кінцеві результати) з урахуванням похибок та одиниць вимірювання;
- висновки з інтерпретацією (при можливості) одержаних результатів.

Лабораторна робота № 1

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ. АНАЛОГОВІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ГРАДУЮВАННЯ АМПЕРМЕТРА І ВОЛЬТМЕТРА

Мета заняття: Ознайомитись з поняттями, які використовуються в інформаційно-вимірjuвальній техніці, вивчити методи та засоби вимірювання електричних величин, принцип дії та будову електромеханічних вимірювальних приладів, провести градуювання міліамперметра і вольтметра

Прилади та матеріали: лабораторні макети аналогових електровимірювальних приладів, взірцеві міри електричних величин (міри опору Р310, Р321, Р331, ... , магазини опорів Р33, Р4077, Р4078, Р4042, індуктивностей Р5057, ємностей Р5025, нормальний елемент Х480, Э303); технічні засоби навчання; плакати (біля 50), лабораторний макет, зразкові вольтамперметр та магазин опорів, реостати, джерело живлення постійного струму.

Теоретичні відомості

1. Основні поняття інформаційно-вимірювальної техніки

Результатом проведення будь-якого кількісного фізичного експерименту є вимірювання фізичних величин.

Фізична величина – це властивість, в якісному відношенні загальна для багатьох фізичних об'єктів (фізичних систем, їхніх станів і процесів, що у них відбуваються), але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкта. Якісна сторона визначає «вид» величини (наприклад, електричний опір), а кількісна – її «розмір» (наприклад, опір конкретного резистора). Фізичними величинами є також довжина, температура, сила струму, напруженість електричного поля, період коливань і т.д.

Конкретні реалізації однієї й тієї ж самої величини називають *однорідними* величинами. Наприклад, відстань між дзеркалом гальванометра та шкалою і висота телевежі - це конкретні реалізації однієї фізичної величини – довжини, і через це вони є однорідними фізичними величинами. Однорідні фізичні величини відрізняються одна від одної розміром.

Розмір фізичної величини – це кількісний вміст у даному об'єкті властивості, яка відповідає поняттю "фізична величина". Розміри

однорідних фізичних величин різних об'єктів порівнюють між собою, якщо відомі значення цих величин.

Значенням фізичної величини називається оцінка фізичної величини за допомогою певного числа прийнятих для неї одиниць.

Одиниця фізичної величини – це фізична величина, якій за означенням надано числове значення, що дорівнює 1.

Абстрактне число, яке виражає відношення значення величини до відповідної одиниці цієї фізичної величини, називається *числовим значенням величини*. Потрібно розрізняти істинне та дійсне значення фізичної величини.

Істинне значення фізичної величини – це таке її значення, яке ідеальним чином відобразило б в якісному та кількісному відношеннях відповідну властивість об'єкта.

Дійсне значення фізичної величини – це таке значення величини, яке знайдене експериментально і настільки наближається до істинного значення, що для певної мети може бути використане замість нього.

Знаходження значень фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів називають вимірюванням.

Вимірювання – це фізичний експеримент порівняння даної фізичної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю порівняння. Розмір одиниці величини може бути довільним. Проте, вимірювання повинні виконуватись у загальноприйнятих одиницях і, насамперед, у міжнародній системі одиниць СІ, до якої як основні одиниці входять одиниця маси - кілограм (кг), одиниця довжини - метр (м), одиниця часу - секунда (с), одиниця температури - Кельвін (К), одиниця кількості речовини – моль, одиниця сили струму - ампер (А). Одиниця фізичної величини повинна бути матеріалізована, тобто відтворена, причому таким чином, щоб її розмір був постійним у часі і не залежав від зовнішніх дій. Наявність точно відтворюваних одиниць фізичних величин дозволяє забезпечити єдність вимірювань, виконаних у різних місцях, у різний час і різними засобами.

2. Класифікація методів і засобів вимірювань

Вимірювання, як експериментальні процедури визначення фізичних величин, досить різноманітні, що пояснюється великою кількістю вимірюваних величин, різним характером їх зміни з часом, різними вимогами до точності вимірювання тощо.

Вимірювання в залежності від способу обробки експериментальних даних для знаходження результату поділяють на *прямі, посередні, сукупні та сумісні*.

Пряме вимірювання – вимірювання, при якому шукане значення фізичної величини знаходять безпосередньо з дослідних даних. Приклад прямого вимірювання – вимірювання вольтметром спаду напруги на резисторі.

Посереднє вимірювання – вимірювання, при якому шукане значення фізичної величини знаходять на основі відомої залежності між цією величиною і величинами, які піддаються прямим вимірюванням. При посередньому вимірюванні значення вимірюваної величини одержують шляхом розв'язання рівняння:

$$Y = F (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n), \quad (1)$$

де $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ – значення величин, одержаних за допомогою прямих вимірювань. Приклад посереднього вимірювання: знаходження об'єму тіла за його геометричними розмірами; визначення опору резистора R із рівняння $R = U/I$, в яке підставляють виміряні значення спаду напруги U на резисторі та сили струму I , який через нього протікає.

Сукупні вимірювання – одночасні вимірювання кількох однойменних величин, за якими шукані значення величин знаходять розв'язуванням системи рівнянь, здобутих при прямих вимірюваннях різних сполучень цих величин або при зміні умов вимірювань. Приклад сукупного вимірювання: вимірювання опорів резисторів, з'єднаних трикутником, шляхом вимірювань опорів між різними вершинами трикутника; за результатами трьох вимірювань визначають опори резисторів.

Сумісні вимірювання – одночасне вимірювання двох або кількох неоднойменних величин для знаходження залежності між ними (наприклад, температурний коефіцієнт опору резистора визначають за даними прямих вимірювань його опору при різних температурах).

Усі вимірювання фізичних величин здійснюють за допомогою засобів вимірювання. *Засіб вимірювання* – це технічний пристрій, який використовується при вимірюваннях і має нормовані метрологічні властивості.

Розрізняють такі види засобів електричних вимірювань:

- міри та еталони;
- вимірювальні перетворювачі;

- вимірювальні прилади;
- вимірювальні установки;
- вимірювальні системи.

Еталоном одиниці фізичної величини називають засіб вимірювання (або комплекс засобів вимірювання), який забезпечує відтворення і (або) зберігання одиниці з метою передавання її розміру нижчим за перевіркою схемою засобам вимірювання.

Взірцевими засобами вимірювання називаються міра, вимірювальний прилад або вимірювальний перетворювач, які призначені для перевірки за ними інших засобів і утверджені як взірцеві. Взірцеві засоби вимірювання можуть бути також безпосередньо використані для дуже точних вимірювань.

Мірою називається засіб вимірювання, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру. Розрізняють однозначні міри, багатозначні міри і набір мір. Однозначна міра відтворює фізичну величину одного розміру. Багатозначна міра відтворює ряд значень однойменних фізичних величин різного розміру. *Набір мір* – це підібраний комплект мір для відтворення ряду значень однойменних величин різного розміру, причому міри можуть використовуватись як окремо, так і в різних комбінаціях. Прикладом набору мір є шальки терезів, магазин опорів, ємностей тощо. *Магазин мір* – це набір мір, конструктивно об'єднаних в одне ціле.

Вимірювальним приладом називається засіб вимірювання, який служить для вироблення сигналу вимірюваної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприймання спостерігачем. Вимірювальні прилади класифікуються за різними ознаками. Прилади, покази яких є неперервними функціями змін вимірюваних величин, називаються *аналоговими* приладами. Вимірювальні прилади, які автоматично виробляють дискретні сигнали вимірюваної інформації і покази яких подані в цифровій формі, називаються *цифровими* приладами.

Вимірювальні прилади поділяються на *показуючі*, які допускають тільки зчитування показів оператором, та *реєструючі*, в яких передбачена реєстрація і зберігання інформації. Реєструючі прилади поділяються на *самописні* – з записом показів у формі діаграми, на якій може бути відтворена неперервна функція вимірюваної величини, і *цифрові*, в яких передбачено друк показів у цифровій формі. У приладах з вмонтованими міні-ЕОМ можлива реєстрація і зберігання

інформації в оперативній пам'яті міні-ЕОМ, або, наприклад, на магнітних носіях інформації.

Для одержання результату вимірювань фізичної величини в прийнятих одиницях у процесі вимірювань обов'язково повинна брати участь міра. Вимірювальний *прилад прямої дії* може бути попередньо проградуєований в одиницях вимірюваної величини, тобто міра попередньо використовується в процесі виготовлення приладу. Існують прилади, які призначені для безпосереднього порівняння вимірюваної величини з величиною, значення якої відоме. Такі вимірювальні прилади називаються *приладами порівняння*.

За характером використання прилади поділяються на стаціонарні (щитові), корпуси яких пристосовані для жорсткого кріплення на місці встановлення, та переносні. В залежності від ступеня захищеності прилади бувають звичайними, пило-, водозахисними, герметичними тощо.

Вимірювальними перетворювачами називають засоби вимірювань, призначені для вироблення сигналів вимірної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки і (або) зберігання, але які не піддаються безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Залежність між вимірюваною величиною і вихідним сигналом вимірювального перетворювача називається *функцією перетворення*. В залежності від призначення вимірювальні перетворювачі поділяються на масштабні, які змінюють вхідну величину у задане число разів, і перетворювачі роду величини. До масштабних відносяться шунти, подільники напруги, вимірювальні трансформатори, електронні підсилювачі.

Слід виокремити окремо групу аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), які перетворюють вимірювані величини у код і які широко використовуються у цифрових вимірювальних приладах.

Перетворювачі роду величин, наприклад, неелектричних в електричні, складають різноманітну групу пристроїв, які використовують у різних галузях вимірювальної техніки, наприклад, при вимірюваннях температури, тиску і т. д. Деякі види вимірювальних перетворювачів інколи називають датчиками (сенсорами, первинними перетворювачами), під якими розуміють сукупність одного або кількох вимірювальних перетворювачів і супутніх їм конструктивних елементів, розташованих безпосередньо на об'єкті вимірювання і віддалених від місця відображення, реєстрації або опрацювання вимірюваної інформації.

Вимірювальною установкою називають сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювання (мір, вимірювальних приладів і перетворювачів) та допоміжних пристроїв, призначених для вироблення сигналів вимірюваної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприймання спостерігачем або її автоматичної реєстрації.

Інформаційно-вимірювальна система – це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів, об'єднаних каналами зв'язку і призначених для отримання вимірюваної інформації, її перетворення, опрацювання з метою подання споживачу (в тому числі автоматизованій системі управління - АСУ) в необхідному вигляді або автоматичного здійснення логічних функцій контролю, діагностування, ідентифікації.

3. Характеристики засобів вимірювань

Номенклатура метрологічних характеристик, правила вибору комплексів нормованих метрологічних характеристик для засобів вимірювань і способи їх нормування визначені в ДСТУ ГОСТ 8.009: 2008. Метрологічні характеристики - це характеристики технічних властивостей засобу вимірювань, які впливають на результат вимірювання. Для кожного типу засобу вимірювань встановлюють свої метрологічні характеристики.

Характеристики, що встановлюються нормативно-технічними документами, називаються нормованими метрологічними характеристиками. До нормованих метрологічних характеристик включають ті, що відображають реальні властивості засобу вимірювання і перелік цих характеристик повинен бути достатнім для оцінки інструментальної складової похибки вимірювань в умовах застосування засобу вимірювань.

Загальний перелік нормованих метрологічних характеристик засобу вимірювань, форми їх подання та методи нормування визначаються стандартами. В перелік можуть входити: межі вимірювань, межі шкали; ціна поділки аналогових засобів; вихідний код, число розрядів коду, номінальна ціна найменшого розряду для цифрових засобів; градуовальна характеристика; похибка; варіація показів приладу або вихідного сигналу перетворювача; повний вхідний опір вимірювального пристрою, вимірювального

перетворювача; споживана потужність, швидкодія, час встановлення показів, надійність.

У загальному випадку необхідно розрізняти діапазон показань і **діапазон вимірювань** приладу. Діапазон показань – це інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений найменшим та найбільшим її значенням у діапазоні показів. Частина діапазону показів засобу вимірювань, для якої пронормовані границі допустимих похибок, називається діапазоном вимірювань. Найменше і найбільше значення діапазону вимірювань називають нижньою X_n і верхньою X_v границею вимірювань.

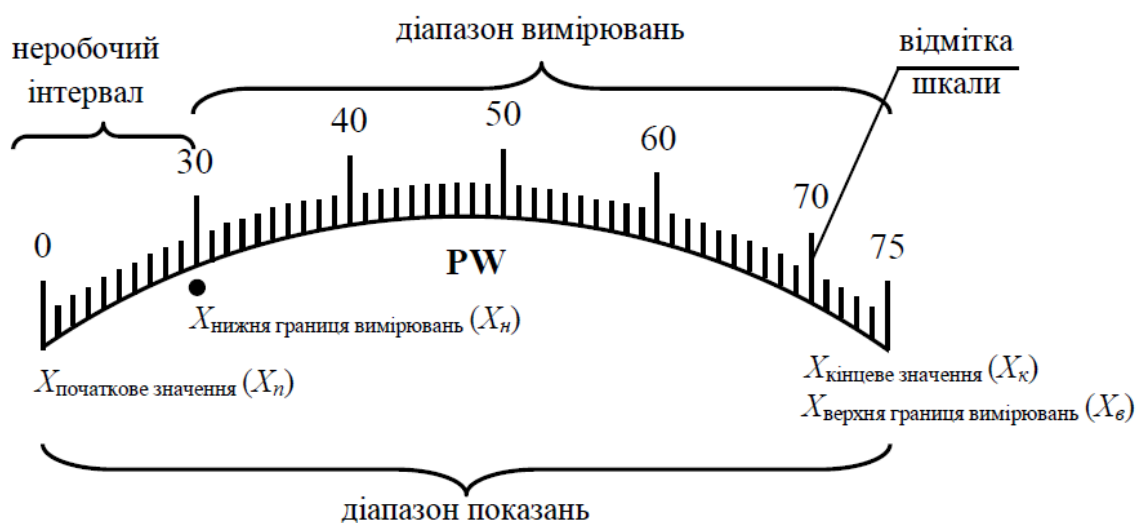


Рис. 1. Щодо пояснення відмінності між діапазонами показань і вимірювань аналогового приладу.

У похибку вимірювання входить похибка засобів вимірювань, які використовуються в експерименті. Допустимі значення основної похибки засобів вимірювання вказують в нормативно-технічній документації на ці засоби і можуть бути також вказані на самих засобах. Характеристикою засобу вимірювань, яка визначає близькість його показів до істинного значення вимірюваної величини, є точність засобу вимірювань. Показником точності є клас точності. **Клас точності засобу вимірювань** – це узагальнена характеристика засобу, яка визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також регламентованими характеристиками, що впливають на його точність. Слід відзначити, що клас точності – це не похибка, а кількісна характеристика, за величиною якої можна оцінити похибку засобу вимірювань.

Для аналогових приладів клас точності γ дорівнює відношенню абсолютної похибки ΔX до нормуючого значення X_N і виражається в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Знаючи клас точності γ , можна визначити абсолютну похибку вимірюваної величини X :

$$\Delta X = \pm \frac{\gamma}{100\%} \cdot X_N , \quad (3)$$

де нормуюче значення X_N приймається рівним:

1. Для засобів вимірювань з рівномірною, практично рівномірною або степеневою шкалою, якщо нульова позначка знаходиться на краю або поза шкалою – кінцевому значенню діапазону вимірювань; якщо нульова позначка знаходиться всередині діапазону вимірювань – арифметичній сумі кінцевих значень діапазону вимірювань.

2. Для засобів вимірювань із встановленим номінальним значенням – цьому номінальному значенню. Наприклад, для частотомірів з діапазоном вимірювання 45–55 Гц і номінальною частотою 50 Гц – $X_N = 50$ Гц.

3. Для вимірювальних приладів з нерівномірною шкалою нормуюче значення встановлюється рівним усій довжині шкали або її частині, яка відповідає діапазону вимірювань. У цьому випадку абсолютну похибку виражають, як і довжину шкали, в одиницях довжини.

Відмітимо, що, як видно з формули (3), для аналогових приладів абсолютне значення інструментальної похибки не залежить від значення виміряної величини X , тобто однакове у всіх точках шкали. У таких приладів клас точності виражається одним числом, вибраним із ряду 1×10^n ; $1,5 \times 10^n$; 2×10^n ; $2,5 \times 10^n$; 4×10^n ; 5×10^n ; 6×10^n , де $n = 1, 0, -1, -2$ і т. д.

Для цифрових приладів, а також багатозначних мір клас точності позначається двома числами, записаними через косу риску, наприклад, 0,02/0,01. У технічній документації таке позначення класу точності дається у вигляді c/d , яке дорівнює 0,02/0,01. Граничні значення основної відносної похибки засобів вимірювання, виражені в

процентах, у цьому випадку можуть бути визначені шляхом обчислень за формулою:

$$\delta = \pm \left(c + d \left(\left| \frac{X_N}{X} \right| \right) - 1 \right) \quad (4)$$

де X_N - кінцеве значення діапазону вимірювань; c і d - додатні числа.

Варіації показів приладу — це найбільша різниця показів приладу при одному і тому ж значенні вимірюваної величини і незмінних зовнішніх умовах. Вона приблизно рівна подвоєній похибці від тертя, так як причиною варіації в основному є тертя в опорах рухомої частини.

Чутливістю вимірювального приладу і вимірювального перетворювача називається похідна від його вихідної величини по вхідній. Чутливістю S аналогового електровимірювального приладу до вимірюваної величини X називається похідна від переміщення покажчика по вимірюваній величині X :

$$S = dl/dX = f(X). \quad (5)$$

Чутливість приладу визначається у певній точці шкали, тобто у загальному випадку вона є функцією X . У приладах з сталою чутливістю переміщення покажчика пропорційне вимірюваній величині, тобто шкала приладу рівномірна.

Чутливість приладу має розмірність, яка залежить від характеру вимірюваної величин, тому, користуючись терміном «чутливість», кажуть: «чутливість приладу до струму», «чутливість приладу до напруги» і т. д. Наприклад, чутливість вольтметра до напруги : 10 под./В.

Величина обернена чутливості, $C = 1/S$ називається **ціною поділки** (сталою) приладу. Вона рівна числу одиниць вимірюваної величини, які припадають на одну поділку шкали. Наприклад, якщо S - 10 под./В, то $C = 0,1$ В/под.

За аналогією характеристикою цифрових вимірювальних приладів є значення одиниці найменшого розряду – це **розмір одного кванта q** цифрового засобу вимірювання, що відповідає різниці між двома сусідніми станами цифрового вихідного значення. Показ для цифрових приладів визначається співвідношенням $X = N_x \cdot q$, де N_x – кількість кроків квантування (квантів) з розміром q , який відповідає одиниці молодшого розряду цифрового приладу. Стала цифрового засобу вимірювання збігається з ціною поділки і дорівнює розміру кроку квантування $C = C_{под} = q$.

Поріг чутливості — зміна вимірюваної величини, яка викликає найменшу зміну показів, яку виявляє спостерігач при нормальному для даного приладу способі відліку.

Споживана потужність – потужність, яку споживає електровимірювальний прилад при включенні його у коло, в якому здійснюється вимірювання. У більшості випадків ця потужність мала з точки зору економії електроенергії. Але при вимірюванні у малопотужних колах споживання приладами потужності може змінити режим роботи кола, що приводить до похибок вимірювань. Тому мале споживання потужності від кола, в якому здійснюється вимірювання, є перевагою приладу.

Швидкодія – число вимірювань (перетворень), які виконуються в одиницю часу. Ця характеристика особливо важлива для цифрових приладів і перетворювачів, а також для самописців і вимірювальних систем, коли одним приладом з допомогою комутуючого пристрою необхідно виміряти декілька величин, які повільно змінюються.

Час установлення показів (час заспокоєння) – це той проміжок часу, який проходить від моменту зміни вимірюваної величини до моменту, коли покажчик займе положення, яке відповідає новому значенню вимірюваної величини. Однак, якщо врахувати, що усім приладам властива деяка похибка, час, який займає переміщення покажчика в межах допустимої похибки приладу, не представляє інтересу. Під часом встановлення показів електровимірювального приладу розуміють інтервал часу, який пройшов з моменту вмикання або зміни у вимірюваної величини до моменту, коли відхилення покажчика від установленого значення не перевищує похибки вимірювань. Час заспокоєння для більшості типів показуючих приладів не перевищує 4 секунди. Для цифрових приладів, які використовуються для автоматичної реєстрації результатів вимірювань або в системах управління, як вказувалось вище, більш широко застосовується параметр «швидкодія» – кількість вимірювань за одиницю часу.

Надійність засобів вимірювань – їх здатність зберігати задані характеристики при певних умовах роботи на протязі заданого часу. Кількісною мірою надійності є імовірність безвідмовної роботи засобів вимірювань у заданих проміжках часу та умовах роботи. Для показників надійності відносяться також середній час безвідмовної роботи засобів вимірювань, який визначається як середньо арифметичний час справної роботи.

Гарантійним терміном називають період часу, протягом якого завод-виготовлювач гарантує справну роботу виробу при збереженні правил експлуатації приладу.

4. Міри електричних величин

Усі засоби вимірювань, у відповідності до їх метрологічних функцій, поділяються на еталони, взірцеві та робочі засоби вимірювань. Місце кожного засобу вимірювання наведено на схемі передавання розмірів одиниць, яка показана на рис. 2.

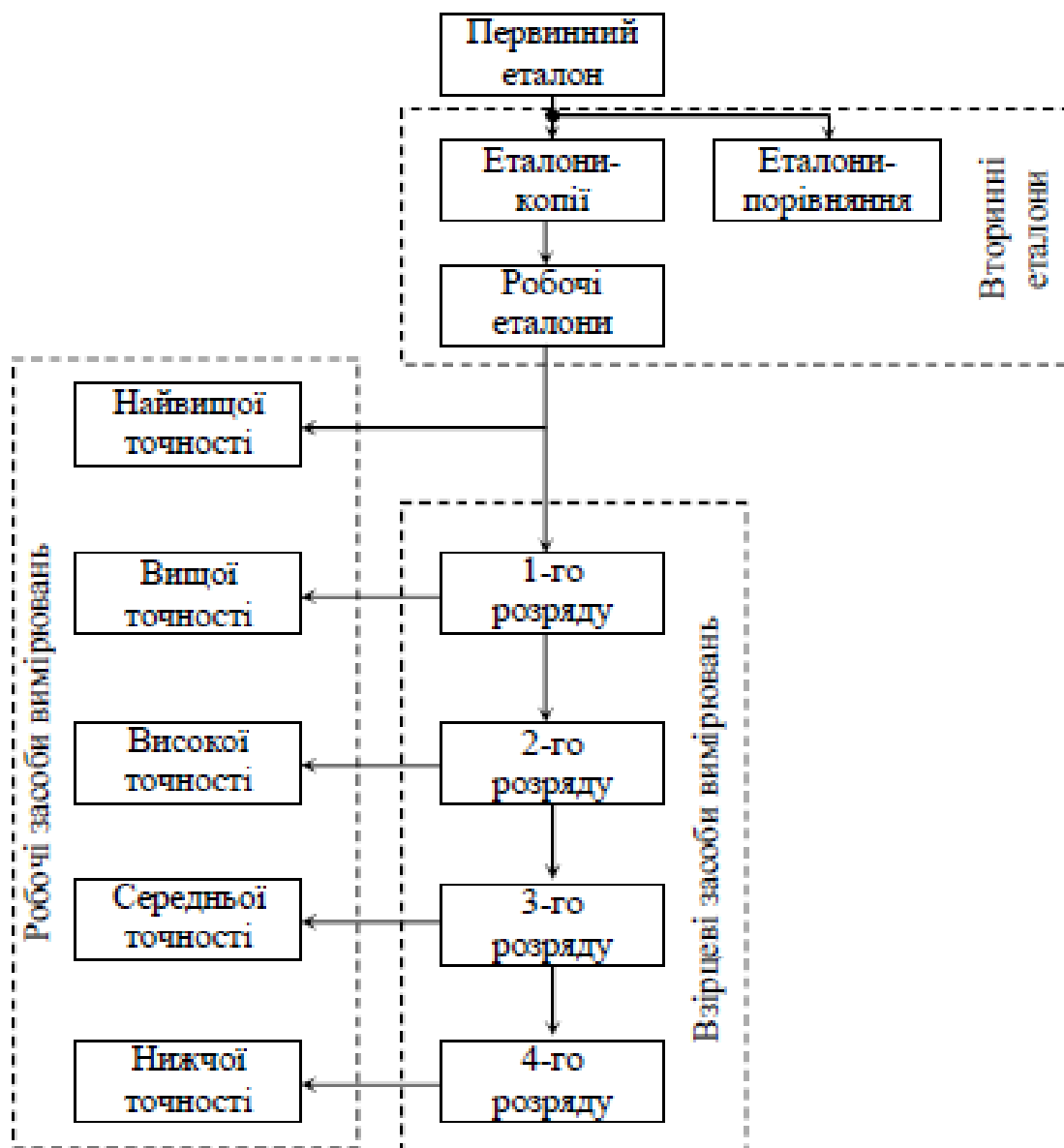


Рис. 2. Схема передачі розміру одиниці фізичної величини.

При виконанні лабораторних робіт використовуються робочі засоби вимірювань найбільше високої точності (оскільки вищої і найвищої точності є значно вартіснішими). У цьому посібнику будуть розглянуті міри електричних величин і загальнозживані електровимірювальні прилади.

Міри електричного опору. Взірцеві та робочі міри електричного опору виконують у вигляді *катушок опору*. Номінальний опір взірцевої катушки повинен задовольняти умові $R = 10^n$ Ом, де n – число, яке приймає значення $-5, -4, \dots 0 \dots 10$.

Катушки опору від 10^{-5} до 10^{-1} Ом виготовляють зі стрічки або пластинок манганіну, а з більшим опором – з манганінового дроту. Манганін – це сплав міді (80–84 %), марганцю (10–13 %), нікелю (1,5–3 %), решта – алюміній і залізо (десяті долі процента). Манганін має малий температурний коефіцієнт опору (10^{-5} K^{-1}), великий питомий опір (0,45 Ом мм²/м), високу стабільність значення опору у часі, малу термо-ЕРС при контакті з міддю (2 мкВ/К), що дозволяє використовувати його в колах з дуже низькою напругою без урахування похибок термо-ЕРС. Взірцевим катушкам опору присвоюють один з наступних класів точності: 0.0005; 0.001; 0.002; 0.005; 0.01; 0.02; 0.05; 0.1 і 0.2. Число, яке визначає клас точності катушки, позначає найбільшу допустиму відносну похибку, виражену в процентах.

Конструктивно взірцеві катушки опору виконані у вигляді коаксіальних металевих циліндрів (рис. 3а). На металевий або фарфоровий каркас 1 біфілярно намотана обмотка 2 з ізолюваної манганінової дротини. Кінці дротини виведені через ізолятори до затискачів 3 і 4, які закріплені на пластмасовій кришці 5. Каркас катушки прикріплюють до корпусу 6, в якому є отвори для кращого охолодження обмотки. Катушка забезпечується чотирма затискачами, два з яких називаються струмовими (затискачі 4) і призначені для вмикання взірцевої катушки в коло струму, два інших називаються потенціальними (затискачі 3). Потенціальні затискачі призначені для вимірювання спаду напруги на опорі катушки. Приклад зовнішнього вигляду міри опору показаний на рис 3 б.

Набори різних катушок опору, змонтовані в одному корпусі, називаються магазинами опорів. Спеціальні перемикачі дозволяють набирати з катушок, які є в магазині, різні значення опорів. У залежності від конструкції перемикаючого пристрою розрізняють

важільні та штепсельні магазини, схеми та приклади зовнішнього вигляду яких приведені на рис. 4 та рис. 5.

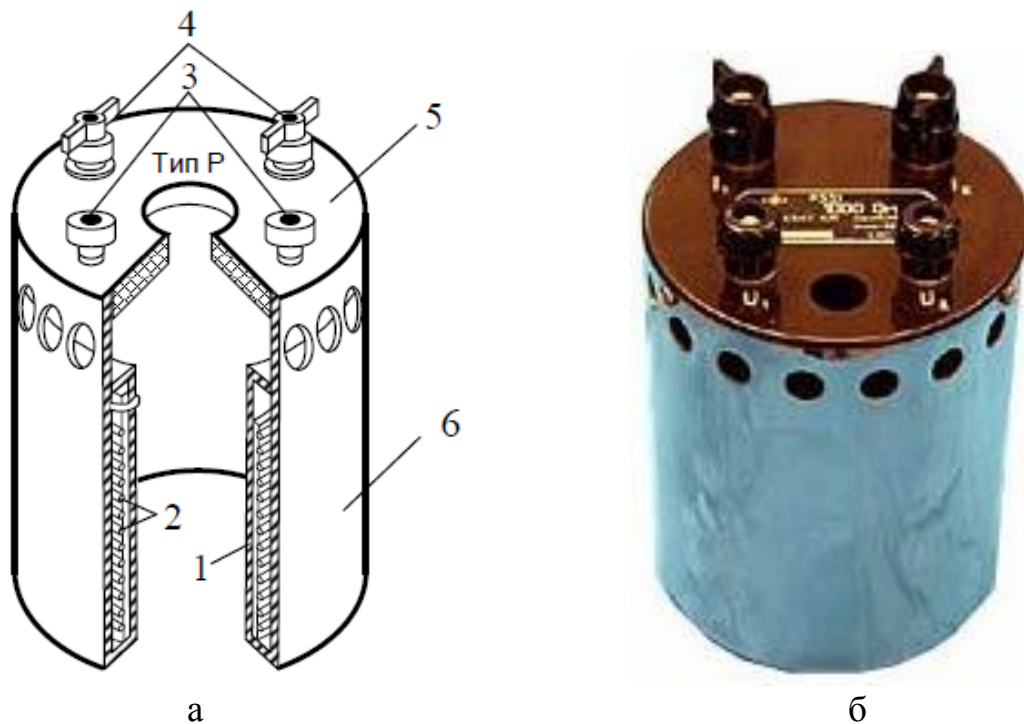


Рис.3. Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) взірцевих котушок опору.

У штепсельному магазині (рис. 4 а) кожену котушку можна замкнути накоротко, вставивши відповідний штепсель. Котушки в штепсельному магазині з'єднуються групами, опори котушок у групі знаходяться у відношенні 1 : 2 : 3 : 4. Кожна наступна група з чотирьох котушок має опір у 10 разів більший, ніж попередня. При такому наборі використовується найменша кількість котушок для одержання заданого опору.

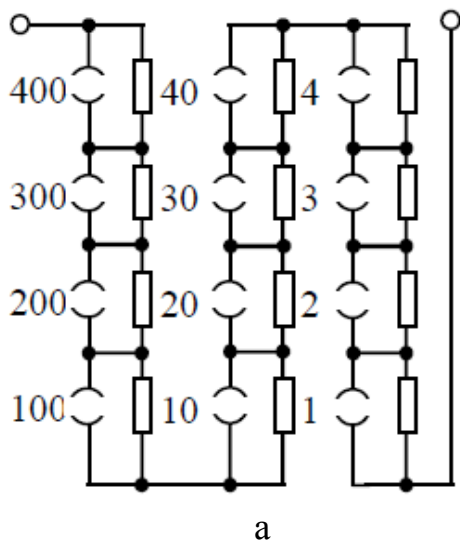


Рис. 4.Схема (а) та зовнішній вигляд (б) штепсельного магазину опорів.

Важільні магазини складаються з набору котушок, з'єднаних з контактами, по яких ковзають щітки, жорстко з'єднані з важелем (рис. 4 а). Значення введеного сумарного опору відраховують безпосередньо за положенням важелів. Важільні магазини виконують здебільшого як декадні. Кожна декада має десять однакових котушок. Котушка наступної декади має опір у 10 разів більший, ніж попередньої. У магазинах з рухомими важелями біля фіксованих положень важелів вказані цифри 0, 1, 2, ..., 9, а біля ручок множники 0,1; 1; 10; 100; ... Це означає, наприклад, що при встановленні ручки з множником 0,1 в положення 3, ручки з множником 10 – в положення 5, а всіх інших ручок в положення 0, увімкнений опір магазину дорівнює $5 \cdot 10 + 3 \cdot 0,1 = 50,3 \text{ Ом}$.

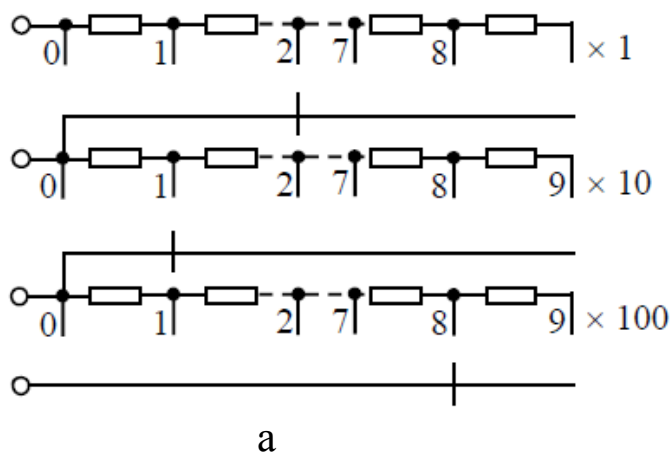


Рис. 5. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) важільного магазину опорів.

Кожний магазин опору має табличку, на якій вказано його клас точності і величину допустимих струмів. У паспортах магазинів опорів, як правило, вказують допустимі похибки магазину, допустимий струм, навантаження у ватах і робочий частотний діапазон.

Міри індуктивності та взаємної індуктивності. Взірцеві і робочі міри індуктивності та взаємоіндукції – це котушки індуктивності та взаємної індуктивності. Котушки повинні зберігати сталість індуктивності з плином часу і мати малий опір, незалежність індуктивності від струму і якомога малу залежність індуктивності від частоти і температури. Взірцева котушка індуктивності (рис. 6 а) – це пластмасовий або фарфоровий каркас з намотаною на нього обмоткою

з мідного ізолюваного дроту, кінці якого закріплені на затискачах. Використання каркасу з немагнітного матеріалу забезпечує незалежність величини індуктивності від струму в котушці. Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів котушки споряджують екранами. Взірцеві котушки взаємної індуктивності відрізняються від котушок індуктивності наявністю двох обмоток, жорстко закріплених на загальному каркасі.

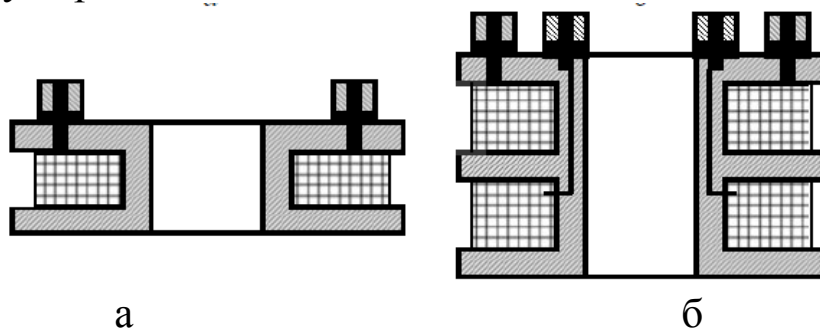


Рис. 6. Будова взірцевих котушок індуктивності (а) та взаємної індуктивності (б).

Міри ємності. *Взірцевими та робочими мірами ємності є конденсатори постійної або змінної ємності. Вони повинні задовольняти таким вимогам: мати малі втрати у діелектрику, слабку залежність від частоти і форми кривої струму, малий температурний коефіцієнт ємності та значний опір ізоляції. У більшій мірі цим вимогам відповідають повітряні конденсатори постійної і змінної ємності, але завдяки малій діелектричній проникності повітря вони є громіздкими. У зв'язку з цим номінальні значення ємності повітряних конденсаторів сталої ємності складають 50 – 4000 пФ, змінної ємності – 15 – 1100 пФ, клас точності 0.05 –...0.005. Допускається їх використання на частотах до 100 Гц у колах з напругою не більше 200 В.*

Вимірювальні конденсатори з твердим діелектриком (частіше всього слюдою) є компактні, стабільні у часі, але характеризуються кутом втрат $(1,2) \cdot 10^{-4}$ рад. Виготовляють міри ємності з номінальним значенням від 1 пФ до 1 мкФ, класів точності від 0.05 до 0.2 і допустимих частотах використання від 40 до 10^5 Гц (у залежності від номіналу міри). Слюдяні конденсатори випускаються у вигляді як окремих мір з сталим значенням ємності, так і магазинів ємностей.

Магазини ємностей складаються з окремих конденсаторів постійної ємності. На відміну від магазинів опорів, де окремі резистори з'єднані послідовно, у магазинах ємностей для одержання сумарної ємності кількох конденсаторів їх з'єднують між собою

паралельно. Штепсельні магазини призначені для ступінчатої зміни великої ємності – від однієї до сотень мікрофарад. Важільні магазини частіше виготовляють тридекадними.

Міри ЕРС. Як взірцеві і робочі міри електрорушійної сили (ЕРС) використовують нормальні елементи. Широкого застосування в лабораторній практиці набув кадмієвий нормальний елемент Вестона, який відрізняється від інших гальванічних елементів тим, що його електрорушійна сила з часом не змінюється. Цей елемент використовують не як джерело струму, а як міру ЕРС при точних вимірюваннях невеликих різниць потенціалів, зокрема компенсаційним методом. Розрізняють нормальні елементи з насиченим і ненасиченим розчином сірчаноокислого кадмію (CdSO_4). В елементах з насиченим розчином ЕРС значно стабільніша, ніж в елементах з ненасиченим розчином. Взаємодіючі речовини, які входять до складу нормального елемента, поміщені в герметично запаяну скляну оболонку. Використовують дві конструкції скляних оболонок насичених нормальних елементів: Н-подібної форми (рис. 1.8.), і циліндричної. Н-подібний скляний корпус елемента Вестона – це дві сполучені посудини, в нижній частині яких впаяно два електроди з молібденового дроту (рис. 1.8). Позитивним електродом служить чиста ртуть 1, яка заповнює нижню частину лівої посудини. Зверху над ртуттю розташований деполяризатор 2 – шар пасти із суміші сульфату ртуті (Hg_2SO_4) (сполука, яка дуже погано розчиняється у воді) і сульфату кадмію (CdSO_4). Негативним електродом 5 служить 12,5%-на амальгама кадмію (в ртуті розчиняється кілька різних металів; такий розчин або сплав металів з ртуттю називають амальгамою), над яким міститься кілька кристаликів сульфату кадмію. Простір над електродами заповнено насиченим водним розчином сульфату кадмію 4. Насичення розчину забезпечується кристалами CdSO_4 3, які містяться над електродами.

На практиці використовують також і ненасичені нормальні елементи Вестона. В них немає кристалів CdSO_4 , тобто використано ненасичений розчин сульфату кадмію у воді. Залежно від концентрації цього розчину ЕРС ненасичених нормальних елементів може мати різне значення в межах від 1,0183 В до 1,0189 В. Точне значення ЕРС ненасиченого нормального елемента наводиться в його паспорті.

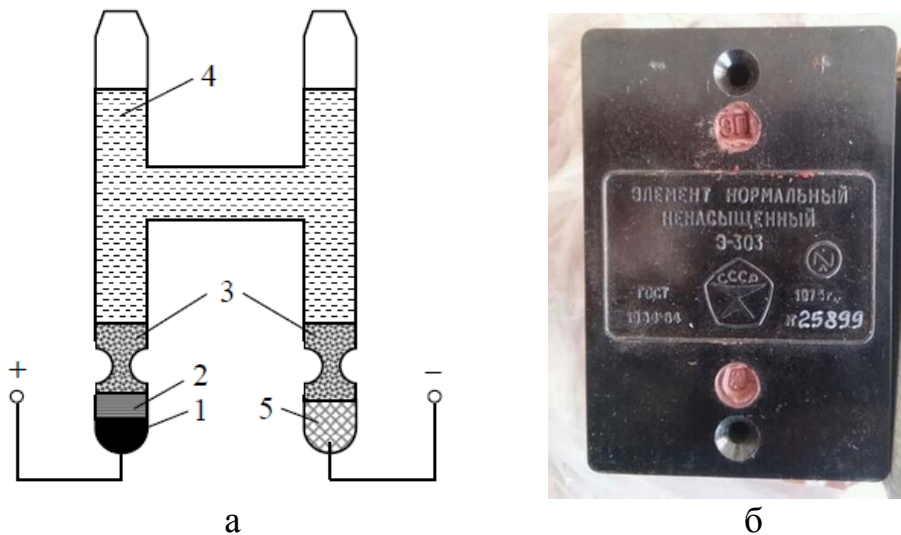


Рис. 7. Структура (а) та зовнішній вигляд (б) нормального елемента.

Сучасними робочими мірами ЕРС є міри, створені на основі кремнієвих стабілітронів – діодів, які працюють в режимі пробою. Вони забезпечують стабілізацію напруги від одиниць до сотень вольт при струмах споживання від міліампер до кількох ампер. При цьому стабільність вихідної напруги не гірша 0,001 %, а температурна стабільність краща, ніж $0,001 \% \text{ K}^{-1}$, що перевищує параметри нормальних елементів.

5. Аналогові електромеханічні вимірювальні прилади

Покази *аналогового* приладу є неперервною функцією вимірюваної величини. У залежності від способу, який використовується для порівняння вимірюваної величини з одиницею вимірювання, аналогові прилади поділяються на прилади безпосередньої оцінки і прилади порівняння, в останніх невідома величина співставляється з мірою, у більшості випадків вмонтованою у самий прилад.

У приладах безпосередньої оцінки, основну групу яких складають електромеханічні прилади прямого перетворення, електромагнітна енергія перетворюється в механічну енергію переміщення рухомої частини. Узагальнена структурна схема такого приладу наведена на рис. 8. Прилад складається з вимірювального кола (*ВК*), вимірювального механізму (*ВМ*) і відлікового пристрою (*ВП*). Вимірювальне коло служить для перетворення вимірюваної величини X в електричну величину Y (струм або напругу), функціонально зв'язану з X , яка безпосередньо діє на *ВМ*.

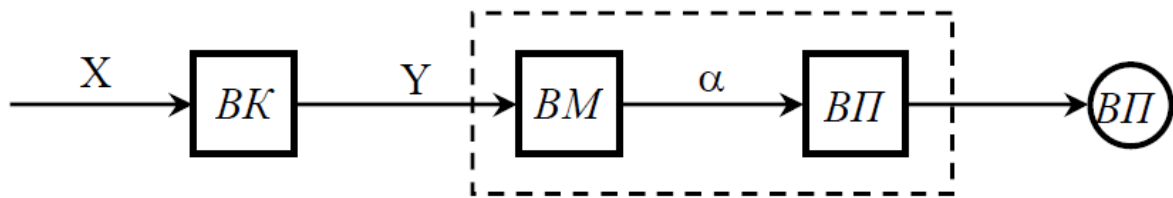


Рис. 8. Структурна схема електромеханічних приладів прямого перетворення.

У *вимірювальному механізмі* відбувається безпосереднє перетворення електромагнітної енергії в механічну, яка необхідна для кутового або лінійного переміщення рухомої частини і зв'язаного з нею покажчика відлікового пристрою. У більшості електромеханічних приладів рухомі частини вимірювальних механізмів здійснюють обертання навколо нерухомої осі і, таким чином, вимірювана величина перетворюється у кутове переміщення. Для компенсації обертального моменту $M_{об}$, створеного електричним струмом, на рухому частину вимірної пристрою повинен також діяти напрямлений назустріч обертальному *протидіючий момент* $M_{пр}$, який залежить від кута повороту рухомої частини: $M_{пр} = f(\alpha)$. Останній створюється за допомогою пружних елементів: спіральних пружинок, розтяжок та підвісів, які при повороті рухомої частини закручуються. При цьому протидійний момент $M_{пр}$ пропорційний куту закручування α :

$$M_{пр} = w \times \alpha, \quad (6)$$

де w – питомий протидійний момент, який залежить від властивостей пружного елемента.

Незалежно від призначення аналогового електровимірювального приладу і від різновидності вимірювального механізму, який використовується у ньому, будь-який прилад містить загальні для усіх аналогових приладів вузли і елементи. Це – *відліковий пристрій, пристрій для створення протидіючого і заспокоюючого моментів, пристрій для встановлення рухомої частини.*

Відлікові пристрої служать для візуального визначення оператором (ОП) числового значення вимірюваної величини. Відліковий пристрій стрілочного приладу складається з стрілки, яка жорстко закріплена з рухомою частиною вимірювального механізму, і циферблату з нанесеною на його лицевий бік шкалою. *Шкала приладу* – це пластинка з нанесеними на неї поділками, які відповідають певним значенням вимірювальної величини. Відстань між двома сусідніми поділками називають *поділкою шкали*. *Ціна поділки* – це зміна

вимірювальної речовини, яка викликає переміщення покажчика на одну поділку. Першу і останню поділки називають початковою і кінцевою. У вимірювальних приладах використовують легкі металеві стрілки з сплавів алюмінію. Кінець стрілки може мати списоподібну форму або вигляд ножа. Остання використовується у приладах з дзеркальним відліком. У відлікових пристроях високочутливих приладів використовується світловий покажчик, в якому кут повороту рухомої частини вимірювального механізму фіксується за зміною положення відбитого променя світла від прикріпленого до рухомої частини дзеркальця.

У залежності від конструктивних принципів, тобто від того, яке фізичне явище покладено в основу створення обертального моменту, або, іншими словами, від способу перетворення електромагнітної енергії, яку підводять до приладу, тобто в механічну енергію переміщення рухомої частини, електромеханічні прилади поділяються на такі основні системи:

1) магнітоелектричну, засновану на взаємодії рамки зі струмом з полем постійних магнітів;

2) електромагнітну, засновану на взаємодії феромагнітного осердя з магнітним полем нерухомої котушки, по якій протікає струм;

3) електродинамічну, в якій використовуються сили взаємодії між рухомою і нерухомою котушками зі струмом;

4) феродинамічну, робота якої базується на взаємодії рамки з струмом з полем електромагніту;

5) електростатичну, в якій використовується сила взаємодії між рухомим і нерухомим електродами при прикладанні до них різниці потенціалів;

б) індукційну, робота якої заснована на взаємодії змінних магнітних полів, які створюються нерухомими котушками, з струмами, індукованими цими полями у рухомій частині вимірювального механізму.

В цьому посібнику розглянуті тільки електромеханічні конструкції найбільш вживаних систем – магнітоелектричної, електромагнітної та електродинамічної.

Магнітоелектричні вимірювальні механізми. Обертальний момент у вимірювальному механізмі магнітоелектричних приладів виникає в результаті взаємодії магнітного поля постійного магніту і магнітного поля котушки з струмом.

Будову магнітоелектричного вимірювального механізму ілюструє рис. 9. Рухомою частиною є котушка 2, яка складається із легкого прямокутного алюмінієвого каркасу, на якому намотано обмотку з мідного або алюмінієвого ізольованого дроту ($d = 0,02-0,2$ мм). Котушка закріплена на кернях і розташована у вузькому проміжку 5 між магнітопроводом 3 з полюсними наконечниками і осердям 4. Магнітне поле створюється постійним магнітом 1: силові лінії магнітного поля, замикаючись через полюсні наконечники і осердя, проходять у повітряному проміжку 5 у радіальному напрямку, створюючи у проміжку радіально напрямлене поле. Постійний магніт виготовляють з високоякісних нікель-алюміній-кобальтових сталей з великою питомою магнітною енергією, що дозволяє отримати у проміжку магнітну індукцію 0,2–0,3 Тл. Інші частини магнітопроводу виготовляються з магнітом'яких сталей

Вимірюваний струм підводиться до рамки 2 через дві пружинки, виготовлені із фосфористої бронзи (немагнітний матеріал), які водночас служать для створення протидіючого моменту M_{np} і які повертають стрілку 7 у нульове положення за відсутності струму в рамці. На осі 8 рамки жорстко закріплена стрілка, яка переміщується над шкалою. Для зрівноваження рухомої частини служать тягарці 6. Цифрою 9 позначений коректор.

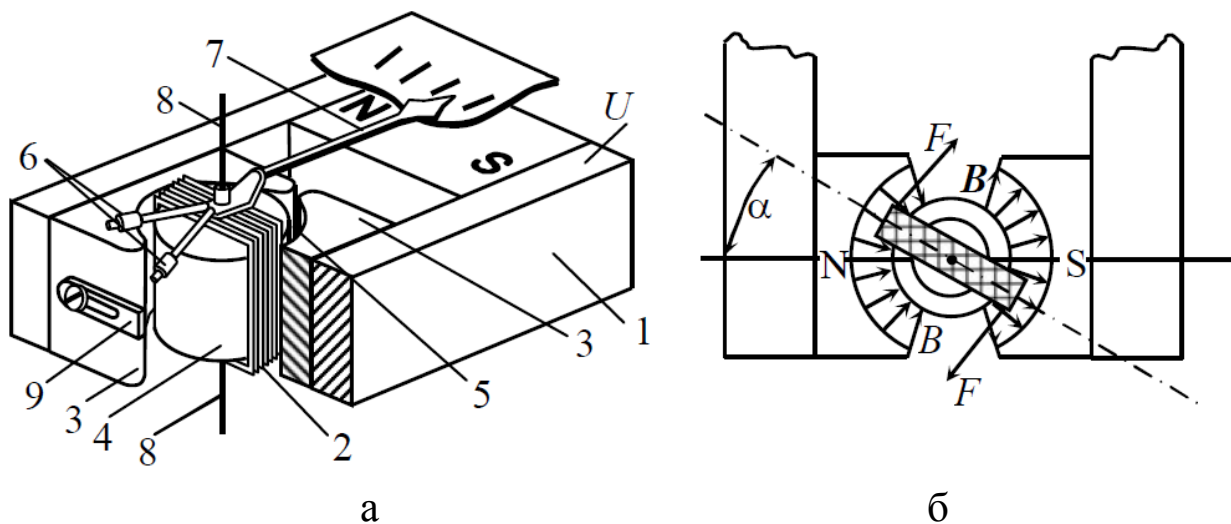


Рис.9. Магнітоелектричний вимірний механізм (а) та рухома котушка в радіальному магнітному полі (б).

Обертальний момент, що діє на рамку з струмом у магнітному полі

$$M_{об} = B \cdot S \cdot n \cdot I, \quad (7)$$

де B – індукція магнітного поля, S – площа, n – кількість витків котушки, I – струм у колі. Оскільки протидіючий момент створюється пружинками, то можна скористатися формулою (6) і для режиму встановленого відхилення написати:

$$B \cdot S \cdot n \cdot I = w \alpha. \quad (8)$$

Звідси

$$\alpha = \frac{BISn}{w} \quad (9)$$

Останній вираз є *рівнянням шкали* приладів магнітоелектричної системи, тобто залежністю кута повороту рухомої частини приладу від вимірюваної величини струму I .

Із виразу (9) видно, що відхилення рухомої частини зростає лінійно із збільшенням струму у рамці. Отже, *шкала* приладів магнітоелектричної системи *лінійна (рівномірна)*. У магнітоелектричному вимірювальному механізмі використовується заспокоювач магнітоіндукційного типу. Спеціального пристрою для цього не потрібно, оскільки при русі рухомої частини змінюється магнітний потік, який пронизує каркас (рис. 8), і у ньому наводиться ЕРС. Ця ЕРС викликає появу в каркасі струм I_c , взаємодія якого з полем магніту створює гальмівну силу, яка забезпечує швидке заспокоєння.

Перевагами магнітоелектричних вимірювальних механізмів є: висока чутливість (*ВМ* має значне власне магнітне поле, тому навіть при малих струмах створюється достатній обертальний момент); велика точність (найвищий клас точності 0,05); мала власна споживана потужність; малий вплив зовнішніх магнітних полів завдяки сильному власному магнітному полю; пряма пропорційність між струмом в обмотці рамки і кутом відхилення (тобто рівномірність шкали); швидке заспокоєння.

Недоліками магнітоелектричних вимірювальних механізмів є: складність конструкції, висока вартість, чутливість до перевантажень, зумовлена перегрівом пружини і зміною її пружних властивостей, температурні впливи на точність вимірювання, придатність для вимірювання тільки у колах постійного струму.

На базі вимірювальних механізмів цієї системи з використанням шунтів і додаткових опорів випускаються амперметри та вольтметри постійного струму з межами вимірювань від одиниць ампер до кілоампер і від долей мілівольта до кіловольт, гальванометри

постійного струму, які використовують як нуль-індикатори, а також для вимірювання малих струмів і напруг, осцилографічні гальванометри світлочутливих осцилографів, омметри, прилади для вимірювання магнітних і неелектричних величин.

На базі вимірювальних механізмів магнітоелектричної системи виготовляють *гальванометри* – прилади з неградуєваною шкалою, які мають високу чутливість до струму і напруги. Гальванометри широко використовують як нуль-індикатори, а також для вимірювання малих струмів, напруг і кількості електрики. Гальванометри, які призначені для вимірювання кількості електрики та імпульсу струму і які відрізняються малим моментом інерції, називають *балістичними*. Висока чутливість гальванометрів досягається головним чином завдяки зменшенню протидіючого моменту і використанню світлового покажчика з великою відстанню між дзеркалом і шкалою Зменшення маси рухомої частини і використання для її кріплення розтяжок або підвісів сприяє збільшенню чутливості вимірювального механізму, яка досягає значення порядку 10^{-10} А/под.

Гальванометри бувають переносні і стаціонарні. Переносні гальванометри мають вбудовану шкалу. У стаціонарних гальванометрів шкалу встановлюють на деякій відстані від приладу. Чутливість стаціонарного гальванометра залежить від відстані між дзеркальцем гальванометра і шкалою. Прийнято виражати чутливість і сталу стаціонарного гальванометра для відстані, рівній 1 м, наприклад, $C_1 = 1,2 \cdot 10^{-6}$ А·м/мм. Для переносних гальванометрів вказують сталу гальванометра або ціну поділки, наприклад, 1 поділка – $0,5 \cdot 10^{-6}$ А. У переносних магнітоелектричних гальванометрах рухома частина підвішується на розтяжках, а в стаціонарних – на підвісі. Зазвичай гальванометр має коректор для встановлення нульового положення покажчика. Гальванометри з рухомою частиною на підвісі забезпечені аретиром для фіксації рухомої частини, наприклад, при перенесенні приладу.

Електромагнітні вимірювальні механізми. Обертальний момент в електромагнітних вимірювальних механізмах виникає у результаті взаємодії магнітного поля, створеного нерухомою котушкою, в обмотці якої протікає вимірюваний струм, з одним або декількома феромагнітними осерддями, ексцентрично закріпленими на осі. Найбільш поширеними є механізми з плоскою котушкою, з круглою котушкою і замкнутим магнітопроводом.

На рис. 10 показано вимірювальний механізм з плоскою котушкою. Нерухома котушка 1, намотана мідним проводом, має вузьку прямокутну щілину, в яку втягується ексцентрично закріплене на осі 2 дископодібне осердя 3. Матеріал осердя повинен мати високу магнітну проникність, що сприяє збільшенню оберտального моменту при заданій величині споживаної потужності приладом, і мінімальне значення коерцитивної сили для зменшення похибки від гістерезису. Здебільшого матеріалом осердя у щитових приладах служить електротехнічна сталь, а у точних переносних приладах – пермалой.

За наявності струму в котушці осердя намагається розташуватися в положенні з найбільшою напруженістю поля, тобто втягується в щілину котушки. При цьому закручуються пружинки 4, внаслідок чого виникає протидіючий момент. Для заспокоєння руху рухомої частини в електромагнітних вимірювальних механізмах використовують як повітряні, так і магнітоіндукційні заспокоювачі.

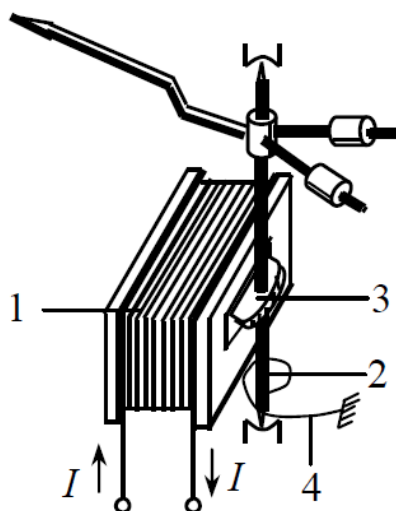


Рис. 10. Електромагнітний вимірювальний механізм з плоскою котушкою.

При протіканні постійного струму в котушці виникає обертальний момент, що описується виразом:

$$M_{об} = \frac{dW_{EM}}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{LI^2}{2} \right) = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha}, \quad (10)$$

де L – індуктивність котушки, I – струм в обмотці котушки.

Якщо протидіючий ний момент створюється за допомогою пружних елементів (пружин або розтяжок), то для режиму усталеного відхилення електромагнітного приладу на постійному струмі можна записати:

$$\frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} = w\alpha, \quad (11)$$

звідси можна отримати вираз для кута відхилення рухомої частини:

$$\alpha = \frac{I^2}{2w} \cdot \frac{dL}{d\alpha}, \quad (12)$$

Очевидно, що напрямок відхилення покажчика не залежить від полярності увімкнення протікання вимірюваної величини струму, оскільки струм входить у цей вираз у другій степені.

Якщо в обмотці котушки протікає змінний струм $I = I_0 \sin \omega t$, то миттєвий обертальний момент визначається за виразом:

$$M_{об}(t) = \frac{I_0^2}{4} \cdot \frac{dL}{d\alpha} (1 - \cos 2\omega t), \quad (13)$$

Як видно із виразу (13), обертальний момент має постійну і гармонічну складові. Відхилення рухомої частини електромагнітного вимірювального механізму при роботі його в колі змінного струму промислової і більш високої частоти визначається постійною складовою моменту, яка може бути записана у такому вигляді:

$$\langle M_{об} \rangle = \frac{I_{эф}^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha}, \quad (14)$$

де $I_{эф}$ – ефективне (діюче) значення струму в обмотці котушки.

Із виразу (14) випливає наступне:

1. Знак кута відхилення рухомої частини не залежить від напрямку струму в обмотці. Це означає, що прилади електромагнітної системи можуть бути використані для вимірювання як у колах постійного, так і змінного струмів (приблизно до 10 кГц). У колах змінного струму вони вимірюють дійсні значення струму (або напруги).

2. Шкала приладів електромагнітної системи нерівномірна, тобто між вимірюваною величиною (струмом, напругою) і кутом відхилення немає лінійної залежності. Характер шкали залежить від множника $dL/d\alpha$, тобто від закону зміни індуктивності із зміною кута повороту сердечника і від квадрату струму в котушці. Вибором форми осердя та його розташуванням відносно котушки, можна отримати практично рівномірну шкалу, починаючи з 20–25% верхньої межі вимірюваної величини.

Покази електромагнітних вимірювальних приладів для постійного струму різняться при наростаючих та спадаючих значеннях струму. Ця різниця зумовлена втратами на гістерезис і у приладів, механізми яких мають осердя з електротехнічної сталі, складає 2–3% від вимірюваної величини. У приладів з механізмами, які мають осердя із пермалоя, цією різницею можна нехтувати.

При роботі електромагнітних механізмів на змінному струмі в оточуючих металевих частинах і осерді виникають вихрові струми, які розмагнічують осердя. В результаті цього покази для змінного струму дещо менші, ніж для постійного. Вказана різниця збільшується із зростанням частоти, однак, на частоті $f = 50$ Гц вона досить мала.

Магнітне поле в електромагнітних механізмах без магнітопроводів, яке замикається через повітря, невелике. Тому зовнішнє магнітне поле істотно впливає на покази приладів з такими механізмами. Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів використовують екранування конструкції.

Недоліками електромагнітних механізмів є: нерівномірна шкала, вплив зовнішніх магнітних полів на механізми без магнітопроводу, велика власна споживана потужність, мала точність і низька чутливість.

Переваги електромагнітних механізмів: придатність для роботи у колах з постійним і змінним струмами, стійкість до перевантажень, простота конструкції і, як наслідок, дешевизна і надійність у роботі. Завдяки відміченим перевагам електромагнітні механізми використовують у щитових амперметрах і вольтметрах класу 1.0 і більш низьких класів та переносних приладів з кількома діапазонами класу точності 0,5.

Електродинамічні та феродинамічні вимірювальні механізми.

Обертальний момент в електродинамічних і феродинамічних вимірювальних механізмах виникає в результаті взаємодії магнітних полів нерухомої і рухомої котушок із струмами. Електродинамічний вимірювальний механізм (рис. 11) має дві послідовно з'єднані нерухомі котушки 1, розділені повітряним проміжком і рухоми котушку 2. Рухома котушка закріплена на осі або розтяжках, може повертатись всередині нерухомих. Струм до рухомої котушки підводиться через пружинки 3, які водночас служать для створення протидіючого моменту.

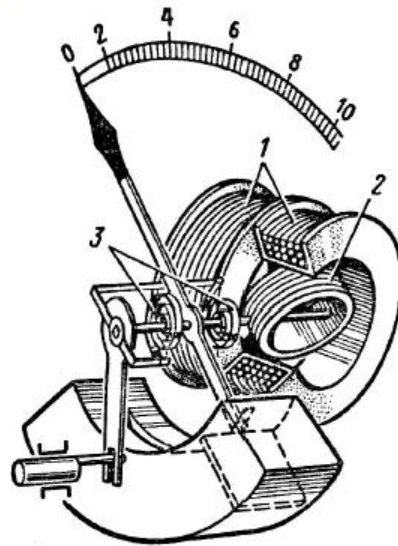


Рис. 11. Вимірювальний механізм приладів електродинамічної системи.

При протіканні в обмотках котушок струмів I_1 і I_2 виникають електромагнітні сили, які стараються так повернути рухому частину, щоб магнітні моменти рухомої і нерухомої котушок співпадали. Нерухомі та рухома котушки механізму (здебільшого безкаркасні) мають круглу або прямокутну форму і виготовляють їх з мідного або алюмінієвого проводу.

Енергія магнітного поля W_{EM} двох котушок з струмами I_1 і I_2 :

$$W_{EM} = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + L_{12} I_1 I_2, \quad (15)$$

де L_1 і L_2 – індуктивності котушок, $L_{1,2}$ – взаємодуктивність нерухомих і рухомої котушок. Оскільки індуктивності L_1 і L_2 не залежать від кута повороту рухомої частини, то обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_{EM}}{d\alpha} = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dL_{12}}{d\alpha}. \quad (16)$$

При протіканні по котушках змінних струмів $I_1 = I_{01} \sin \omega t$ та $I_2 = I_{02} \sin(\omega t + \varphi)$ миттєвий обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_{EM}}{d\alpha} = \frac{1}{2} I_{01} \cdot I_{02} \cdot \frac{dL_{12}}{d\alpha} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]. \quad (17)$$

Як видно, обертальний момент має постійну і гармонічну складові. Відхилення рухомої частини механізму при роботі його в колі змінного струму промислової і більш високої частот визначається постійною складовою моменту

$$\langle M_{об} \rangle = I_{1ef} \cdot I_{2ef} \cdot \frac{dL_{12}}{d\alpha} \cos\varphi. \quad (18)$$

де I_{1ef} і I_{2ef} – діючі (ефективні) значення струмів, φ – кут зсуву фаз між струмами у котушках.

Якщо протидіючий момент створюється пружними елементами, то при постійних струмах I_1 і I_2 кут відхилення рухомої частини:

$$\alpha = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dL_{12}}{w \cdot d\alpha}. \quad (19)$$

При змінних струмах:

$$\alpha = I_{1ef} \cdot I_{2ef} \cdot \frac{dL_{12}}{w \cdot d\alpha} \cos\varphi. \quad (20)$$

З останнього виразу випливає, що відхилення стрілки приладів електродинамічної системи пропорційне добутку струмів у його обмотках і куту зсуву фаз між ними. Ця особливість дозволяє створювати на основі електродинамічних приладів не тільки амперметри і вольтметри, але і засоби вимірювань інших фізичних величин.





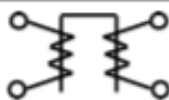






Основними перевагами приладів електродинамічної системи є: можливість їх використання як у колах постійного струму, так і в колах змінного струму до частот порядку 10 кГц, висока точність і стабільність показів, можливість вимірювати споживану електричну потужність.





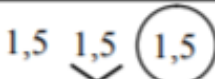


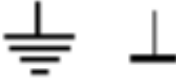

До недоліків слід віднести: сильний вплив зовнішніх магнітних полів на покази приладів, невисока чутливість, велика власна споживана потужність, чутливість до перевантажень по струму, складність конструкції.

Феродинамічний вимірювальний механізм відрізняється від електродинамічного механізму тим, що його нерухомі котушки мають магнітопровід із магнітом'якого матеріалу, який дозволяє істотно збільшувати магнітний потік, а отже, і обертальний момент.

На шкалі кожного електровимірювального приладу вказані його система, клас точності, внутрішній опір, категорія захищеності від впливу зовнішніх магнітних і електричних полів, робоче положення приладу, тип струму тощо (табл. 1).

Таблиця 1. Умовні позначення, які наносяться на аналогові електромеханічні вимірювальні прилади

Назва	Умовні позначення
Прилад магнітоелектричний з рухомою рамкою	
Прилад магнітоелектричний з випрямлячем	
Логометр магнітоелектричний	
Прилад електромагнітний	
Логометр електромагнітний	
Прилад електродинамічний	
Логометр електродинамічний	
Прилад феродинамічний	
Логометр феродинамічний	
Прилад індукційний	
Прилад електростатичний	
Струм постійний	—
Струм змінний (однофазний)	~
Струм постійний і змінний	—~

Струм трифазний змінний	
Робоче положення приладу горизонтальне	
Робоче положення приладу вертикальне	
Робоче положення приладу під певним кутом до горизонту (наприклад, 60°)	
Клас точності приладу, наприклад, 1,5	
Вимірювальне коло ізольоване від корпусу і випробуване напругою (наприклад, у 2 кВ)	
Спільний затискач (для багатомежних і комбінованих приладів)	
Затискач для заземлення	
Коректор	

Для розширення діапазону вимірювання струму і напруги вимірними механізмами використовують **шунти** і **додаткові опори**.

Шунт – це резистор, який вмикають паралельно до вимірювального механізму ($ВМ$) (рис. 12, а). Шунт має чотири затискачі. Два вхідні затискачі, до яких підводиться струм I , називаються струмовими, а два вихідні затискачі, з яких знімається напруга U , називаються потенціальними. До потенціальних затискачів приєднують вимірювальний механізм. Шунт характеризується номінальним значенням вхідного струму $I_{ном}$ і номінальним значенням вихідної напруги $U_{ном}$. Їх відношення визначає номінальний опір шунта $R_{ш,ном} = U_{ном}/I_{ном}$. Шунт також можна розглядати як дільник струму з коефіцієнтом шунтування (ділення)

$$n = I/I_{BM} = (R_{ш,ном} + R_{BM})/R_{ш,ном}, \quad (21)$$

де I_{BM} – струм у вимірювальному механізмі; R_{BM} – опір вимірювального механізму.

Шунти мають малий опір і використовуються головним чином у колах постійного струму з магнітоелектричними вимірювальними механізмами. Використовувати шунти з вимірювальними механізмами інших систем нераціонально, так як ці вимірювальні механізми

споживають велику потужність, що приводить до істотного зменшення опору шунта і, як наслідок, до збільшення їх габаритів та витрати потужності. Якщо необхідно розширити межі вимірювання в n разів, тобто щоб струм I_{BM} був в n разів менший за струм I , то опір шунта повинен бути рівним:

$$R_{ш} = R_{BM}/(n - 1). \quad (22)$$

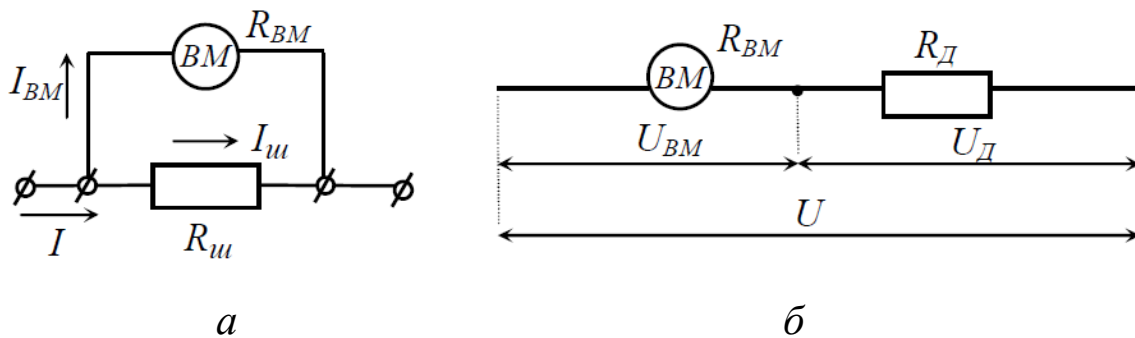


Рис. 12. Схеми ввімкнення шунта (а) і додаткового опору (б).

Шунти на порівняно малі струми (до 1 А) виготовляють із манганіну у вигляді спіралей або котушок і розміщують у корпусі вимірювального приладу (внутрішні шунти). На більші струми (до 7500 А) використовують зовнішні шунти у вигляді пластин або стержнів, запаяних у латунні або мідні наконечники. Шунти можуть бути багатомезними тобто складатися із декількох резисторів, або мати декілька відводів, що дозволяє змінювати коефіцієнт шунтування.

Шунти, які випускаються серійно, мають класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Число класу точності означає допустиме відхилення опору шунта в процентах від його номінального значення.

$$R_{ш} = \frac{I_{BMH} \cdot R_{BM}}{I_H - I_{BMH}} = \frac{U_H}{I_H - I_{BMH}}, \quad (23)$$

де I_{BMH} номінальний струм вимірювального приладу, U_H – номінальний спад напруги на вимірювальному приладі. Найбільш поширені так звані взаємозамінні шунти, спад напруги на яких при номінальному струмові складає 45 або 75 мВ. Таким чином, шунти є перетворювачами струму в напругу.

Додаткові резистори. Додаткові резистори є вимірювальними перетворювачами напруги у струм. Додатковий резистор приєднується послідовно котушки вимірювального механізму (рис. 12 б),

обертальний момент якого залежить від струму, служить для розширення меж вимірювання напруги аналоговими вольтметрами різних систем (крім електростатичної і електронної). Додаткові резистори, які називають додатковими опорами, також служать для розширення меж вимірювання напруги інших приладів, які мають паралельні кола, що приєднуються до джерела напруги. Сюди відносяться, наприклад, ватметри, лічильники енергії, фазометри і т. п.

Струм у колі вимірювального механізму ІВМ, який має опір R_{BM} і увімкнений послідовно з додатковим резистором R_D , дорівнює:

$$I_{BM} = U / (R_{BM} + R_D), \quad (24)$$

де U – вимірювана напруга.

Якщо з допомогою додаткового резистора необхідно розширити в n разів межі вимірювання вольтметра, який має номінальну межу вимірювання U_H і опір R_{BM} , то, приймаючи сталість струму вольтметра I_{BM} , можна записати:

$$U_H / R_{BM} = n U_H / (R_{BM} + R_D). \quad (25)$$

Тоді

$$R_D = R_{BM}(n - 1). \quad (26)$$

Додаткові резистори виготовляють із манганінового ізолюваного дроту, намотаного на пластини або каркаси з ізоляційного матеріалу. Найбільш поширені додаткові резистори для використання в колах постійного струму на номінальні напруги 100–3000 В при номінальних струмах 3,0; 5,0; 7,5 мА, які мають класи точності від 0,05 до 0,5.

Додаткові резистори бувають внутрішні, які монтують у корпус приладу, і зовнішні. Додаткові резистори, які призначені для роботи на змінному струмі, мають біфілярну намотку для отримання безреактивного опору.

2. Методика проведення експерименту

Проградувати прилад – означає встановити відповідність між поділками його шкали і значеннями вимірюваної фізичної величини. Результати градування зображають у вигляді графіка, що зв'язує відлік за шкалою приладу із значеннями вимірюваної величини. За кривою градування можна знайти ціну поділки шкали. Якщо результатом градування є пряма лінія, то ціна поділки шкали є величина стала і в цьому випадку вона чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу прямої до осі абсцис.

Існують два способи градуювання амперметра. Перший спосіб полягає у з'єднанні досліджуваного амперметра A_D послідовно з взірцевим амперметром A_B більш вищого класу точності, ніж досліджуваний, і порівнянні показів обох амперметрів. Точність взірцевого приладу повинна перевищувати точність досліджуваного не менше, ніж у два рази.

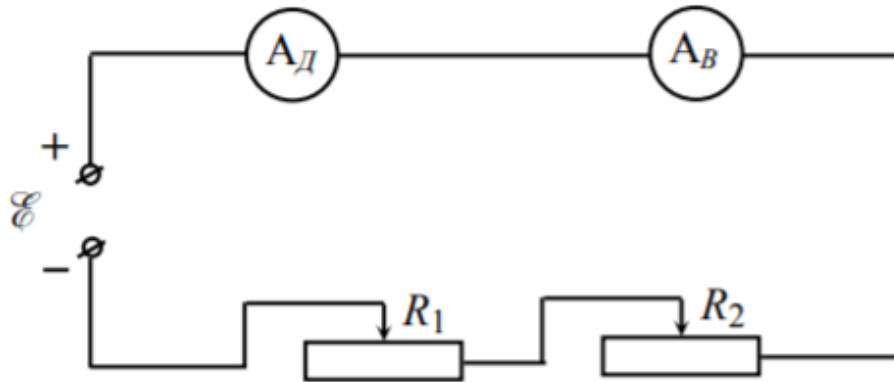


Рис. 13. Схема увімкнення приладів для градуювання амперметра.

Схема з'єднання приладів для градуювання амперметра магнітоелектричної системи цим способом наведена на рис. 13. Вимірювальне коло складається із послідовно з'єднаних досліджуваного амперметра A_D , взірцевого амперметра A_B і двох дротяних реостатів R_1 і R_2 із співвідношенням опорів $R_1/R_2 \sim 10$. Реостати забезпечують грубе (R_1) і плавне (R_2) регулювання сили струму в досліджуваному колі.

Зазначимо, що внутрішній опір взірцевого амперметра повинен бути порівняним з внутрішнім опором досліджуваного амперметра і значно меншим від опору реостатів R_1 та R_2 .

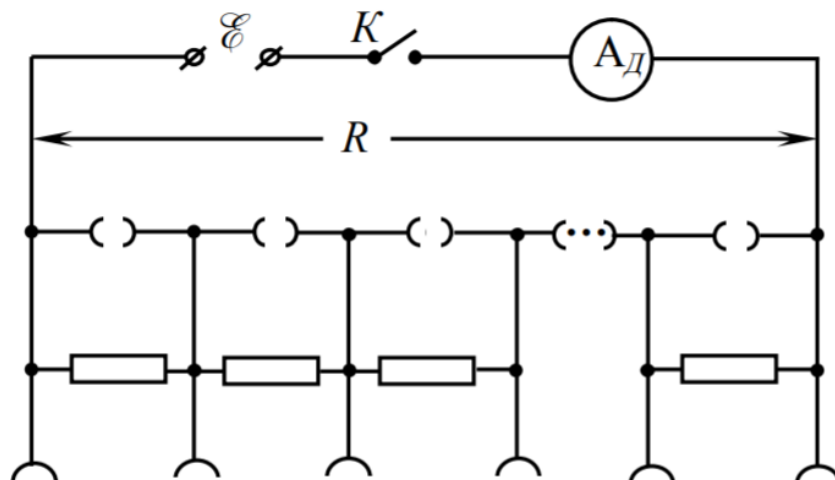


Рис. 14. Електрична схема для градуювання амперметра з використанням магазину опорів.

За другим способом градування через досліджуваний амперметр пропускають струм, сила якого відома, і співставляють покази амперметра із значеннями розрахованої сили струму. У цьому випадку амперметр вмикають в електричне коло з відомими опором і ЕРС джерела струму (рис. 14). Силу струму в колі обчислюють за законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}, \quad (27)$$

де \mathcal{E} – ЕРС джерела; R – опір магазину опорів; R_A – внутрішній опір досліджуваного амперметра, який вказано безпосередньо на приладі. При цьому внутрішній опір джерела струму повинен бути нехтовно малим у порівнянні з R_A . Покази амперметра порівнюють з обчисленими значеннями сили струму і будують відповідний графік. Чим більший опір магазину, тим на менші значення струму можна проградувати амперметр.

Для градування вольтметра необхідно подавати на його вхід відомі напруги і порівнювати їх з показами приладу. Перевірка значень цих напруг може бути здійснена або шляхом паралельного з'єднання досліджуваного вольтметра V_D із взірцевим (еталонним) вольтметром вищого класу точності V_{B3} , або шляхом одержання змінних, але завжди відомих значень напруги з подільника напруги, з'єданого з джерелом, ЕРС якого відома. У першому випадку користуються електричною схемою, зображеною на рис. 15. Взірцевий вольтметр повинен мати клас точності не гірший 0,05. Плавне регулювання напруги під час вимірювань досягається завдяки використанню двох реостатів R_1 і R_2 . Обидва реостати з'єдані послідовно і разом вони складають потенціометр. Співвідношення опорів реостатів повинно бути $R_1/R_2 = 10$. Реостат R_1 може мати опір 600–800 Ом, а опір реостата $R_2 = 60–80$ Ом. Робочий струм реостатів повинен бути не менше 0,3 А.

Електрична схема кола для градування вольтметра другим способом зображена на рис. 16. Тут через R позначено подільник напруги, що є магазином опорів; \mathcal{E} – джерело постійного струму з відомою ЕРС. Як видно з рис. 16, на ділянці подільника а б, паралельно якій увімкнутий вольтметр, падіння напруги становить деяку частину ЕРС батареї, замкненої на подільник.

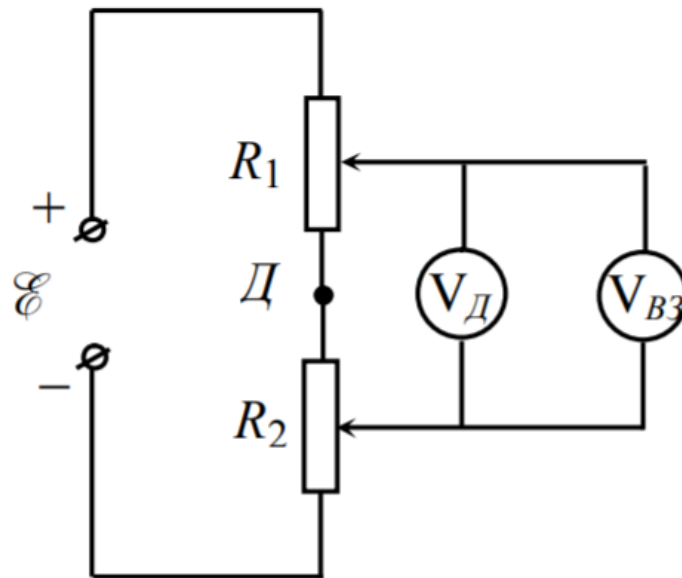


Рис. 15. Електрична схема для перевірки вольтметра.

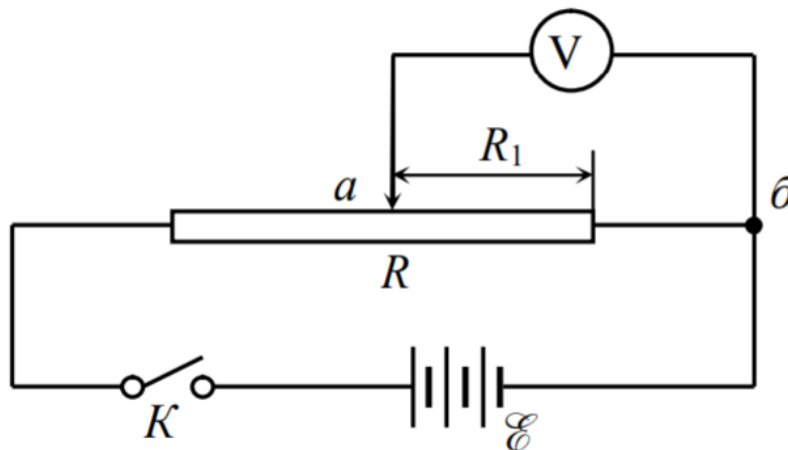


Рис. 16. Електрична схема вмикання приладів для градування вольтметра.

Для градування вольтметра потрібно знати, яка частина ЕРС подається на вольтметр. Оскільки внутрішній опір навіть низьковольтних вольтметрів R_V складає сотні Ом, то через нього протікає малий струм, і вольтметр не може істотно змінити опір ділянки кола. Тоді за законом Ома спад напруги на цій ділянці:

$$U = I \times R_1. \quad (28)$$

Силу струму I визначають із закону Ома для повного кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (29)$$

нехтуючи при цьому величиною внутрішнього опору джерела струму, який є дуже малим порівняно з R . Отже, на вольтметр подається напруга:

$$U = \mathcal{E} \frac{R_1}{R}. \quad (30)$$

У випадку, коли опір вольтметра R_V порівняний з опором R_1 , через вольтметр протікатиме струм, значенням якого не можна нехтувати. Тоді спад напруги на ділянці а б:

$$U = I \times R_{нар}, \quad (31)$$

де

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R - R_1 + R_{нар}}, \quad R_{нар} = \frac{R_1 \cdot R_V}{R_1 + R_V}. \quad (32)$$

На досліджуваній вольтметр у цьому випадку подається напруга:

$$U = \frac{\mathcal{E} \cdot R_{нар}}{R - R_1 + R_{нар}} = \frac{\mathcal{E}}{\frac{R - R_1}{R_V} - \frac{R}{R_1}}. \quad (33)$$

3. Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Градування амперметра

Перший спосіб

1. Зібрати електричне коло у відповідності до схеми, зображеної на рис. 13. При вимкненому джерелі струму встановити максимальні опори реостатів R_1 і R_2 . При цьому стрілки вірцевого і досліджуваного амперметрів повинні стояти на нульових позначках шкали. Якщо необхідно, то їх положення слід відрегулювати коректорами.

2. Увімкнути джерело живлення і плавно збільшувати силу струму за допомогою зміни опорів реостатів. Грубе регулювання здійснюється реостатом R_1 з великим опором, а плавне – реостатом R_2 з меншим опором. Регулювати силу струму необхідно так, щоб стрілка досліджуваного приладу плавно наближалась до першої цифрової відмітки шкали, не переходячи за неї. У такій самій послідовності

установлювати стрілку амперметра на наступних поділках шкали, позначених цифрами. Покази приладів записати в таблицю.

3. Довівши силу струму в колі до номінального значення досліджуваного приладу, плавно зменшувати величину струму за допомогою реостатів R_1 і R_2 , встановлюючи стрілку приладу на тих же самих поділках шкали у зворотному порядку. Покази приладів записати в таблицю.

4. Закінчивши вимірювання, вимкнути джерело живлення. За результатами вимірювання побудувати графік залежності показів досліджуваного приладу від значень сили струму, виміряних взірцевим амперметром.

Другий спосіб

1. Зібрати електричне коло згідно зі схемою, зображеною на рис. 14. Потім встановити в магазині максимальний опір. При розімкненому колі відмітити початкове положення стрілки амперметра на шкалі. Це положення прийняти за нуль шкали.

2. Замкнути коло ключем K та відрахувати перший показ амперметра. Далі поступово зменшувати опір магазину так, щоб стрілка амперметра переміщувалась кожного разу на 3 – 5 поділок шкали. Відліки за шкалою провести з максимально можливою точністю. Зменшувати опір магазину до нуля можливо тільки за умови, коли амперметр має значний внутрішній опір, а схема живиться низьковольтним джерелом струму. У протилежному разі одержимо коротке замикання, значний струм якого може вивести прилад із ладу. Дані досліду занести в таблицю.

3. За формулою (27) знайти струм, який відповідає даному відхиленню стрілки.

4. Результати градуювання представити графічно, відклавши по осі абсцис відхилення N стрілки амперметра, а по осі ординат значення сили струму I , обчислені за формулою (27). Лінія, яка сполучає нанесені на графіку експериментальні точки, є *градуовальною кривою*. З її допомогою можна визначити величину струму за даним відхиленням стрілки приладу. У випадку приладів магнітоелектричної системи градуовальна лінія є прямою, що дозволяє визначити ціну поділки шкали амперметра. Для цього величину струму, яка відповідає певним поділкам, необхідно поділити на число цих поділок.

Завдання 2. Градування вольтметра

Перший спосіб

1. Зібрати електричне коло згідно зі схемою, зображеною на рис. 16. Повзунки обох реостатів встановити в положення точки Д з'єднання цих реостатів. У вказаних положеннях повзунків реостатів при увімкненому джерелі живлення напруга на вольтметри не подається.

2. Перевірити і відрегулювати коректором нульові положення стрілок вимірювальних приладів.

3. Увімкнути джерело живлення і, регулюючи напругу від нуля до номінального значення, зняти покази досліджуваного приладу та взірцевого вольтметра. Грубе регулювання напруги здійснюється реостатом R_1 з великим опором, а плавне – реостатом R_2 з малим опором. Покази приладів записати у відповідну таблицю.

4. Вимірювання повторити у зворотному напрямку, змінюючи напругу від номінальної до нуля. Покази приладів записати у ту ж таблицю.

5. Побудувати графік залежності відхилення стрілки досліджуваного вольтметра від напруги на взірцевому вольтметрі. Визначити чутливість і ціну поділки досліджуваного вольтметра.

Другий спосіб

1. Зібрати електричне коло згідно зі схемою, зображеною на рис. 16. Увімкнути в магазині опорів R менше 100 Ом. Вольтметр приєднати до ділянки магазину з опором $R_1 = 1$ Ом.

2. Записати нульовий відлік вольтметра. Потім замкнути ключ і записати показ приладу.

3. Далі, комбінуючи положення штепселів у магазині подільника або перемикаючи провідники, що йдуть до вольтметра, змінити опір R_1 ділянки аб так, щоб покази вольтметра збільшувались кожен раз на 5–6 поділок шкали.

4. Для кожного вимірювання обчислити за формулою (33) величину напруги U , що подавалась на вольтметр. Побудувати графік залежності відхилення стрілки досліджуваного вольтметра від напруги, обчисленої за формулою (33). Визначити чутливість і ціну поділки вольтметра.

5. Оцінити похибку ΔU , яка викликана тим, що опір досліджуваного вольтметра не рівний безмежності.

Контрольні запитання

1. Поясніть суть прямих, сукупних та сумісних вимірювань.
2. Що таке еталон фізичної величини? Які його основні функції?
3. Назвіть та охарактеризуйте основні еталони електричних величин.
4. Назвіть та охарактеризуйте засоби вимірювання електричних величин.
5. Назвіть і поясніть основні характеристики засобів вимірювання електричних величин.
6. Поясніть поняття «клас точності» вимірювального приладу.
7. Поясніть роботу основних вузлів електромеханічних вимірювальних приладів.
8. Поясніть принцип дії та основні переваги і недоліки приладів магнітоелектричної системи.
9. Поясніть принцип дії та основні переваги і недоліки приладів електро- і феродинамічної системи.
10. Поясніть принцип дії та основні переваги і недоліки приладів електромагнітної системи.
11. Які основні позначення наносяться на шкали аналогових електромеханічних вимірних приладів?
12. Чому в електровимірювальних аналогових приладах, крім обертального моменту, необхідно створити протидійний момент? Чим створюється протидійний момент? Для чого потрібні заспокоювачі?
13. Поясніть призначення шунта і додаткового опору. Як розрахувати значення їх опорів?
14. Як на базі одного й того ж самого вимірювального механізму магнітоелектричної системи створити амперметр і вольтметр? Нарисуйте електричну схему.
15. Що означає проградувати електровимірювальний прилад?
16. Які способи градування амперметра і вольтметра використовуються в даній роботі?

Лабораторна робота № 2

ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИМЕТРА

Мета заняття: Ознайомитись з основними елементами та принципом побудови цифрових вимірювальних приладів. Визначити похибки мультиметра при вимірюванні опору з урахуванням особливостей цифрових вимірювальних приладів.

Прилади та матеріали: лабораторні аналогові та цифрові вимірювальні прилади та технічні інструкції до них, технічні засоби навчання; персональний комп'ютер, мультиметр D830, високоточний магазин опорів MСP-60M.

1. Теоретичні відомості

1. Аналогова і цифрова форми представлення інформації

Результатом будь-якого вимірювання є значення певної фізичної величини, відомості про яку містяться у вимірюваній інформації. Матеріальним носієм інформації виступають сигнали, один із параметрів яких містить вимірювану інформацію і є інформативним. Цей параметр змінюється в залежності від вимірюваної величини за певним законом і називається кодом. *Кодування* інформації може бути *аналоговим* або *цифровим*.

При *аналоговому* кодуванні вимірюваної інформації розмір однієї фізичної величини відображається розміром другої фізичної величини. Наприклад, сила електричного струму відображається (кодується) кутом відхилення рухомої частини вимірювального механізму електромеханічного вимірювального приладу, температура – довжиною стовпчика рідини в капілярі.

Цифрове представлення (кодування) вимірюваної інформації полягає у відображенні вимірюваного значення фізичної величини комбінаціями умовних символів. У найбільш звичних для нас випадках цими символами є числа. Відповідно аналоговому і цифровому відображенню і кодуванню розрізняють аналогову і цифрову форми представлення вимірюваної інформації, а також аналогові та цифрові сигнали.

Модуляція (кодування), *дискретизація* і *квантування*. Як уже відмічалось, у процесі вимірювання один із параметрів вимірюваного

сигналу змінюється або, іншими словами, модулюється вимірюваною величиною. Так, наприклад, інформативним сигналом може служити струм у колі, а його параметр – амплітуда – інформативним параметром, який відображає опір ділянки кола. У цьому випадку амплітуда струму модулюється значенням опору кола, а відповідне кодування здійснюється на основі закону Ома. Таким чином, суть модуляції полягає в тому, що вимірювана величина, діючи на інформативний параметр певного сигналу-носія, передає йому вимірювану інформацію, внаслідок чого цей сигнал стає джерелом вимірюваної інформації. Отже, модуляція представляє собою операцію формування вторинних сигналів. Очевидно також, що модуляція і кодування органічно пов'язані між собою: модулюються певні параметри носіїв, а кодується вимірювальна інформація. Носій інформації може бути величиною з постійним початковим розміром, гармонічним коливанням, параметрами якого є амплітуда, частота і фаза коливань, а також періодичною послідовністю імпульсів, параметри якої – амплітуда, тривалість, частота слідування і фаза. Відповідно до наведених прикладів розрізняють пряму модуляцію, модуляцію гармонічних сигналів та імпульсну модуляцію.

Дискретизацію неперервного в часі (просторі) сигналу здійснюють з метою звільнення від надлишкової інформації, щоб спростити засоби і способи її збереження, передачі та обробки. Вона полягає в тому, що неперервний сигнал $X(t)$, який має безліч значень (рис. 1, а), замінюється послідовністю його значень $X(t_k)$ в певні проміжки часу t_k (рис. 1, б). Інтервал часу $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ називається кроком квантування, який може бути рівномірним або нерівномірним. Величину кроку дискретизації вибирають так, щоб сигнал $X(t)$ можна було б відтворити з допустимою похибкою при мінімальній кількості його дискретних значень $X(t_k)$.

З нерівномірним кроком здійснюється адаптивна дискретизація, при якій крок дискретизації вибирається автоматично в залежності від швидкості зміни (спектрального складу) сигналу $X(t)$ для того, щоб звести до мінімуму надлишковість вимірюваної інформації. Квантування аналогового сигналу за рівнем необхідне для цифрового кодування вимірюваної інформації. Одночасно воно також забезпечує можливість звільнення від надлишковості вимірюваної інформації. Квантування полягає в тому, що значення неперервного або дискретизованого в часі сигналу округлюється до дискретного рівня (рис. 1, в, г). Інтервал, в якому лежать значення величини, котрі

округлюються до певного рівня X_i , називається кроком квантування q_i , який може бути рівномірним ($q_i = q = const$) або нерівномірним ($q_i \neq const$). Найбільш часто, як і при дискретизації, використовують квантування з рівномірним кроком, величина якого рівна одиниці молодшого розряду при цифровому представленні фізичної величини. З нерівномірним кроком здійснюють адаптивне квантування. Величину кроку квантування вибирають в залежності від допустимих втрат вимірюваної інформації. При квантуванні з рівномірним кроком модуль похибки:

$$\Delta X = |X_i - X| = |iq - X| \leq 0,5 q, \quad (1)$$

тобто не перевищує половини кроку квантування.

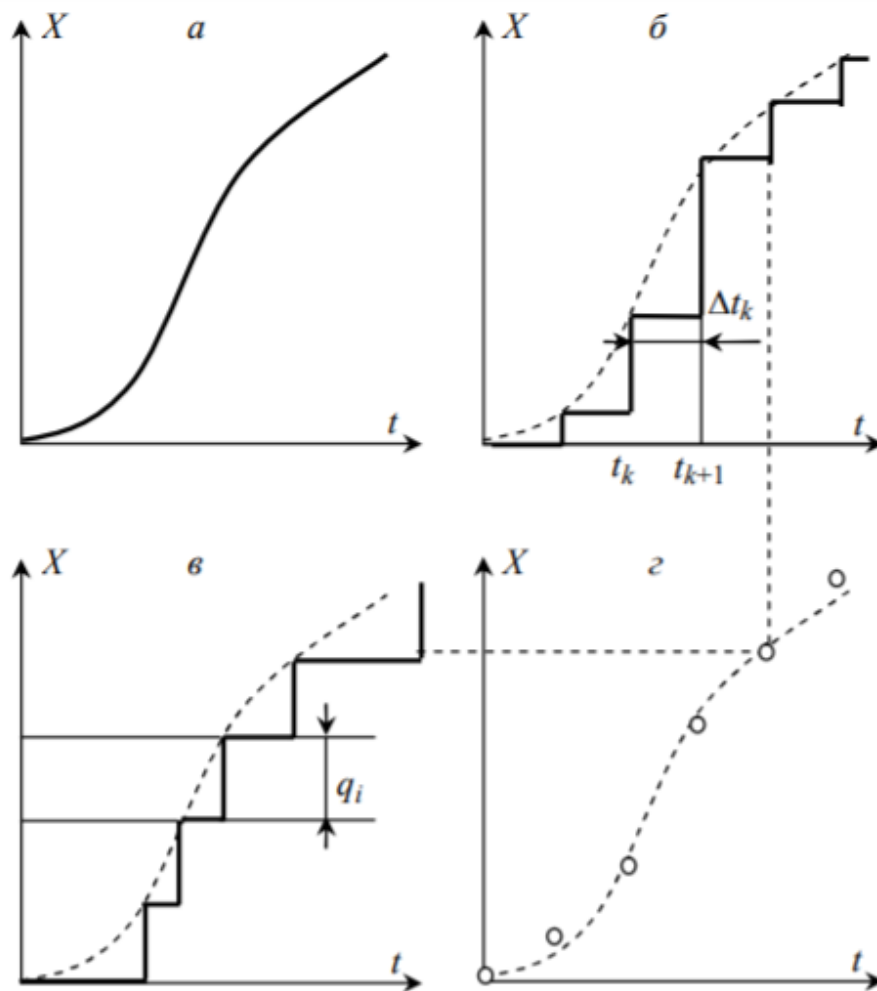


Рис. 1. Види сигналів: а – неперервний; б – дискретизований у часі; в – квантований за рівнем; г – дискретизований і квантований.

Системи числення і коди. Під системою числення розуміють спосіб зображення чисел за допомогою цифрових знаків. Кількість h цифрових знаків у даній системі числення складає основу даної

системи. Найбільш простою є одинична система числення, в якій ціле число відображається сукупністю одиниць або інших однакових знаків, повторених відповідну кількість раз (наприклад, 2 відображається як 11, 5 – як 11111). Найбільше розповсюдження мають двійкова (0, 1) та десяткова (0, 1, 2, ..., 9) системи, які належать до позиційних систем. В позиційній системі кожний цифровий знак має числове значення k і вагу, яка визначається положенням (позицією) в числовому виразі. Ціле число N в позиційній системі числення записують у вигляді суми:

$$N = \sum_{i=1}^n k_i h^{n-i}, \quad (2)$$

де n – кількість розрядів (позицій), k_i – цифровий знак з вагою i -го розряду.

Дробове n -розрядне число M з m розрядами після коми записують так:

$$M = h^{-m} \sum_{i=1}^n k_i h^{n-i} = Nq, \quad (3)$$

де $q = h^{-m}$ – одиниця молодшого розряду.

Розглянемо кілька прикладів. У найбільш звичній десятковій системі числення число, наприклад, 258, записують у вигляді суми:

$$258 = 2 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 8 \times 10^0. \quad (4)$$

Для скорочення запису пишуть тільки значення коефіцієнтів, розміщуючи їх зліва направо по зменшенню номера десяткового розряду: 258. У двійковій системі числення це ж число 258 записують у вигляді 100000010, що відповідає:

$$1 \times 2^8 + 0 \times 2^7 + 0 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0. \quad (5)$$

Очевидно, що при технічній реалізації двійкового коду для відображення кожного розряду числа необхідно створити елемент з двома стійкими станами, які відповідатимуть 0 і 1 (за домовленістю). Технічна реалізація відображення десяткової системи представлення чисел пов'язана із значними труднощами, оскільки для відображення кожного розряду числа необхідні пристрої з десятьма стійкими станами. У зв'язку з цим широкого застосування набув двійково-десятковий код, в якому кожний десятковий розряд виражається чотирма двійковими розрядами, ваги знаків яких відповідають

позиціям десяткової системи числення. Так, наприклад, десяткове число 258 в двійково-десятковій системі має вигляд:

$$(0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0) \times 10^2 + \\ + (0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0) \times 10^1 + \\ + (1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0) \times 10^0,$$

або скорочено 0010 0101 1000.

Цей код вигідно відрізняється від інших тим, що порівняно просто перетворюється в десятковий, який використовують для візуального відліку і не вимагає для реалізації великої кількості бістабільних елементів. Так, для реалізації чисел від 0 до 999 необхідно $3 \times 4 = 12$ бістабільних логічних пристроїв.

Таким чином, довільна система числення є кодом для зображення чисел за допомогою цифрових знаків. Цифрові коди, які використовують у цифровій вимірювальній техніці, базуються на одній або кількох системах числення. У ряді випадків це відображається на назві кодів, наприклад, розглянуті вище одиничний, двійковий, десятковий та двійково-десятковий коди. При фізичній реалізації кодів кожному символу використовуваної системи числення повинен відповідати свій фізичний стан логічного елемента.

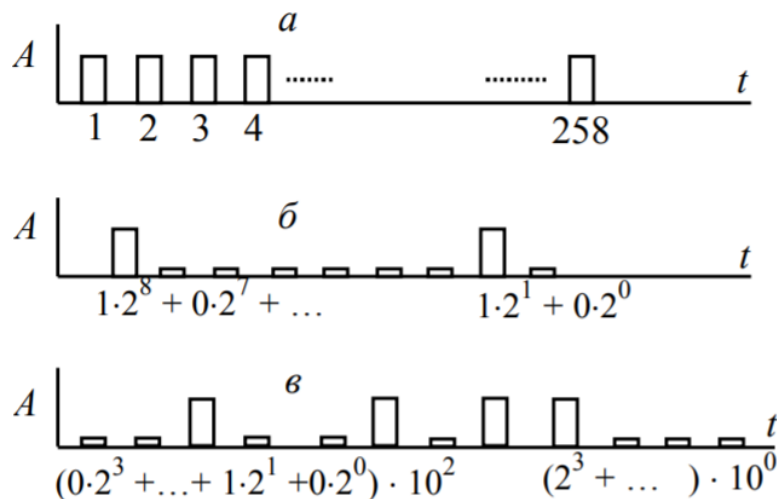


Рис. 2. Сигнали коду числа 258 в різних системах числення:
a – одиничній, *б* – двійковій, *в* – двійково-десятковій.

У залежності від черговості передачі сигналів, що відповідають елементам коду, всі коди можна поділити на послідовні та паралельні. У випадку паралельного коду елементи коду передаються одночасно різними каналами. У послідовного коду елементи коду передаються по черзі в часі в одному каналі. Якщо створювати послідовний код імпульсами напруги або струму і вважати, що символу 1 відповідає

наявність імпульсу високого рівня, а символу 0 – відсутність імпульсу або імпульс низького рівня, то сигнал-код числа 258 в різних системах числення буде мати вигляд, представлений на рис. 2.

2. Методи перетворення аналогових сигналів у код

Перетворення неперервної фізичної величини у код проходить шляхом квантування вимірюваного сигналу і заміни значення фізичної величини її найближчим фіксованим значенням. Ці фіксовані значення фізичної величини утворюються за допомогою міри, і кожному фіксованому значенню відповідає свій код.

Розрізняють три основні методи перетворення аналогових сигналів у код.

Метод послідовного рахунку полягає в послідовному порівнянні вимірюваної величини X з відомою величиною X_k , яка стрибкоподібно (кроками) зростає у часі в результаті кожного такту на величину X_0 (рис. 3, а). Значення X_0 кожної стрибкоподібної зміни X_k називається кроком квантування (або просто квантом) і є постійною величиною. При певному числі квантів n настає рівність (строга або з деякою похибкою) $nX_0 = X$, де X значення вимірюваної величини. Якщо вибрати X_0 рівним одиниці вимірювання фізичної величини X , то число кроків n буде представляти собою одиничний код вимірюваної величини. Для одержання коду необхідний послідовний підрахунок кількості квантів X_0 .

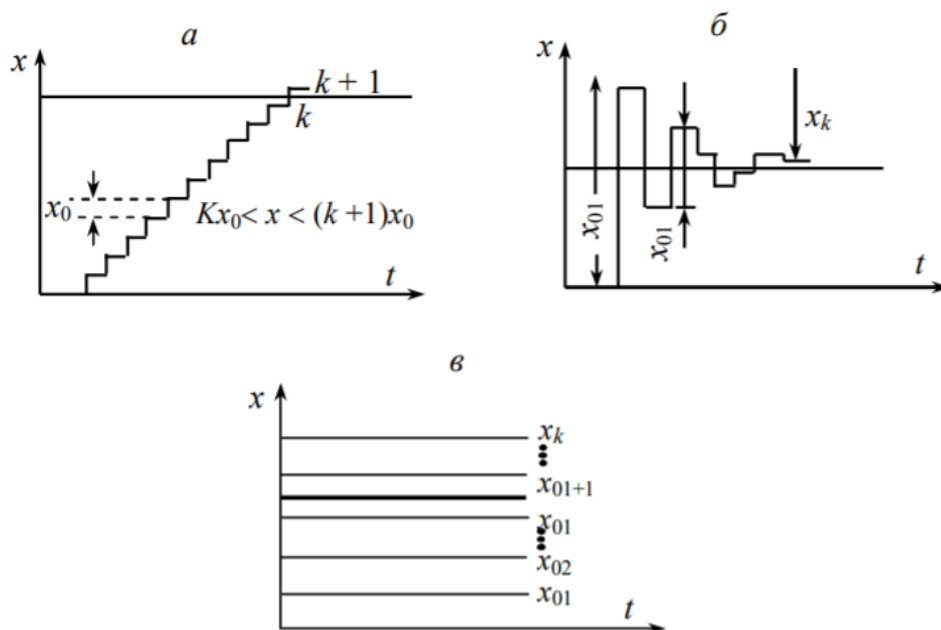


Рис. 3. Методи перетворення неперервних вимірюваних величин у код: а – послідовного рахунку; б – порозрядного урівноваження; в – одночасного зчитування.

Метод порозрядного урівноваження (кодоімпульсний, порівняння і віднімання) полягає в послідовному в часі порівнянні вимірюваної величини X з відомою величиною X_k , яка змінює своє значення нерівномірними стрибками (кроками) $X_{m,i}$ за певним алгоритмом (рис. 3, б). Наприклад, для двійково-десятькового коду всі значення $X_{m,i}$ розбиваються на групи по чотири, причому значення $X_{m,i}$, де $i = 1, 2, 3, 4$, у кожній тетраді відносяться як вагові коефіцієнти коду, (в розглядуваному випадку 8-4-2-1), а значення $X_{m,i}$, у кожній наступній тетраді в 10 раз більші, ніж значення в попередній тетраді. При цьому в молодшій тетраді значення $X_{m,i}$, з ваговим коефіцієнтом 1 визначає крок квантування. Процес перетворення починається з порівняння значення X з старшим значенням $X_{m,i}$, старшої тетради (рис. 3, б). Результат порівняння (більше, менше) визначає, чи ввійде дане значення $X_{m,i}$, в результуючу суму $\sum_m \left(\sum_{i=1}^4 X_{m,i} \right)$, яка замінює вимірюване значення фізичної величини X при перетворенні її в код. У процесі послідовного порівняння двійково-десятьковий код значення X виробляється порозрядно, в напрямку від старшого розряду до молодшого.

Метод одночасного зчитування полягає в одночасному порівнянні вимірюваної величини з дискретним набором відомих величин, значення яких відрізняються один від одного на величину одного кроку квантування. Код вимірюваної величини утворюється за значенням величини X_k , яке найбільш близьке (або рівне) значенню вимірюваної величини X (рис. 3, в). Цей метод вимагає цілої множини високостабільних мір, тому технічно його найважче реалізувати. З іншого боку, час порівняння, зрозуміло, значно менший, ніж в попередньо розглянутих методах. Внаслідок цього метод одночасного зчитування використовують тільки в швидкодіючих вимірювальних приладах.

Практична реалізація описаних основних методів перетворення значення фізичних величин у код в залежності від роду величини характеризується різним ступенем складності. Тому часто вимірювану фізичну величину X попередньо перетворюють в іншу фізичну величину Y , яка кодується найбільш просто вибраним методом. В електричних вимірюваннях найчастіше кодують інтервал часу Δt , частоту слідування імпульсів f та напругу постійного струму U .

3. Структура, основні вузли ЦВП та особливості їх характеристик

Структура цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) включає в себе дві обов'язкові складові: аналого-цифровий перетворювач та цифровий пристрій відліку. В аналого-цифрових перетворювачах відбувається автоматичне перетворення неперервної вхідної величини в код. Ці перетворювачі можуть використовуватись і як самостійні вузли вимірювальних, інформаційних та керуючих систем, в яких не вимагається індикація результатів вимірювань в десятковому коді. Другим обов'язковим вузлом ЦВП є цифровий пристрій відліку (ЦПВ). За допомогою одного із розглянутих вище методів, аналогоцифрові перетворювачі виробляють код, який відповідає значенню вимірюваної величини, а ЦПВ перетворює кодові сигнали в цифрові символи десяткової системи, які найбільш зручні для нашого сприйняття. Багато ЦВП містять попередні аналогові перетворювачі (АП), які служать для зміни масштабу вимірюваної величини X , або її перетворення в іншу величину, більш зручну для кодування. Найбільш проста структурна схема ЦВП показана на рис. 4.

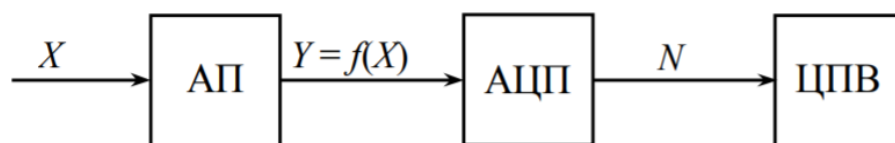


Рис. 4. Структурна схема ЦВП.

В ЦВП застосовуються ряд спеціальних вузлів, які побудовані на елементах електронної техніки з широким використанням мікросхем різної ступені інтеграції. Розглянемо деякі найбільш часто вживані вузли ЦВП.

Тригери і лічильні пристрої. Тригер – це пристрій з двома стійкими станами, перехід між якими здійснюється стрибкоподібно під дією зовнішнього сигналу. Після переходу із одного стану в другий, новий стан зберігається до тих пір, поки наступний зовнішній сигнал не змінить його. На рис. 5, а показано умовне позначення тригера, який має три входи: вхід установки в нульовий (початковий стан) R (reset), вхід установки в одиничний стан S (set), лічильний вхід C (count) і два виходи: прямий Q та інверсний \bar{Q} . При поступленні керуючого сигналу на вхід R тригер встановлюється в нульовий стан, при якому на прямому виході Q встановлюється електричний сигнал з

низьким потенціалом, що відповідає логічному нулю, а на інверсному виході \bar{Q} – високий потенціал, що відповідає логічній одиниці. Якщо ж керуючий сигнал подати на вхід S , то на прямому виході Q з'явиться сигнал 1, а на інверсному \bar{Q} – 0.

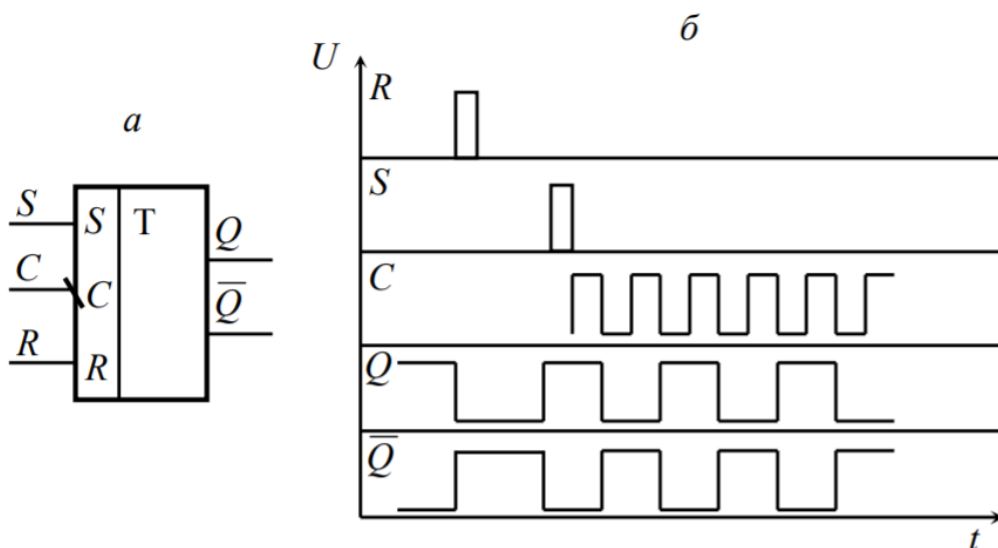


Рис. 5. Умовні позначення лічильного тригера (а) та діаграма його роботи (б).

При надходженні імпульсів на лічильний вхід C тригер міняє свій вихідний стан від кожного вхідного імпульсу. Робота тригера при дії керуючих та лічильних імпульсів проілюстрована за допомогою часової діаграми, зображеної на рис. 5, б.

Ланцюжок послідовно з'єднаних тригерів є найпростішим лічильником імпульсів у паралельному двійковому коді. Схема такого лічильника та часова діаграма його роботи представлена на рис. 6.

Перед початком підрахунку імпульсів на об'єднані R входи тригерів $D1 - D3$ подається імпульс установки в нульовий стан, внаслідок чого на всіх виходах Q встановлюється логічний 0. Імпульси, кількість яких необхідно підрахувати, надходять на вхід першого тригера. Припустимо, що зміна стану тригера відбувається (синхронізована) по задньому фронту імпульсу, який на часових діаграмах (рис. 6, б) відмічений стрілкою. Легко бачити, що частота імпульсів на виході тригера в два рази менша від частоти вхідних імпульсів. Таким чином, кожний тригер є подільником частоти імпульсів на 2. Очевидно, що при послідовному з'єднанні n тригерів, частота імпульсів на виході останнього буде в $2n$ раз менша, ніж вхідних. Безпосередньо з діаграми також впливає, що напруга

(потенціал) на виходах $Q1 - Q3$ відповідає паралельному двійковому коду числа імпульсів, які поступили на вхід, причому вихід $Q1$ відповідає молодшому розряду, а $Q3$ – старшому.

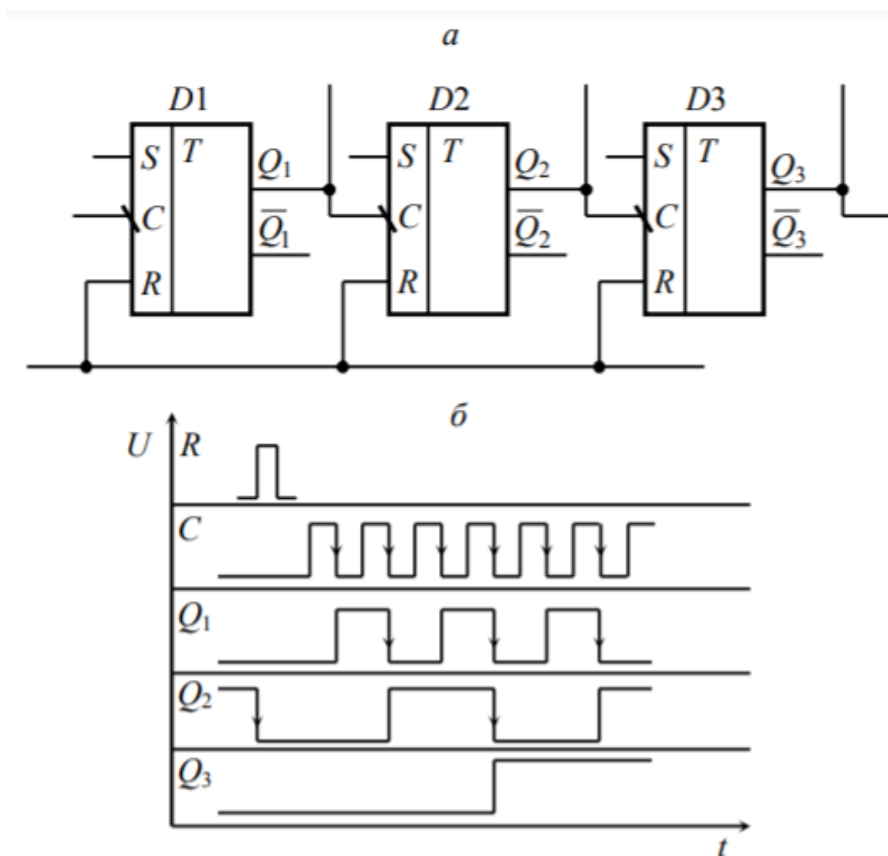


Рис. 6. Лічильник, побудований із ланцюга тригерів (а) та часова діаграма його роботи (б).

Дешифратори. Оскільки паралельний двійковий код незручний для безпосереднього сприйняття, його необхідно перетворити в десятковий. Цю функцію виконують вузли, які одержали назву дешифраторів. У загальному випадку під дешифратором розуміють пристрій, який перетворює паралельний код одного виду в паралельний код іншого. В ЦВП в основному використовуються дешифратори двійково-десятькового коду в паралельний код для керування знаковими індикаторами. Умовне позначення такого дешифратора при перетворенні в десятковий код наведено на рис. 7.

Знакові індикатори служать для перетворення електричних сигналів у світлові, які безпосередньо сприймаються спостерігачем. Найбільш простими є газорозрядні знакові індикатори. Вони представляють собою скляний балон, заповнений неонам, всередині якого розміщений анод у вигляді дротяної сітки та катоди у вигляді тонких дротинки, які мають форму цифр від 0 до 9. Якщо між анодом

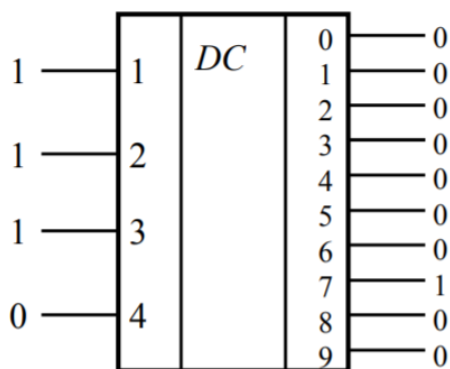


Рис. 7. Умовне позначення дешифратора двійково-десятькового коду в десятковий.

і одним із катодів прикладена напруга 150 – 200 В, то навколо катода за рахунок збудження атомів неону електронним ударом виникає яскраве червоно-оранжеве свічення. Випускають також газорозрядні лампи з катодами у вигляді службових знаків +, -, ~, V, mA і т.д. Для того, щоб світилась тільки одна із десяти цифр, напруга повинна бути прикладена між анодом і тільки тим катодом, який має вигляд необхідної цифри. З цією метою кожний катод з'єднується з джерелом (спільної шини) через ключ, виконаний, наприклад, на транзисторі (див. рис. 8).

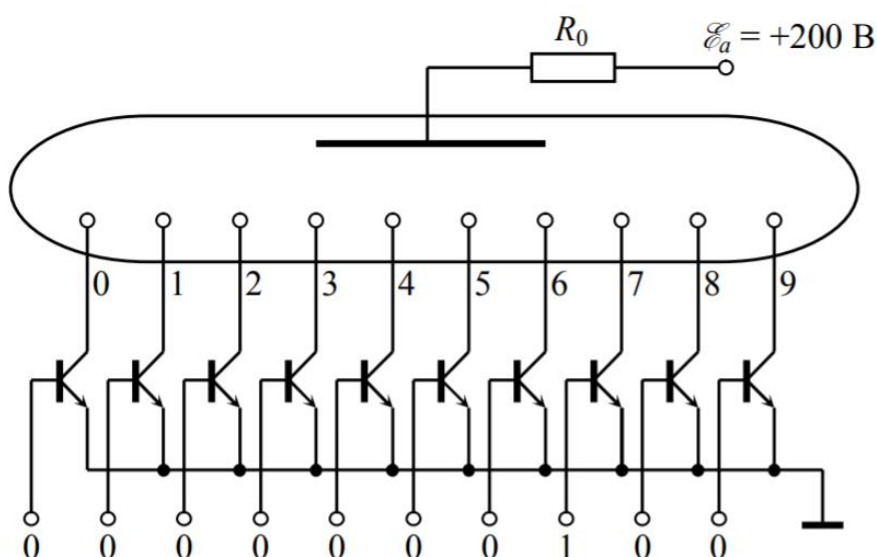


Рис. 8. Схематичне зображення та принцип управління газорозрядним індикатором.

При подачі напруги рівня 1 із одного з виходів дешифратора на базу з'єднаного з ним транзистора цей транзистор відкривається (переходить у провідний стан), і відповідна цифра висвічується індикатором. На бази інших транзисторів у цей час від дешифратора поступають напруги рівня 0, і вони перебувають у закритому стані. На рис. 8 показана схема вмикання і загальний принцип керування газорозрядним індикатором. Для наведеного на рис. 7 випадку вхідних сигналів на дешифраторі і відповідно знаковому індикаторі ініціюється цифра 7.

В останній час для цифрової індикації використовують, в основному, сегментні індикатори, в яких випромінюючими елементами є напівпровідникові світлодіоди, чи смужки електролюмінофору, що мають високу контрастність і яскравість. Слід відмітити також рідкокристалічні індикатори, робота яких базується на зміні оптичних властивостей тонкого шару рідкокристалічної речовини при прикладенні до неї електричного поля. Такі індикатори споживають дуже малу потужність, проте їх контрастність залежить від зовнішнього освітлення.

Компаратори (пристрої порівняння) призначені для порівняння двох вхідних величин: X_1 (наприклад, відомої) та X_2 (невідомої) та формування вихідного сигналу Y в залежності від результату порівняння. Найбільш часто порівнюються напруги постійного струму. Компаратори напруг, як правило, включають в себе диференціальний підсилювач з максимальним коефіцієнтом підсилення та пороговий елемент (рис. 9, а).

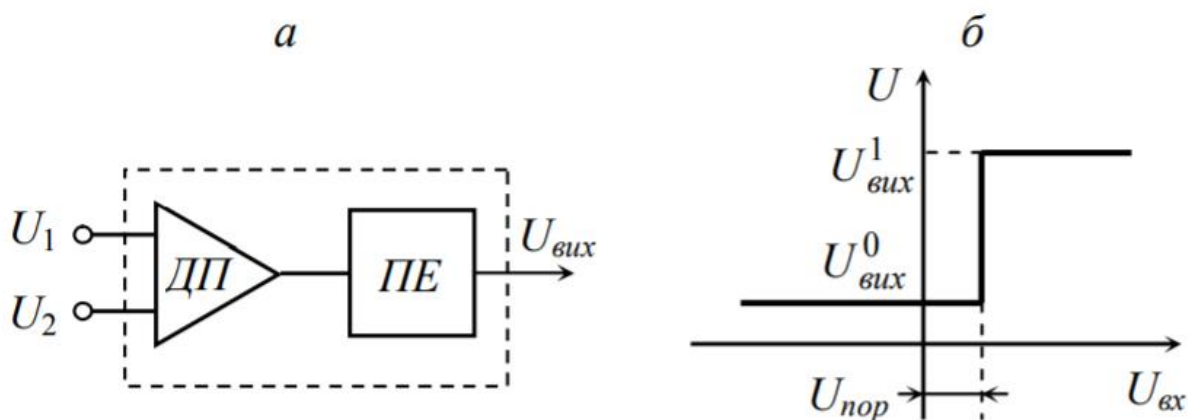


Рис. 9. Структурна схема компаратора напруги (а) та його характеристика (б).

Математично компаратор описується такими виразами:

$$\text{при } U_{\text{вх}} = U_1 - U_2 > 0, \quad \rightarrow \quad U_{\text{вих}} = U^1_{\text{вих}};$$

$$\text{при } U_{\text{вх}} = U_1 - U_2 < 0, \quad \rightarrow \quad U_{\text{вих}} = U^0_{\text{вих}};$$

причому $U^1_{\text{вих}}$ та $U^0_{\text{вих}}$ повинні співпадати з напругами логічних 1 та 0 відповідно. В ідеальних компараторах перемикачів вихідної напруги з одного рівня на інший повинно проходити при $U_1 = U_2$. Однак, в реальних пристроях, як показано на рис. 9, б, вихідний сигнал змінює своє значення при певній ненульовій різниці $U_1 - U_2 = U_{\text{пор}}$, яка називається пороговою напругою.

Комутатори, або електронні ключі – це пристрої, які виконують функції вимикачів або перемикачів. Як ключі, що керуються електричними сигналами, застосовують електричні реле, а також ключі на базі діодів або транзисторів. Перші мають низький опір в увімкненому і високий у вимкненому станах, проте досить інерційні і внаслідок цього не можуть бути використані в швидкодіючих схемах. Перевагою ж других є висока швидкодія і надійність, хоча вони поступаються релейним ключам щодо опорів у вимкненому і увімкненому станах. Другу різновидність комутаційних елементів утворюють ключові схеми, які використовуються для дозволу або заборони на проходження сигналів з рівнями логічних 0 або 1. Такі схеми прийнято називати логічними ключами.

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) - це пристрої, в яких представлена в цифровому коді вхідна величина перетворюється в квантовану аналогову фізичну величину (напругу, електричний опір тощо). Перетворювачі коду в напругу виготовляють на основі дискретних резистивних подільників напруги, в яких коефіцієнт ділення визначається кодом. Перетворювачі коду в електричний опір виготовляють у вигляді набору резисторів, які можуть з'єднуватись (комутуватись) за допомогою релейних кіл або електронних ключів.

Кожний ЦАП характеризується діапазоном вимірювань, чутливістю, роздільною здатністю, вхідним опором і струмом, точністю, швидкодією, завадостійкістю і т. д. Аналогічні характеристики притаманні і аналоговим приладам, тобто є спільними для всіх засобів вимірювань, проте деякі з них для цифрових приладів мають свою специфіку. Так, чутливість ЦАП визначається як значення вимірюваної величини, яка припадає на одиницю дискретності, тобто на один квант. Роздільною здатністю ЦАП називається величина, обернена до числа квантів Nq на піддіапазоні.

Точність приладу кількісно оцінюється похибками, які для довільного ЦВП мають дві складові. Перша складова включає в себе методичну похибку кроку дискретності ΔX_0 . Ця похибка виникає внаслідок того, що вимірювана величина X може приймати безмежну множину значень у межах певного діапазону вимірювань, а величина, за якою виробляється код і замінює X , може приймати лише обмежену кількість значень, які відрізняються одне від одного на величину, рівну або кратну кроку квантування. Друга складова похибки пов'язана з недосконалістю елементів (вузлів) приладу і, таким чином, є інструментальною. До неї слід віднести, наприклад, відхилення дійсного значення кванта, (отже і набору квантів) від номінального значення, наявність порога чутливості пристрою порівняння, зміна під дією різних факторів коефіцієнта передачі масштабних перетворювачів тощо. Інструментальні похибки індивідуальні для кожної групи ЦВП і залежать від елементної бази, прийнятої для побудови ЦВП. Однак для переважаючої більшості ЦВП, на відміну від аналогових приладів, похибка нормується за формулою:

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_N}{X} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

що свідчить про співрозмірність адитивної і мультиплікативної складових похибки ЦВП.

Важливою характеристикою ЦВП є завадостійкість. Під завадами прийнято розуміти величини, які не вимірюються, проте діють на вхід приладу разом із вимірюваною величиною і спотворюють результат вимірювання. Здатність ЦВП зменшувати дію завад на результат вимірювань називається завадостійкістю. Кількісно вона характеризується коефіцієнтом подавлення завад, який вимірюється в децибелах (Дб) і визначається за формулою:

$$K = 20 \log \left(\frac{E_{n \max}}{U_e} \right), \quad (7)$$

де $E_{n \max}$ – амплітудне значення завади на вході приладу, U_e – еквівалентна вхідна напруга, яка викликає такий же вихідний сигнал, як і $E_{n \max}$.

4. ЦВП для вимірювання інтервалу часу та частоти

Часовий інтервал t_x може бути виміряний шляхом підрахунку числа імпульсів стабільної частоти f_0 , які поступили на вхід лічильника імпульсів за час t_x . Спрощена функціональна схема вимірювача часових інтервалів t_x показана на рис. 10.

Цикл вимірювань починається з установки «нуля», тобто установки перелікового пристрою *ПП* та пристрою відліку *ПВ* у вихідний стан. Така операція виконується у всіх приладах циклічної дії, причому в більшості випадків автоматично. При поступленні на ключ *K* вхідного сигналу він відкривається, і імпульси від генератора імпульсів стабільної частоти *ГІСЧ* починають поступати на *ПП*. По закінченні інтервалу часу t_x ключ закривається і на *ПВ* буде зафіксоване число:

$$N = t_x f_0 = t_x / T_0. \quad (8)$$

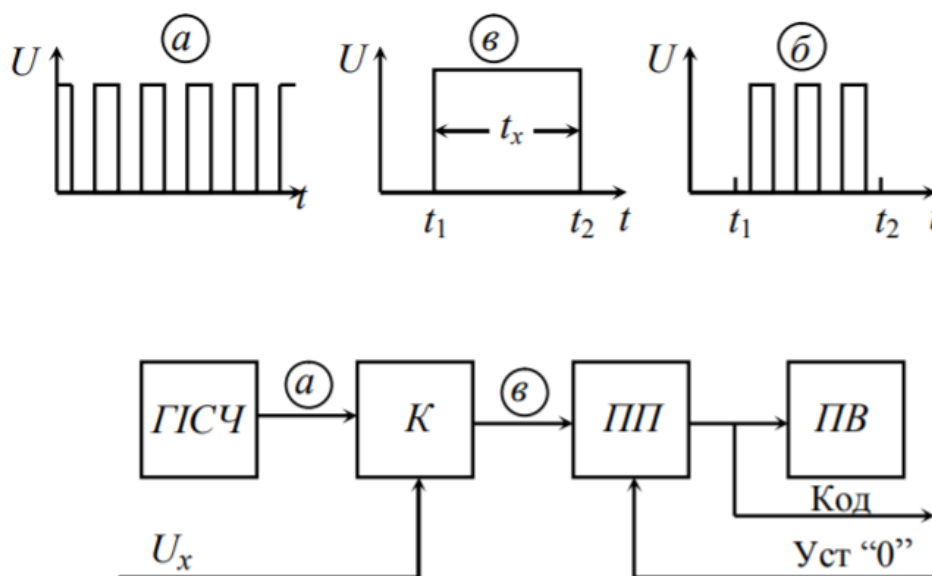


Рис. 10. Спрощена функціональна схема вимірювача інтервалу часу.

Якщо частота f_0 і відповідно період T_0 вибрані одиничними, наприклад, $f_0 = 1$ МГц, $T_0 = 1$ мкс, то число N покаже інтервал часу t_x в мікросекундах. У наступному циклі вимірювань відбувається автоматична або ручна установка нуля, і підрахунок імпульсів повторюється.

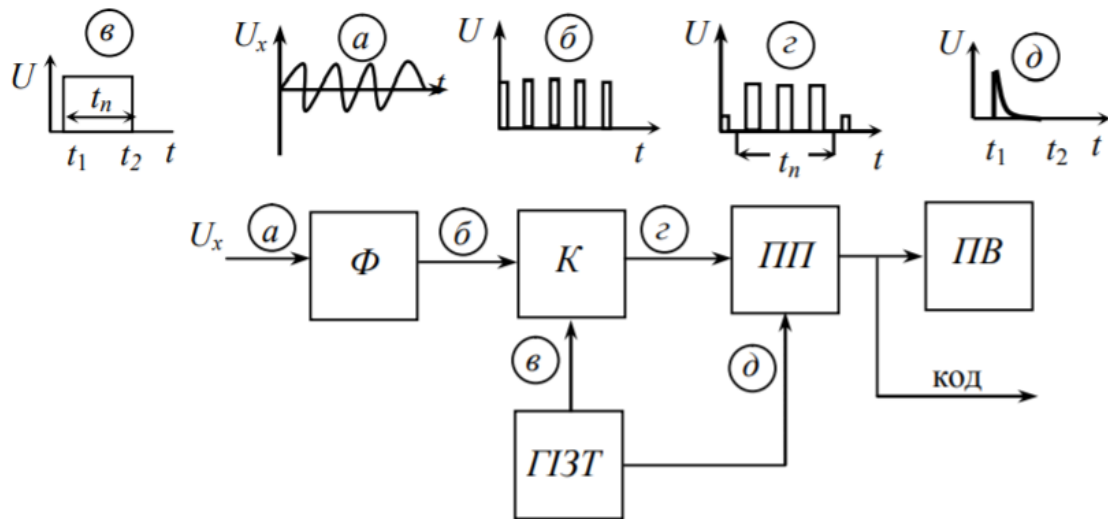


Рис. 11. Структурна схема вимірювача частоти.

Принцип дії частотоміра, функціональна схема якого наведена на рис. 11, заснований на підрахунку числа імпульсів частоти f_x протягом інтервалу часу t_n . Вхідний сигнал поступає на формувач Φ і перетворюється в послідовність імпульсів. Генератор імпульсів заданої тривалості $ГІЗТ$ відкриває ключ K на час t_n і одночасно здійснює автоматичну установку $ПП$ у вихідний стан. За час t_n на вхід $ПП$ надійде:

$$N = t_n \cdot f_x \quad (9)$$

імпульсів. Якщо t_n вибраний одиничним інтервалом часу, наприклад 1 с, то число N , яке висвітлюватиме $ПВ$, покаже вимірювану частоту f_x в Герцах.

5. Цифрові вольтметри постійного струму

Найбільш прості структурні схеми мають час-імпульсні, число-імпульсні та кодо-імпульсні вольтметри. Розглянемо коротко принцип дії кожного з них.

В *час-імпульсних* вольтметрах вимірювана напруга U_x перетворюється в часовий інтервал t_x шляхом порівняння U_x з лінійно змінною напругою U_g (див. функціональну схему, зображену на рис. 12).

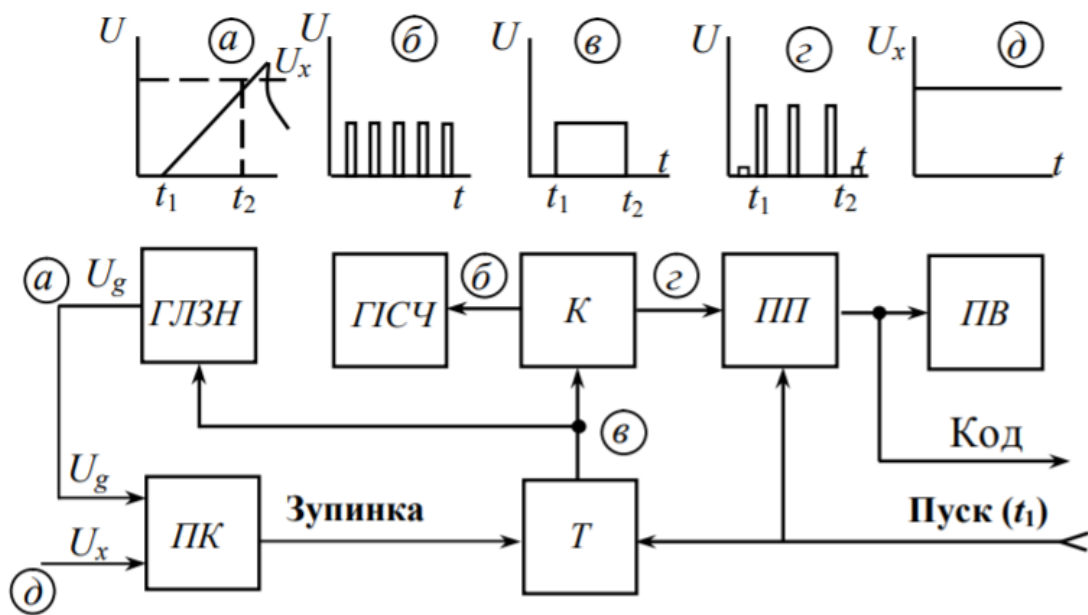


Рис. 4.12. Функціональна схема час-імпульсного вольтметра.

На початку вимірювань в момент часу t_1 спрацьовує тригер T , який відкриває ключ K і запускає генератор лінійно змінної напруги $ГЛЗН$. Напруга на виході генератора $ГЛЗН$ зростає за лінійним законом, а на вхід перелікового пристрою $ПП$ подаються імпульси від генератора імпульсів стабільної частоти $ГИСЧ$. В момент t_2 , коли напруга U_g досягає значення U_x , порівнюючий пристрій – компаратор $ПК$ - перемикається з одного стану в інший і через тригер вимикає (закриває) ключ K і припиняє подачу імпульсів на переліковий пристрій $ПП$. Таким чином, на $ПП$ імпульси від $ГИСЧ$ поступають тільки в проміжок часу t_x . Оскільки

$$U_g = B(t - t_1), \quad (10)$$

то

$$U_x = B(t_2 - t_1). \quad (11)$$

Звідки

$$t_2 - t_1 = U_x / B \quad (12)$$

де B – коефіцієнт, який характеризує швидкість зростання напруги U_g . За час t_x на $ПП$ надійде

$$N = t_x \cdot f_0 = (t_2 - t_1) \cdot f_0 = (U_x \cdot f_0) / B \quad (13)$$

імпульсів. Таким чином, число імпульсів, порохованих переліковим пристроєм $ПП$ і відображених пристроєм відліку $ПВ$, пропорційне напрузі U_x .

В число-імпульсних вольтметрах вимірювана напруга U_x перетворюється в одиничний число-імпульсний код шляхом порівняння U_x з відомою напругою U_k , яка зростає в часі стрибками, причому кожний стрибок відповідає кроку квантування. Число-імпульсний код дорівнює числу квантів ΔU_k , при якому настає рівність $U_x = U_k$ (з певною похибкою). Функціональна схема такого вольтметра наведена на рис. 13, де *ГСНН* – генератор стрибкоподібно-наростаючої напруги, який може бути побудований на базі дискретного подільника напруги з електронними ключами. При поступленні періодичних імпульсів на вхід такого генератора його вихідна напруга зростає за лінійно-стрибкоподібним законом. Таким чином, *ГСНН* з генератором є найпростішим цифроаналоговим перетворювачем (ЦАП)

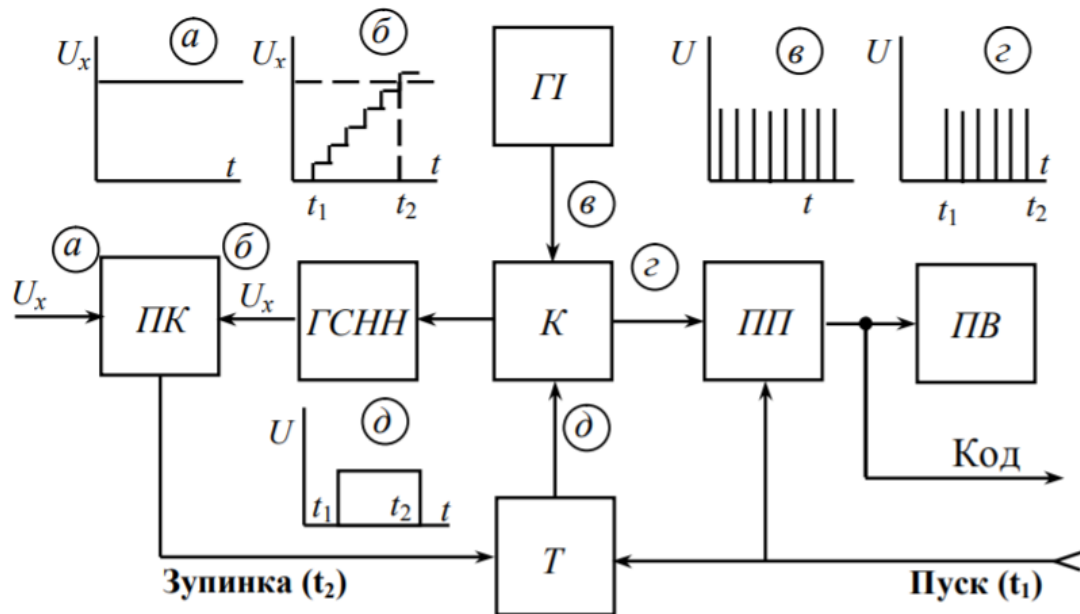


Рис. 13. Функціональна схема число-імпульсного вольтметра.

ЦВП на основі приведеної схеми працює наступним чином. При подачі імпульсу запуску тригер *T* встановлює у вихідний стан переліковий пристрій *ПП* і відкриває ключ *К*. Імпульси від генератора *Г* починають проходити через ключ до *ПП* і одночасно до генератора *ГСНН*, вихідна напруга якого починає зростати за лінійно-стрибкоподібним законом. При $U_x = U_k$ спрацьовує компаратор (порівнюючий пристрій) *ПК*, який через тригер *T* закриває ключ *К* і тим самим припиняє подачу імпульсів на вхід *ПП* і генератора *ГСНН*. Отже, на пристрої відліку *ПВ* буде зафіксоване число:

$$N = \frac{U_k}{\Delta U_k} = \frac{U_x}{\Delta U_k} \quad (14)$$

Якщо ΔU_k – одиничне значення напруги, наприклад, 1В, то N буде відповідати значенню вимірюваної напруги у вольтах

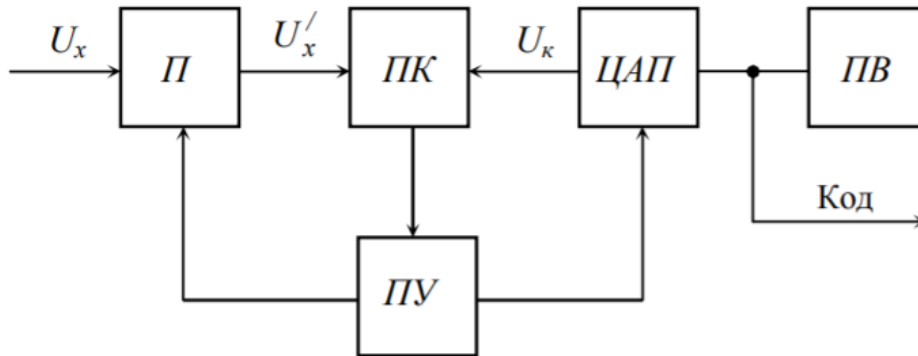


Рис. 14. Структурна схема кодо-імпульсного вольтметра.

Структурна схема *кодо-імпульсного* вольтметра представлена на рис. 14. Вимірювана напруга поступає на вхідний підсилювач (подільник), який переключається вручну або автоматично. З виходу підсилювача напруга $U'_x = KU_x$ подається на вхід порівнюючого пристрою *ПК*, на другий вхід якого поступає напруга від цифроаналогового перетворювача. Порівнюючий пристрій в залежності від знаку різниці $U'_x - U_k$ подає відповідний сигнал на пристрій управління *ПУ*. Цей пристрій при автоматичному виборі діапазону змінює при необхідності коефіцієнт підсилення K підсилювача *П* і діє на ЦАП таким чином, щоб зменшити різницю $U'_x - U_k$. Під дією *ПУ* напруга U_k буде змінюватись стрибками у відповідності з вибраним кодом (наприклад, розглянутим вище в п. 2 при порозрядному зрівноваженні) до тих пір поки не наступить рівність:

$$U_k = U_x = KU'_x \quad (15)$$

(точна, або з певною похибкою, яка не перевищує одиницю молодшого розряду). Одночасно з перемиканням ЦАП формує код для пристрою відліку *ПВ* і подачі його на вихід вольтметра. Відмітимо, що поряд з розглянутими вище схемами, існує ще багато більш складних за принципом дії цифрових вольтметрів, наприклад, наступного зрівноваження, подвійного інтегрування та ін.

6. Основні напрямки розвитку ЦВП

На основі принципів роботи розглянутих вище схем побудовані цифрові вимірювальні прилади різних фізичних величин. У багатьох із них вимірювана фізична величина попередньо перетворюється в інтервал часу, частоту або напругу постійного струму. Тенденції розвитку ЦВП та АЦП спрямовані на покращення метрологічних характеристик, розширення функціональних можливостей, підвищення надійності, зниження собівартості приладів, які розробляються конструкторами або вже серійно випускаються. Нині вже освоєний випуск ЦВП з чутливістю по постійній напрузі і струму 1 пВ і 1 пА , відповідно, при роздільній здатності порядку 10^{-8} і похибках $0,00005\%$. Діапазон вимірювання частот цифровими приладами складає 10^{-8} – 10^{12} Гц. Приведені значення переконливо показують, що за метрологічними параметрами ЦВП, побудовані на відомих сьогодні принципах близькі до своїх граничних значень. Дійсно, похибки вимірювань основних електричних величин порівняні з похибками відповідних еталонів. Досягнутий рівень метрологічних характеристик ЦВП в переважній більшості випадків повністю задовольняє вимоги їх практичного використання. В зв'язку з цим основні зусилля при розробці ЦВП спрямовані на забезпечення зручності експлуатації приладів, зокрема при статистичній обробці вимірюваної інформації, врахуванні похибок вимірювань, а також створенні спеціалізованих вимірювальних систем і комплексів для їх застосування при вирішенні конкретних наукових і виробничих задач (наприклад, автоматичного управління експериментом або технологічним процесом). Ці задачі пов'язані з застосуванням в ЦВП та інформаційно-вимірювальних, контролюючих, керуючих системах на їх основі сучасних мікроелектронних вузлів, зокрема мікропроцесорів. Мікропроцесор (МП) - це побудований на великій або надвеликій інтегральній мікросхемі (ВІС, НВІС) пристрій, який призначений для виконання обчислювальних і логічних функцій у відповідності з тими командами, які поступають до нього. Послідовність виконання керуючих команд визначається програмою, яка зберігається в пристроях пам'яті, також виконаних ВІС. Мікропроцесор разом з пристроями пам'яті і вводу-виводу інформації утворюють мікро-ЕОМ, технічні можливості якої цілком відповідають вимогам сучасного розвитку ЦВП. Розглянемо спрощену структурну схему ЦВП з вбудованою міні-ЕОМ (рис. 15).

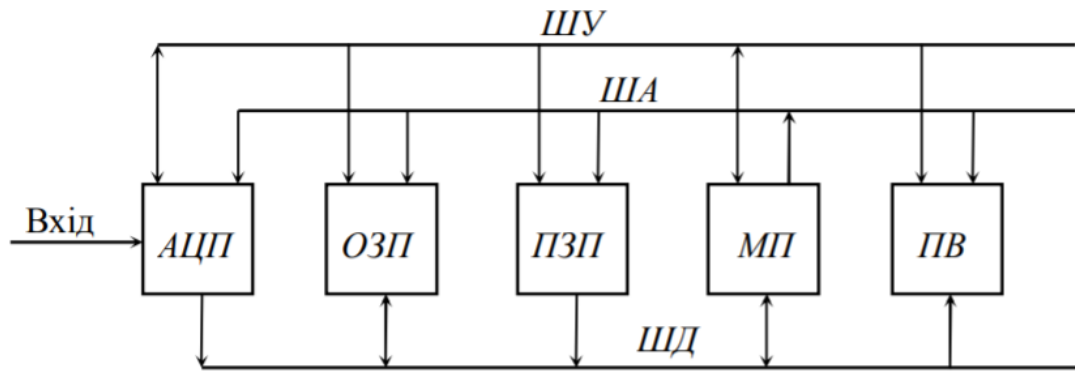


Рис. 15. Спрощена структурна схема ЦВП з мікро-ЕОМ

До складу приладу входять аналого-цифровий перетворювач *АЦП*, оперативний запам'ятовуючий пристрій *ОЗП*, в який заноситься поточна, поновлювана в процесі роботи приладу, цифрова інформація (наприклад, код поточного значення вимірюваної величини), постійний запам'ятовуючий пристрій *ПЗП*, який зберігає незмінну цифрову інформацію (наприклад, послідовність кодів команд, що утворюють програму роботи приладу), мікропроцесор і цифровий пристрій відліку *ПВ*. Всі вузли приладу зв'язані між собою магістральною системою провідників, які утворюють шину управління *ШУ*, шину даних *ШД* та шину адресів *ША*. Мікропроцесор, зчитуючи послідовно команди з *ПЗП*, організує процедуру вимірювань, здійснює управління роботою всіх вузлів, проводить арифметичні і логічні операції з даними, які поступають з *АЦП* на шину даних *ШД* через інтерфейс вводу. Програма роботи мікропроцесора, складена виробником приладу, зберігається в *ПЗП* і не “стирається” при відключенні живлення приладу. В *ПЗП* містяться деякі константи, які використовуються при виконанні підпрограм, а також числа, необхідні для автокалібровки. *ОЗП* служить для тимчасового зберігання даних вимірювання, проміжкових результатів та результатів, що виводяться на *ПВ*. Сигнали, що виставляються на шину адресів *ША*, дозволяють однозначно визначити пристрої, які обмінюються інформацією. Шина управління *ШУ* переносить сигнали, які визначають режим роботи того чи іншого вузла, а по шинах даних *ШД* передається цифрова інформація. Висока точність мікропроцесорних ЦВП забезпечується, наприклад, автоматичною корекцією похибок. Вона, зокрема, може здійснюватися автоматичним періодичним вмиканням до входу приладу каліброваної взірцевої міри

вимірюваної фізичної величини та визначенням поправок, які враховуються в кінцевому результаті і поступають через пристрій відліку *ПВ* до споживача інформації.

В *ПЗП* можуть бути вміщені спеціальні тестові програми, які дозволяють оцінити стан всіх функціональних вузлів. При цьому у випадку необхідності виводиться повідомлення оператору про можливі неполадки. Особливо слід відмітити, що підвищення метрологічних характеристик, а також значне звільнення оператора від монотонних одноманітних операцій в мікропроцесорних ЦВП, досягається не внесенням додаткових вузлів, тобто апаратних засобів, а шляхом все більш досконаліх програм та алгоритмів роботи ЦВП в цілому.

2. Методика виконання експерименту

У цифрових вимірювальних приладах результати вимірювань представлені в цифровому вигляді; при цьому, на відміну від аналогових приладів, показання ЦВП змінюються дискретно на одиницю молодшого розряду. Це призводить до ряду особливостей визначення та подання метрологічних характеристик цифрових вимірювальних приладів.

До основних метрологічними характеристиками ЦВП відносяться: статична характеристика перетворення, крок квантування (квант) або одиниця молодшого розряду, основна інструментальна похибка.

Статична характеристика перетворення встановлює зв'язок між перетворюваною вхідною величиною X і результатом перетворення $X_{П}$ (показами ЦВП), який може приймати тільки квантовані дискретні значення $X_{П} = Nq$, де N - десяткове ціле число, q - крок квантування (квант) величини X . У цьому відмінність ЦВП від аналогових засобів вимірювань, покази яких можуть приймати безперервний ряд значень у певному діапазоні. Звідси впливає ступінчаста форма подання статичної характеристики перетворення.

Статична характеристика перетворення ідеального ЦВП (рис. 16) одержується при квантуванні вимірюваної величини шляхом ототожнення її з найближчим за значенням рівнем квантування. Зміни показань $X_{П} = Nq$ ідеального ЦВП на одиницю молодшого розряду q відбуваються при фіксованих значеннях вхідної величини, рівних $(N - 0,5) q$, де $N = 1, 2, 3, \dots$ (ціле число).

Статична характеристика перетворення ідеального ЦВП визначається значенням одиниці молодшого розряду показів (використовується також термін розділення), рівним кванту q . Значення кванта q для ідеального ЦВП пов'язано з межею вимірювань X_{MAX} і максимальним числом N_{MAX} рівнів квантування співвідношенням $q = X_{MAX}/N_{MAX}$. Наприклад, для цифрового мультиметра D830 $q = X_{MAX}/(2 \cdot 10^n)$, де X_{MAX} – межа вимірювань, n – число розрядів відлікового пристрою.

Статична характеристика перетворення реального ЦВП відрізняється від статичної характеристики ідеального. Причина цього – наявність інструментальних похибок ЦВП. Розходження проявляється в тому, що зміна показів реального ЦВП відбувається при значеннях вхідної величини X_N , відмінних від значень $(N - 0,5) \cdot q$. У загальному випадку абсолютна основна похибка ЦВП дорівнює

$$\Delta X = X_{II} - X,$$

де X_{II} – покази ЦВП, X – дійсне значення вимірюваної величини.

Для реального ЦВП ця похибка включає як методичну похибку квантування, так і інструментальну похибку.

Абсолютна інструментальна похибка визначається для конкретних показів ЦВП $X_{II} = Nq$ (рис. 16) по відмінності реальної характеристики ЦВП від ідеальної

$$\Delta X_{IN} = X_{II} - 0,5q - X_N, \quad (16)$$

де X_N – значення вхідної величини, при якому відбувається зміна показів X_{II} ЦВП (покази змінюються на одиницю молодшого розряду).

У цій лабораторній роботі досліджується цифровий мультиметр М-830 який призначений для вимірювання:

- постійного і змінного напруги,
- постійного струму,
- опору,
- перевірки діодів і транзисторів.

Мультиметр забезпечений захистом від перевантаження на всіх межах вимірювань і індикацією розряду батареї.

На передній панелі приладу розташовані перемикач функцій і діапазонів, який використовується як для вибору функцій і бажаної межі вимірювань так і для виключення приладу, 3,5-розрядний 7-сегментний рідкокристалічний індикатор висотою 0,5 дюйма, гніздо "COMMON" (загальний) для чорного (негативного) дроту-щупа,

гніздо «V, W, mA» для червоного (позитивного) дроту-щупа для вимірювання всіх напруг, опорів і струмів (крім 10 А), гніздо «10А».

Розрядність шкали мультиметра: 2000 відліків. Межі вимірювань:

- постійної напруги – 200 мВ, 2 В, 20 В, 200 В: $\pm 0,5\%$, 1000 В: $\pm 0,8\%$;
- змінної напруги – 200В, 600 В: $\pm 1,2\%$;
- постійного струму – 2 мА, 20 мА: $\pm 1,0\%$, 200 мА: $\pm 1,5\%$, 10 А: $\pm 3\%$,
- опору: 200 Ом, 2 кОм, 20 кОм, 200 кОм $\pm 0,8\%$, 2 МОм $\pm 1,0\%$.
- коефіцієнта підсилення транзисторів по струму: 1 - 1000.

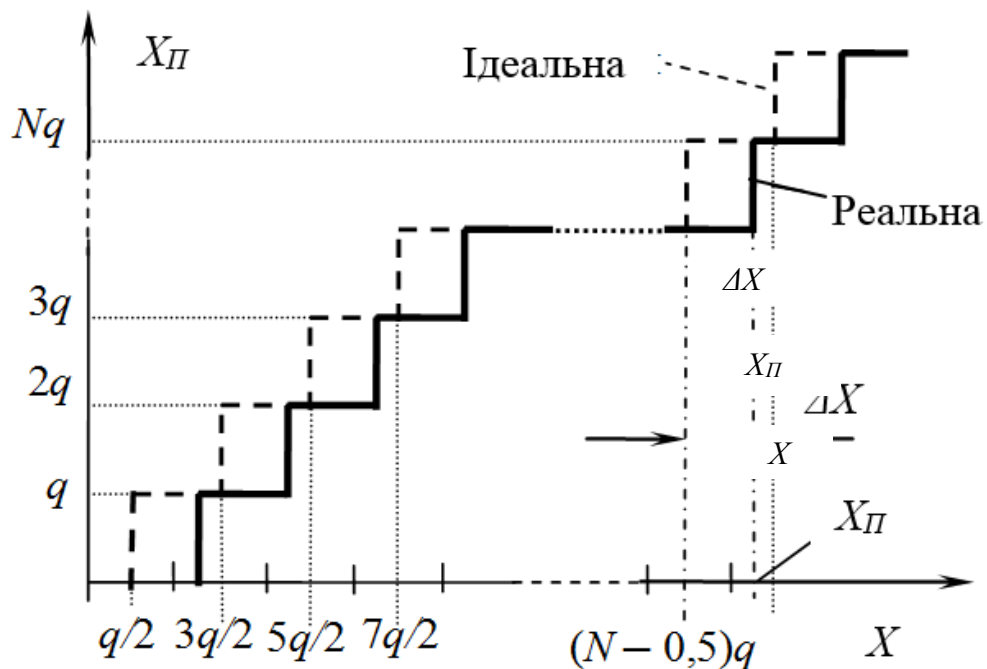


Рис. 16. Ідеальна та реальна статичні передавальні характеристики цифрового вимірювального приладу

3. Завдання та хід виконання роботи

Для виконання завдання:

- ознайомитися з інструкцією та застосуванням досліджуваного цифрового мультиметра М-830. Визначити крок квантування (квант) досліджуваного цифрового вимірного приладу в режимі омметра для різних (за вказівкою викладача) меж вимірювання, визначити для цієї межі значення одиниці молодшого розряду q . Для цього на вхід ЦВП необхідно підключити високоточний магазин опорів МСР-60М і зафіксувати величину зміни його опору, при якому змінюються покази молодшого розряду досліджуваного омметра. Визначити одиницю молодшого розряду магазину q_M , перевірити виконання умови $q \gg q_M$,

за цієї умови можна знехтувати дискретним характером зміни опору магазину.

- експериментально визначити наступні метрологічні характеристики цифрового вимірювального приладу в режимі омметра:

1. Похибки квантування для початкової ділянки статичної характеристики перетворення; побудувати графік похибки квантування. Для цього необхідно встановити нульове значення опору магазину R , потім при плавній зміні опору магазину (мінати опір магазину з мінімально можливим кроком) стежити за зміною показів, фіксуючи при цьому конкретні значення опору магазину R , при яких покази ЦВП R_{Π} змінюються на одиницю молодшого розряду.

Наприклад, на межі 2 кОм при появі показань $R_{\Pi} = 0,001; 0,002; 0,003 \dots$ кОм (всього 8-9 значень) фіксувати відповідні значення опорів R магазину.

Результати вимірювань записати в таблицю 1.

Таблиця 1. Початкова ділянка статичної характеристики цифрового омметра.

№ вимірювання	R_{Π} , кОм	R , кОм	ΔR_{Π} , кОм
0	0,000		
1	0,001		
2	0,002		
3	0,003		
4	0,004		
5	0,005		
6	0,006		
7	0,007		
8	0,008		
9	0,009		

За цим значенням побудувати початкову ділянку графіка статичної характеристики ЦВП в режимі омметра $R_{\Pi} = F(R)$ і графік абсолютної основної похибки

$$\Delta R (R_{\Pi}) = F(R) - F_{\Pi}(R) = F(R) - R, \quad (17)$$

де $F_{\text{Л}}(R) = R$ – лінійна характеристика ідеального (без квантування) омметра у вигляді прямої лінії R .

2. Статичну характеристику перетворення для всього діапазону вимірювань; для цього побудувати графік залежності показання $R_{\text{Л}}$ приладу від значень R вимірюваних опорів $R_{\text{Л}} = f(R)$. Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю, аналогічну таблиці 1.

3. Інструментальну похибку по всьому діапазону вимірювань для обраної межі вимірювань. Абсолютну інструментальну похибку визначають для 15...20 точок, рівномірно розподілених по обраному діапазону вимірювань. Інструментальна похибка визначається за формулою (17), при цьому значення R - значення опору магазину, при якому відбувається зміна показань $R_{\text{Л}}$ ЦВП на одиницю молодшого розряду у вибраній точці, наприклад на межі 2 кОм, зі значення 1,633 кОм на значення 1,634 кОм. Результати вимірювань занести в таблицю аналогічну таблиці 1.

4. Адитивну і мультиплікативну складові похибки. Для цього побудувати графік залежності інструментальної похибки $\Delta R_{\text{Л}}$ від вимірюваного опору R , виділити смугу похибок вимірюваного значення опору (аналогічно до рис. 1.1, г) та апроксимувати її прямими, які описуються рівнянням

$$\Delta R_M = \pm(a + b \times R), \quad (18)$$

Знайти значення коефіцієнтів a та b і за виразами $d = a/R_N$, $c = b + d$ визначити показники класу точності c/d досліджуваного цифрового омметра. Порівняти одержані результати з параметрами, наведеними у технічній характеристиці приладу, зробити висновки.

Контрольні запитання

- 1 Якими методами можна перетворити аналоговий сигнал у код?
2. Поясніть, що таке десяткова, двійкова та двійково-десяткова системи числення.
3. Назвіть і поясніть роботу основних вузлів цифрових вимірювальних приладів.
4. Поясніть роботу тригера і лічильника імпульсів.
5. Поясніть принцип дії цифрового частотоміра.
6. Поясніть роботу цифрового вольтметра постійного струму.
7. Назвіть основні метрологічні характеристики ЦВП.
8. Поясніть, що таке адитивна і мультиплікативна похибки.
9. Чим можуть бути обумовлені і інструментальні похибки ЦВП.

Лабораторна робота № 3

ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи: Побудова еквіпотенціальних поверхонь електростатичного поля, створеного електродами різної форми методом електролітичної ванни; визначення напруженості електростатичного поля у заданій точці.

Прилади і матеріали: джерело змінного струму, високоомний електронний вольтметр змінного струму на 15–30 В, металевий зонд, набір електродів різної форми, ванна з органічного скла, частково заповнена водою, набір з'єднувальних провідників.

1. Теоретичні відомості

Простір, у якому знаходиться електричний заряд, має певні фізичні властивості. На всякий інший заряд, внесений у цей простір, діє певна сила F . Для розуміння походження і дії цієї сили необхідно допустити наявність між зарядами певного фізичного середовища, через яке і здійснюється взаємодія. Цим середовищем є електричне поле. Поле, яке передає взаємодію нерухомих електричних зарядів, називається електростатичним. Електричне поле – така ж об'єктивна реальність, яка має фізичні властивості, як і речовина, і є певною формою матерії, через яку здійснюються електричні взаємодії. Воно існує незалежно від нашої свідомості і може бути виявлене за його дією на фізичні об'єкти. Будь-який нерухомий електричний заряд q створює у просторі навколо себе електричне поле. Виявити його можна, помістивши поблизу в яку-небудь точку пробний заряд. Пробним називають такий заряд, який використовують як індикатор при зондуванні досліджуваного поля. За пробний заряд прийнято використовувати позитивний заряд. Оскільки електричне поле існує навколо будь-якого електричного заряду, то пробний заряд має бути таким за величиною, щоб його електричне поле не спотворювало помітно параметри досліджуваного поля. Це означає, що величина пробного заряду повинна бути дуже малою у порівнянні із зарядами, які створюють поле. Стан електростатичного поля в довільній точці простору характеризується наступними параметрами: напруженістю E , індукцією D і потенціалом φ .

Напруженість електростатичного поля є векторною силовою характеристикою електричного поля в його окремих точках простору і чисельно дорівнює відношенню сили F , з якою поле діє на пробний позитивний електричний заряд $+q_{np}$, вміщений у дану точку поля, до величини цього заряду:

$$E = F/q_{np} . \quad (1)$$

Напрямок напруженості поля E визначається напрямом сили, що діє на пробний заряд (від позитивного заряду до негативного). В системі СІ напруженість електричного поля вимірюється у Н/Кл або В/м. За одиницю напруженості електричного поля в СІ взято напруженість у такій точці поля, в якій на заряд в 1 Кл діє сила в 1 Н. Виходячи із закону Кулона та формули (1), одержимо формулу напруженості електростатичного поля точкового заряду на відстані r у вакуумі:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^3} \cdot \vec{r} , \quad (2)$$

де \vec{r} – радіус-вектор, проведений від заряду q в досліджувану точку з координатами x, y, z .

Потенціал електростатичного поля в певній його точці – це скалярна величина, яка чисельно дорівнює відношенню потенціальної енергії W_{II} системи поле-заряд у розглядуваній точці до величини q_{np} цього заряду:

$$\varphi = W_{II}/q_{np} . \quad (3)$$

Величина потенціалу визначається роботою, яку виконують сили електричного поля при переміщенні пробного одиничного позитивного заряду із заданої точки поля в нескінченність:

$$\varphi = A/q_{np} . \quad (4)$$

В системі СІ $[\varphi] = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл} = 1 \text{ В}$. Значення потенціалу в 1 В приписують такій точці поля, при переміщенні з якої заряду в 1 Кл в нескінченність виконується робота в 1 Дж.

Характерною особливістю електричних полів є те, що в них справедливий принцип суперпозиції. Це означає, що якщо електричне поле створене сукупністю нерухомих точкових зарядів $q_1, q_2 \dots q_i$, то напруженість результуючого електричного поля дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створених кожним із цих зарядів окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_i = \sum_{k=1}^i \vec{E}_k . \quad (5a)$$

Потенціал результуючого електричного поля, створеного кількома зарядами, дорівнює скалярній сумі потенціалів, створених кожним із цих зарядів окремо:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_i = \sum_{k=1}^i \varphi_k . \quad (5б)$$

Графічно електростатичне поле зображають за допомогою екіпотенціальних поверхонь та силових ліній або ліній напруженості.

Екіпотенціальною поверхнею, тобто поверхнею рівного потенціалу, називають геометричне місце точок поля з однаковим потенціалом ($\varphi = \text{const}$). Ці поверхні зручно будувати так, щоб при переході від однієї екіпотенціальної поверхні до сусідньої потенціал змінювався на те саме значення $\Delta\varphi$, наприклад 1 В. Робота по переміщенню заряду в електричному полі визначається за формулою:

$$\Delta A = q \times E \times \Delta S \times \cos\alpha, \quad (6)$$

де α – кут між напрямком сили F і переміщення ΔS . Очевидно, що робота по переміщенню заряду по екіпотенціальній поверхні дорівнює нулю, оскільки дорівнює нулю різниця потенціалів двох точок екіпотенціальної поверхні, отже, справедливе співвідношення:

$$\Delta A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q \times E \times \Delta S \times \cos\alpha = 0. \quad (7)$$

Силовою лінією електростатичного поля називають уявну лінію, в кожній точці якої напрям дотичної збігається з напрямком вектора напруженості поля (рис. 1, а). Силовим лініям приписують певний напрямок, позначаючи його на рисунку стрілкою. Силові лінії починаються на позитивно заряджених тілах і закінчуються на негативно заряджених (рис. 1, б, в) і, отже, не можуть бути замкнутими.

Приклади графічного зображення електричних полів, утворених точковими зарядами за допомогою ліній напруженості, показано на рис. 1 і 2. Якщо поле створене відокремленим позитивно зарядженим тілом (рис. 1, б), то лінії напруженості поля мають вигляд радіальних прямих, які починаються на поверхні зарядженого тіла і простягаються у нескінченність. Поле відокремленого негативно зарядженого тіла зображають радіальними прямими, які беруть початок у нескінченності і закінчуються на його поверхні (рис. 1, в).

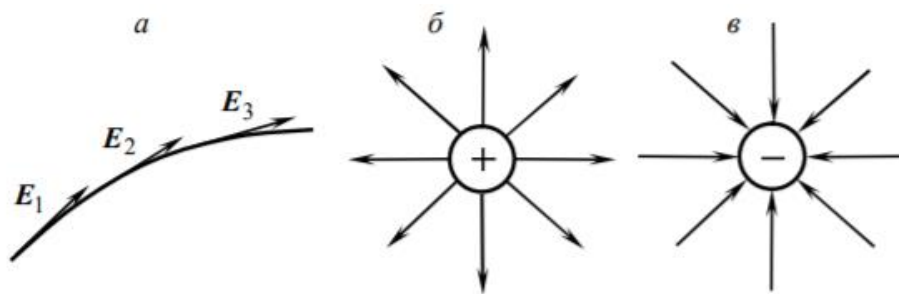


Рис. 1. До визначення силової лінії електростатичного поля (а) та силових ліній електростатичного поля точкового заряду (б, в).

Щоб за допомогою ліній напруженості задавати графічно не тільки напрям, але і величину напруженості поля, умовилися на графіках поля проводити силові лінії з певною густиною, а саме так, щоб число силових ліній, які проходять через одиницю площі поверхні, перпендикулярної до силових ліній, дорівнювало (або було пропорційне) величині напруженості поля в даному місці. Якщо напруженість E в усіх точках виділеного простору є однаковою за напрямком і абсолютним значенням, то таке поле називають однорідним. Однорідне електричне поле існує, наприклад, в просторі між різнойменно зарядженими пластинами плоского конденсатора (рис. 2, г).

При переміщенні заряду q по екіпотенціальній поверхні його енергія не змінюється, а отже робота не виконується (див. формулу (7)), водночас ні напруженість E , ні переміщення ΔS не дорівнюють нулю, а це означає, що $\cos \alpha = 0$ ($\alpha = \pi/2$). Напрямок сили F або співпадає з напрямком напруженості, або протилежний йому. Рівність $\cos \alpha = 0$ означає, що напрям вектора напруженості перпендикулярний до екіпотенціальної поверхні. Отже, лінії напруженості (силові лінії) являють собою ряд ліній, перпендикулярних до екіпотенціальних поверхонь.

Якщо уявно зобразити перетин екіпотенціальних поверхонь електростатичного поля якою-небудь площиною (наприклад, площиною рисунка), то отримаємо замкнуті лінії, які називаються екіпотенціальними лініями. Характер силових ліній і екіпотенціальних поверхонь залежить від геометричних форм і розмірів зарядженого тіла. На рис. 2 зображені плоскі перерізи найпростіших електростатичних полів: а) позитивного точкового заряду; б) диполя; в) двох однойменних точкових зарядів і г) плоского конденсатора.

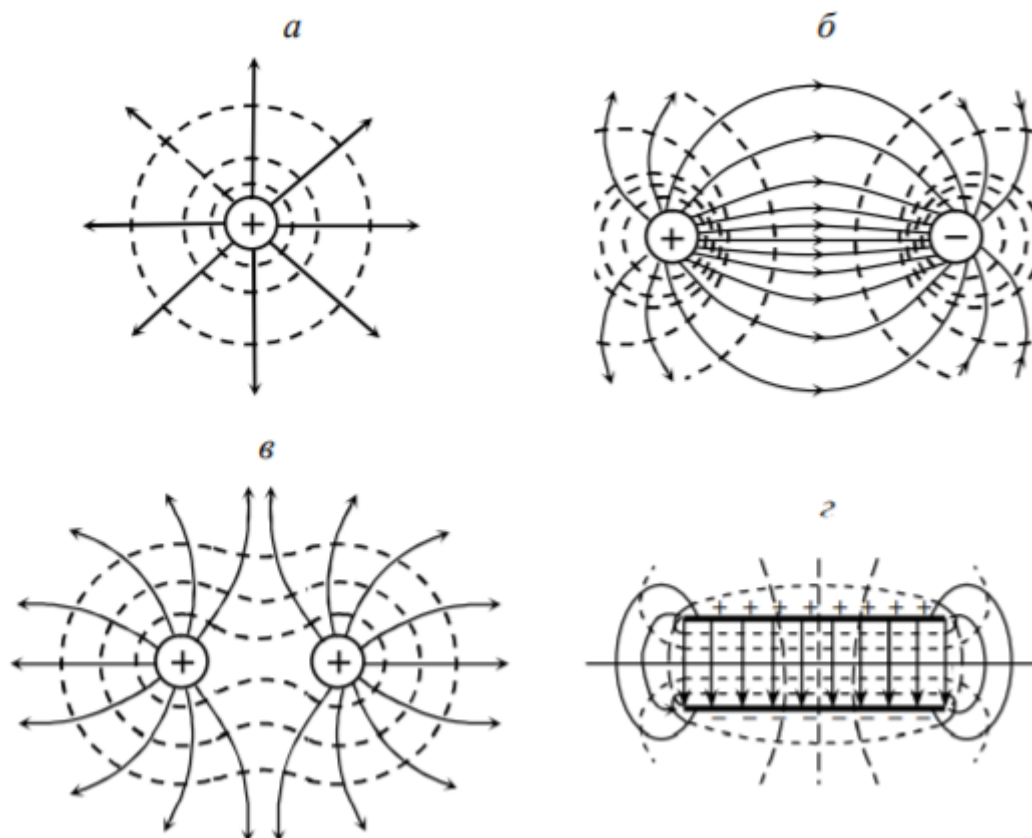


Рис. 2. Силові лінії (суцільні) і екіпотенціальні лінії (пунктирні) електричного поля: *a* – точкового заряду; *б* – двох різнойменно заряджених металевих куль; *в* – двох однойменно заряджених металевих куль; *г* – плоского конденсатора.

Зображуючи поле графічно, необхідно пам'ятати, що лінії напруженості електростатичного поля мають такі особливості: 1) ніде не перетинаються (в жодній точці поля); 2) починаються з поверхні позитивно зарядженого тіла (або в нескінченності) і закінчуються на поверхні негативно зарядженого тіла (або в нескінченності), тобто вони є незамкненими лініями; 3) їх густина пропорційна E . Ортогональність силових ліній і поверхонь рівного потенціалу істотно полегшує як експериментальне, так і теоретичне вивчення електростатичного поля. Теоретично, як правило, легше проводити розрахунок потенціалів, ніж напруженостей поля, бо вони є величини скалярні, а напруженості – векторні. Експериментально виміряти потенціали також виявляється простіше, ніж напруженості поля, оскільки переважна більшість електровимірювальних приладів, придатних для вивчення полів, вимірюють різницю потенціалів поля, а не напруженостей цього поля. Силові лінії досліджуваних полів будуються опісля як ортогональні до експериментально знайдених поверхонь рівного потенціалу.

2. Методика проведення експерименту

Електростатичне поле моделюється електричним полем стаціонарних струмів, оскільки силові лінії електростатичного поля збігаються з лініями стаціонарних струмів між такими самими за формою електродами як заряджені тіла. При цьому струм зручно пропускати через електроліт, що дозволяє легко змінювати розташування електродів. Використання методу електролітичної ванни дозволяє дослідження поля нерухомих зарядів замінити моделюванням поля струму і дає суттєві експериментальні переваги. Серед них - можливість використання змінної напруги. Якщо на електроди подавати постійну напругу, то у електроліті будуть текти постійні струми, що супроводжуються електролізом і виділенням на електродах складових частин електроліту. Ці струми порушували б однорідність електроліту, призводячи до поляризації електродів і до зміни напруги між ними. Окрім того, при цьому використовуються прилади для вимірювання напруги (різниці потенціалів), які набагато зручніші й надійніші електрометрів. Також розподіл струмів і напруг у ванні є нечутливим до сторонніх електростатичних впливів.

Експериментальна установка (рис. 3) – це електролітична ванна, виготовлена із матеріалу з добрими електроізоляційними властивостями (наприклад, із оргскла). У ванну опускають два металеві електроди A і B , поле між якими належить вивчити, і наливають воду із водопровідного крану шаром завтовшки ~ 5 мм. Електропровідність такого шару води складає 10^{-3} – 10^{-2} Ом $^{-1}$ м $^{-1}$, а електропровідність матеріалу електродів A і B – 10^7 Ом $^{-1}$ м $^{-1}$. Форма і взаємне розташування електродів повинні бути точно такими ж, як і в електростатичному полі, яке моделюють. Електроди опираються на дно ванни і виступають над поверхнею налитого у ванну електроліту. Для того щоб стінки ванни менше спотворювали досліджуване поле, лінійні розміри ванни повинні у кілька разів перевищувати відповідні лінійні розміри досліджуваної ділянки поля. На електроди A і B подають змінну напругу, рівну різниці потенціалів між зарядами електростатичного поля. Як правило, електроди A і B з'єднуються з джерелом змінної ЕРС низької частоти 50 Гц. У

цьому випадку, враховуючи, що відстань між електродами невелика, можна вважати, що потенціал у всіх точках досліджуваного поля змінюється синхронно і екіпотенціальні поверхні залишаються незмінними. Через те, що вода має незначну електропровідність у порівнянні з електропровідністю матеріалу електродів, електроди можна вважати екіпотенціальними. Це положення є принциповою і необхідною умовою для того, щоб електричне поле квазістаціонарного струму було однаковим з електростатичним полем між цими ж електродами.

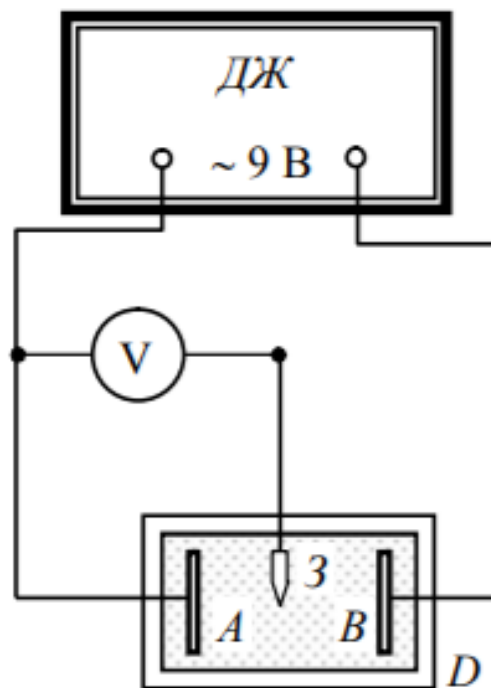


Рис. 3. Схема досліду для вивчення електростатичного поля: *ДЖ* – джерело живлення; *V* – електронний вольтметр з високим входним опором; *A* і *B* – електроди; *D* – ванна з водою; *З* – металевий зонд

Для вивчення розподілу потенціалів між електродами у ванну опускають металевий зонд *З*, яким служить кінчик тонкої металевої дротини. Зонд необхідно підібрати так, щоб він мінімально спотворював своєю присутністю досліджуване поле. У провідному середовищі заряди будуть натікати на зонд і він прийме потенціал тієї точки поля, в яку поміщений. Дно ванни має координатну сітку. Ставлячи зонд у точки з певними координатами, за допомогою

вольтметра визначають потенціали цих точок відносно одного з електродів. При цьому вхідний опір вольтметра повинен значно перевищувати опір ділянки $A3$ ($B3$), що забезпечить незначне, яким можна знехтувати, спотворення досліджуваного електричного поля. Маючи картину розподілу потенціалу досліджуваного поля, можна провести екіпотенціальні лінії та лінії напруженості поля.

3. Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Дослідження поля площинних електродів

1. Заповнити дно ванни шаром водопровідної води.
2. Помістити у ванну два площинні електроди і зібрати електричну схему установки згідно з рис. 3. Забезпечити симетричне розташування електродів щодо координатної сітки ванни.
3. Підготувати лист міліметрового паперу, який відповідає розмірам координатної сітки, розташованої на дні ванни. Відмітити на ній положення електродів і координатних осей.
4. Увімкнути джерело живлення в мережу.
5. Поставити зонд у точку, яка знаходиться поблизу одного з електродів на осі симетрії розташування електродів (координатної осі), записати покази вольтметра і нанести на міліметровий папір точку із знайденим значенням потенціалу.
6. Зміщуючи зонд, знайти координати інших точок, які мають ті ж самі значення потенціалу. Крайні точки повинні вибиратись якомога далі від координатної осі. Записати у таблицю і відмітити на міліметровій сітці знайдені значення.
7. Сполучити на рисунку експериментальні точки з однаковим значенням потенціалу (їх повинно бути не менше 10).
8. Повторити такі самі вимірювання для інших сталих значень потенціалу, для чого зонд перемістити вздовж координатної осі з кроком 1–2 см. У просторі між електродами необхідно отримати не менше 7–8 ліній рівного потенціалу.
9. За отриманою системою екіпотенціальних ліній провести на рисунку кілька ліній напруженості (перпендикулярних у кожній точці до ліній рівного потенціалу).
10. Побудувати графік розподілу потенціалу φ поля між електродами. Значення потенціалу вибрати для точок, які лежать на координатній осі, що з'єднує електроди. Початок відліку координат

сумістити з поверхнею електрода, поблизу якого зареєстрований менший потенціал.

11. Користуючись побудованим графіком, методом числового диференціювання знайти напруженість E поля для різних значень x , знаючи, що

$$E = -\Delta\varphi/\Delta x, \quad (13)$$

де $\Delta\varphi$ – зміна потенціалу на відрізку Δx , ($\Delta x = (5 - 10)$ мм). Розрахунок за формулою (13) здійснити наступним чином. Вибравши значення x_1 , встановити на графіку значення φ_1 , що відповідає значенню x_1 , потім значення φ_2 для $x_2 = x_1 + \Delta x$. Поділивши $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ на Δx , отримаємо числове значення напруженості E поля, яке слід віднести до середини вибраного інтервалу (x_1, x_2). Розрахунок виконати для 5 -7 значень x , які охоплюють увесь інтервал відстаней між електродами. Результати обчислень занести у відповідну таблицю.

12. Побудувати графік розподілу напруженості E електричного поля між електродами.

Завдання 2. Вивчення напруженості електростатичного поля

1. Виміряти потенціал φ_M електростатичного поля у певній вказаній викладачем точці M з координатами (x_0, y_0) .

2. Перемістити заряд у точку K з координатами (x_0+a, y_0) та точку L з координатами (x_0, y_0+a) і виміряти відповідні потенціали φ_K і φ_L цих точок. Зазвичай вибирають $a = 10$ мм.

3. Обчислити складові напруженості електричного поля по осях x, y за формулами: $E_x = (\varphi_K - \varphi_M)/a$; $E_y = (\varphi_L - \varphi_M)/a$, і в масштабі побудувати їх на графіку.

4. Визначити результуючу напруженість поля в точці M .

Завдання 3. Дослідження поля циліндричних електродів

1. Замінити площинні електроди циліндричними або на вказані викладачем, наприклад, один площинний, інший циліндричний.

2. Дослідити електростатичне поле циліндричних електродів згідно пунктів Завдання 1 та Завдання 2.

Контрольні запитання

1. Що є джерелом електростатичного поля? Якими параметрами характеризується електростатичне поле?

2. Як графічно зображують електростатичне поле? Що називається лінією напруженості електростатичного поля та лінією електростатичного зміщення?

3. Дайте визначення еквіпотенціальної поверхні. Як розташовані силові лінії щодо до еквіпотенціальних поверхонь?

4. Сформулювати та записати умови потенціальності електростатичного поля.

5. Які експериментальні методи використовують для вивчення електростатичного поля? У чому полягають труднощі електростатичних вимірювань?

6. Як створюється модель електростатичного поля в даній задачі? Які експериментальні переваги має ця модель? Як на практиці використовується метод подібності потенціальних полів?

7. Як впливає на електростатичне поле внесення у нього металевих та діелектричних тіл?

Лабораторна робота № 4

ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ РЕЗИСТОРА МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА-ВОЛЬТМЕТРА ТА ЗА ДОПОМОГОЮ МІСТКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: Вивчення методів та засобів вимірювання малих, середніх та великих опорів. Вимірювання опорів середньої величини методом амперметра-вольтметра і методом порівняння за допомогою містка постійного струму; перевірка справедливості формул паралельного та послідовного з'єднання опорів.

Прилади і матеріали: вольтметр магнітоелектричної системи, міліамперметр магнітоелектричної системи, джерело живлення, нуль-гальванометр, магазин опорів, реохорд (реостат дротяний) з трьома затискачами, невідомі електричні опори для вимірювання, з'єднувальні провідники з наконечниками.

1. Теоретичні відомості

За аналогією з тим, як тертя у механіці створює протидію рухові тіл, опір провідника створює протидію напрямленому руху зарядів і визначає перетворення електричної енергії у внутрішню енергію провідника. *Електричний опір* – фізична величина, яка характеризує протидію впорядкованому руху носіїв струму в електричному колі або окремій його ділянці. Електричним опором називають і сам елемент кола, що чинить цю протидію. Механізм електричного опору в різних середовищах різний. Електричний опір металів зумовлений розсіюванням електронів на структурних неоднорідностях та на теплових коливаннях кристалічної ґратки, в електролітах – в'язкий опір сольватам, у газах – зіткнення електронів та іонів з атомами середовища, тощо. Опір – один з найважливіших параметрів електричного кола. Опір однорідного провідника визначається геометричними розмірами провідника, хімічною природою матеріалу та його фізичним станом (температура, тиск). За величиною опори дуже різняться і їх умовно поділяють на три групи: малі опори (10 Ом і менше), середні (від 10 до 10^6 Ом) і великі (вище 10^6 Ом), у кожній із цих груп способи вимірювання опорів мають певні особливості. Опір – параметр пасивний, однак в процесі вимірювання він перетворюється в активну електричну величину, яку вимірюють на практиці. При цьому важливо забезпечити, щоб отримана активна електрична

величина правильно відображала вимірюваний опір і не містила б зайвих складових, які складають похибки вимірювання. Зокрема на результат вимірювання малих опорів впливають опори з'єднувальних провідників, перехідні опори контактів і контактні термо-ЕРС. Перехідним опором або опором на контактах називають опір, який зустрічає електричний струм при переході з одного провідника на другий. Перехідний опір залежить від величини поверхні дотику, від її характеру і стану – гладка чи шорстка, чиста або забруднена, і, нарешті, від сили натискання і зчеплення. Використання струмових і потенціальних затискачів при вимірюванні малих опорів є основним засобом усунення впливу з'єднувальних провідників і перехідних опорів на результат вимірювання.

Ще однією особливістю вимірювання малих опорів є те, що у місцях контактів можлива поява термо-ЕРС. Як відомо, термо-ЕРС утворюється у місцях з'єднання двох різнорідних провідників, вона залежить від матеріалу провідників і температури місця їх з'єднання і в ряді випадків досягає десятків мікрвольт. Основні засоби боротьби з термо-ЕРС полягають у вирівнюванні температури потенціальних затискачів (якщо різниця температур між потенціальними затискачами дорівнює нулю, то і термо-ЕРС між ними відсутня), а також у проведенні двох вимірювань напруги U при різних напрямках струму I . При вимірюванні великих опорів необхідно враховувати наявність об'ємного R_V і поверхневого R_S опорів, враховувати або усувати вплив температури, вологості середовища та інших факторів. Відповідно розрізняють питомі об'ємні і поверхневі опори (r_V і r_S). Значення цих опорів можуть відрізнятися між собою для одного й того ж матеріалу досить помітно – на кілька порядків. Основні вимоги до методів визначення об'ємних і поверхневих опорів стандартизовані. Згідно з стандартами для визначення r_V і r_S плоских виробів повинні використовуватися круглі або квадратні зразки з діаметром кола або стороною квадрата від 25 до 150 мм. Трубочаті зразки повинні мати довжину від 100 до 300 мм, у вигляді стержня – від 50 до 100 мм. Принципова схема вимірювання об'ємного і поверхневого опорів показана на рис. 1. В обох випадках зразок забезпечується трьома електродами, які носять назви: високовольтний B , вимірювальний I і охоронний O . При вимірюванні об'ємного опору напруга прикладається до електродів B і I , які розташовані на протилежних сторонах зразка, і визначається опір товщі зразка між ними. Це може бути зроблено, наприклад, шляхом вимірювання струму в цьому колі

за допомогою електрометричного підсилювача (ЕМП) з паралельним від'ємним зворотним зв'язком, як це показано на рис. 1, а.

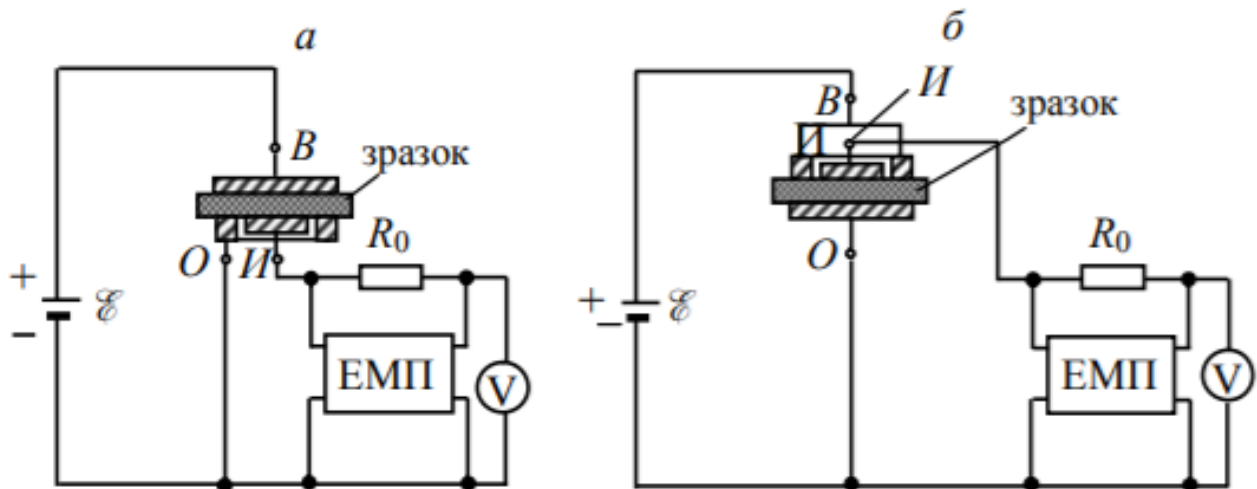


Рис. 1. Схеми вимірювання об'ємних (а) і поверхневих (б) опорів.

Охоронний електрод O має два призначення. По-перше, він вирівнює електричне поле на краях вимірювального електрода, зменшуючи вплив крайових ефектів. По-друге, він захищає вимірювальне поле від струмів витоку по поверхні зразка. Електрод O повинен бути з'єднаний з такою точкою схеми, яка б не чинила на результати вимірювання істотного впливу. При вимірюванні поверхневих опорів (рис. 1, б) вимірюється опір між електродами, розташованими на одному боці зразка (B і $И$). Охоронний електрод (O) розташовується на протилежній боці зразка, і за його допомогою вирівнюється електричне поле у зразку. Цим виключається проходження струму між електродами B і O по товщині зразка. Вимірювання опорів рідких провідників або провідників, які мають велику вологість, наприклад, опорів заземлення, здійснюється на змінному струмі, оскільки використання постійного струму пов'язане з похибками, які викликані явищем електролізу. Вимірювання опорів твердих провідників здійснюється на постійному струмі, при цьому, з одного боку, виключаються похибки, зв'язані з впливом ємності та індуктивності об'єкту вимірювання і вимірювального кола, з іншого боку, з'являється можливість використовувати прилади магнітоелектричної системи, які мають високу чутливість і точність.

На практиці вимірювання опорів здійснюють прямими та посередніми методами, а також методом порівняння.

2. Методика проведення експерименту

2.1. Прямі та посередні методи вимірювання опорів. Метод амперметра - вольтметра

Цей метод заснований на вимірюванні струму I у колі досліджуваного опору R_x і напруги U на його затискачах з наступним обчисленням значення R_x за показами вимірювальних приладів:

$$R_x = U/I. \quad (1)$$

Як правило, струм I вимірюють амперметром, а напругу U вольтметром - цим пояснюється назва методу: метод "амперметра-вольтметра". До переваг даного методу слід віднести його простоту; до недоліків – порівняно невисоку точність результату вимірювання, яка обмежена класом точності вимірювальних приладів та *методичною похибкою*. Остання зумовлена кінцевими значеннями власних опорів амперметра R_A і вольтметра R_V . У залежності від величини досліджуваного опору використовують різні схеми з'єднання приладів при вимірюванні опорів методом амперметра-вольтметра. В одній із них (рис. 2, а) послідовно з досліджуваним опором увімкнений міліамперметр, який показує суму струмів I_V і I . Отже, результат вимірювання R , обчислений за показами приладів, буде відрізнятися від R_x :

$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I_{R_x} + I_V} = \frac{U_V}{U_V/R_x + U_V/R_V} = \frac{R_x}{1 + R_x/R_V}. \quad (2)$$

Відносна похибка вимірювання в процентах:

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} \cdot 100\% = \frac{R_x/R_V}{1 + R_x/R_V} \cdot 100\% \approx -\frac{R_x}{R_V} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Тут наближена рівність справедлива, бо при правильній організації експерименту виконується умова $R_V \gg R_x$.

При використанні другої схеми (рис. 2, б) амперметр показує значення струму в колі з R_x , а вольтметр – суму спадів напруги на R_x і амперметрі U_A . Враховуючи це, можна за показами приладів обрахувати результат вимірювання:

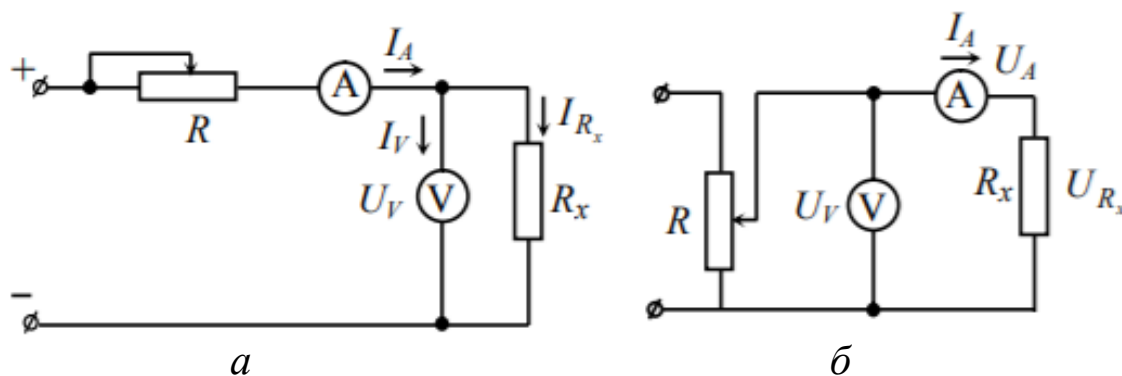


Рис. 2. Схеми для вимірювання малих (а) і великих (б) опорів методом амперметра-вольтметра.

$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_{R_x} + U_A}{I_A} = \frac{I_A \cdot R_x + I_A \cdot R_A}{I_A} = R_x + R_A. \quad (4)$$

Відносна похибка вимірювання у процентах у даному випадку рівна:

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} \cdot 100\% = \frac{R_A}{R_x} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Порівнюючи одержані вирази відносних похибок (3) і (5), можна зробити такі висновки. За схемою рис. 2, а на методичну похибку результату вимірювання впливає тільки опір R_V , для зменшення якої необхідно забезпечити умову $R_x \ll R_V$. За схемою рис. 2, б на методичну похибку результату вимірювання впливає тільки R_A , зменшення цієї похибки досягається виконанням умови $R_x \gg R_A$. Отже, на практиці вимірювання малих опорів варто проводити за схемою рис. 2 а, а вимірювання великих опорів – за схемою рис. 2, б.

Омметри. Якщо у методі амперметра-вольтметра використати джерело живлення з відомою напругою, то необхідність вимірювання напруги вольтметром відпадає, а шкалу амперметра можна зразу проградувати в значеннях вимірюваного опору. На цьому принципі базується дія багатьох моделей аналогових промислових омметрів безпосередньої оцінки. Омметри різняться за схемою з'єднання досліджуваного опору R_x із вимірювальним механізмом – послідовне (рис. 3, а) і паралельне (рис. 3, б).

Спрощена принципова схема омметра зображена на рис. 3, а містить джерело ЕРС \mathcal{E} , додатковий опір R_D і амперметр (мікроамперметр) A . При приєднанні до затискачів схеми досліджуваного опору R_x в колі потече струм I , під дією якого рухома

частина амперметра повернеться на кут α , а його покажчик відхилиться на N поділок шкали:

$$N = \frac{\mathcal{E}}{C_1} \cdot \frac{1}{R_D + R_A + R_x}, \quad (6)$$

де C_1 – ціна поділки (стала) амперметра; R_A – опір амперметра.

Отже, шкала омметра нелінійна. Стабільність градуювальної характеристики вимагає забезпечення стабільності усіх коефіцієнтів рівняння. Проте джерелом живлення в такого роду приладах, як правило, служить сухий елемент напруги, ЕРС якого зменшується в міру його розрядки. Ввести поправку на зміну \mathcal{E} , як видно із рівняння (6), можна шляхом відповідного регулювання C_1 або R_D . Найбільш часто використовується попередня калібровка омметра зміною R_D при замиканні накоротко ($R_x=0$) входу омметра перед початком вимірювання.

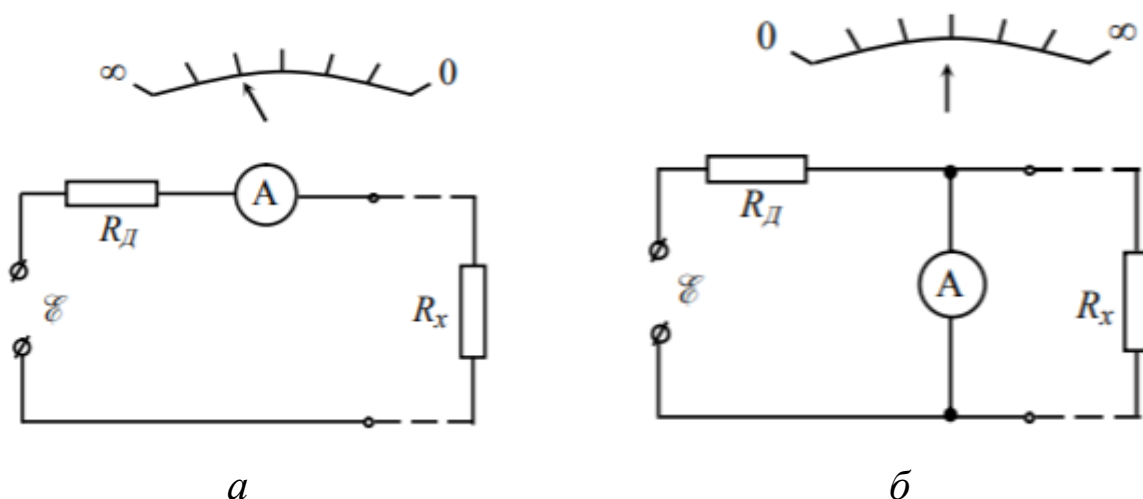


Рис. 3. Схема омметра з послідовним (а) і паралельним (б) вмиканням досліджуваного опору.

Можливий інший спосіб визначення шуканого опору – з'єднання його паралельно з амперметром (рис. 3, б). Залежність між R_x і кутом повороту рухомої частини в такому випадку також нелінійна, хоча нульова позначка на шкалі розташована на крайній лівій точці шкали. Такий спосіб з'єднання досліджуваного опору використовують тільки при вимірюванні малих опорів.

2.2. Вимірювання опорів методами порівняння з мірою

Для вимірювання малих і середніх опорів використовують метод порівняння досліджуваного опору R_x із зразковим R_0 . Ці два опори у схемі, наведеній на рис. 4, а, з'єднані послідовно, тому струм у них однаковий. Величину сили струму регулюють за допомогою резистора R_p так, щоб вона не перевищувала допустимого значення для опорів R_x і R_0 . Оскільки струм сталий, то справедливе співвідношення:

$$U_x/R_x = U_0/R_0, \quad \text{звідки} \quad R_x = R_0 U_x/U_0. \quad (7)$$

Невідомі спади напруг U_x і U_0 вимірюють вольтметром або потенціометром. Результати вимірювань одержують більш точними за умови, якщо опори R_x і R_0 одного порядку величини, а опір вольтметра досить великий, настільки, що приєднання його не впливає на режим основного кола. При вимірюванні малих опорів цим методом вольтметр вмикають за допомогою потенціальних затискачів, які дозволяють виключити опори контактів основного кола із результатів вимірювань. Середні та великі опори можна виміряти методом заміщення (рис. 4, б). Амперметром вимірюють струм, перевівши перемикач Π у положення 1, а потім 2. Напруга на входних затискачах схеми однакова, тому

$$U = I_x \times R_x = I_0 \times R_0, \quad \text{звідки:} \quad R_x = R_0 I_0 / I_x. \quad (8)$$

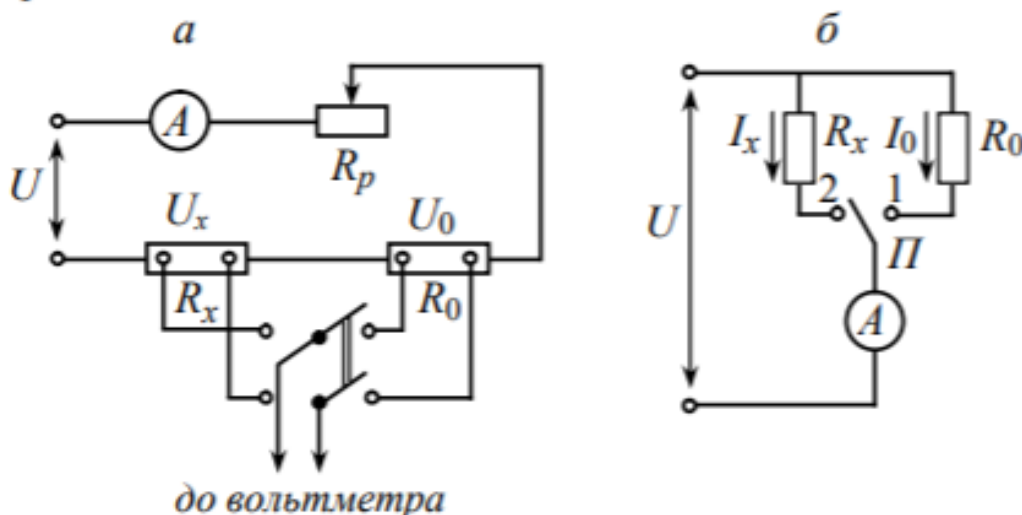


Рис. 4. Схеми вимірювання малих (а) і середніх опорів (б) методом порівняння

Найбільш точні результати при вимірюванні опорів дають місткові схеми, які на практиці використовують у різних варіантах в залежності від величини вимірюваних опорів і необхідної точності вимірювань.

Містком називають електричне коло, в якому можна виділити дві вітки, струм між якими рівний нулю при певному співвідношенні параметрів елементів кола, і рівний певному скінченному значенню, якщо це співвідношення не виконується.

В залежності від характеру опорів пліч, які утворюють місток, і роду струму, який живить місток, розрізняють містки постійного струму і містки змінного струму. Містки струму бувають чотириплечі (одинарні) і шестиплечі (подвійні) в залежності від виду схем (числа плечей). Електрична схема одинарного містка наведена на рис. 5.

Місток містить чотири опори R_1 , R_2 , R_3 і R_4 . Точки A , B , C і D називають вершинами містка, ділянку електричного кола між двома суміжними вершинами – плечем містка, а між двома протилежними вершинами AC або BD – діагоналлю містка. В одну із діагоналей вмикають джерело живлення містка (діагональ AC). Цю діагональ називають діагоналлю живлення. Друга діагональ містить навантаження (діагональ BD), її називають діагоналлю навантаження. У містках постійного струму в цю діагональ вмикають нуль-гальванометр. Місткові кола мають важливу властивість, а саме: при певному співвідношенні опорів плечей містка напруга і струм у діагоналі навантаження повністю відсутні при будь-яких значеннях ЕРС джерела. Такий стан містка називають станом рівноваги, а співвідношення опорів плечей містка, при якому місток зрівноважений, – рівнянням або умовою рівноваги містка.

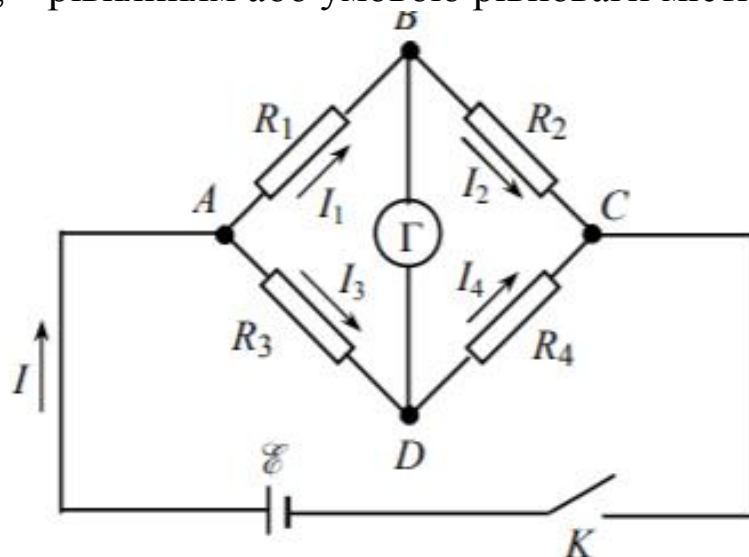


Рис. 5. Схема одинарного містка.

Виразимо умову рівноваги чотириплечого містка через його параметри. У зрівноваженому містку потенціали точок B і D однакові. Отже, однакові і спади напруг на першому і третьому резисторах містка, оскільки точка A є для них спільною. Те ж саме справедливо і для напруг на другому і четвертому резисторах містка, тобто

$$I_1 \times R_1 = I_3 \times R_3; \quad \text{та} \quad I_2 \times R_2 = I_4 \times R_4. \quad (9)$$

При рівновазі містка $U_{BD} = 0$, тому $I_G = 0$. Отже, $I_1 = I_2$, а $I_3 = I_4$. Розділивши почленно рівності (9), одержимо умову рівноваги чотириплечого містка:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (10)$$

Якщо невідомий опір увімкнений, наприклад, у четверте плече $R_x = R_4$, то з виразу (10) знаходимо невідомий опір R_x :

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3. \quad (11)$$

Зазвичай місток врівноважується регулюванням опору R_3 . Відношення опорів R_2 і R_1 утворює у рівнянні рівноваги масштабний множник, значення якого вибирається рівним 10^n , де n – ціле додатне або від'ємне число (також можливе $n = 0$). Третє плече містка називають плечем врівноваження, а друге і перше – плечами відношення. За допомогою пліч відношення вибирають межу вимірювання містка. Отже, якщо задані опори будь-яких трьох плечей і відомо, що місток врівноважений, то з умови рівноваги завжди можна визначити значення шуканого опору у четвертому плечі. Важливою характеристикою містка є його чутливість. Чутливість засобу вимірювання визначають як відношення приросту вихідного сигналу ΔY до зміни вхідного сигналу ΔX , яка викликає цей приріст:

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}. \quad (12)$$

Вхідною величиною є вимірюваний опір. Тому чутливість місткової схеми до струму, напруги або потужності визначають за такими співвідношеннями:

$$S_{MI} = \frac{\Delta I}{\Delta R}; \quad S_{MU} = \frac{\Delta U}{\Delta R}; \quad S_{MP} = \frac{\Delta P}{\Delta R}, \quad (13)$$

де ΔI , ΔU і ΔP відповідно прирости струму, напруги і потужності у діагоналі містка при зміні опору плеча R_x на величину ΔR . При використанні як нуль-індикатор гальванометра магнітоелектричної системи загальну чутливість містка виражають наступним чином:

$$S_{MK} = S_{MI} \cdot S_{I\alpha} = \frac{\Delta I}{\Delta R} \cdot \frac{\Delta \alpha}{\Delta I} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta R} \quad (14)$$

де $\Delta \alpha$ – відхилення покажчика гальванометра, $S_{I\alpha}$ – чутливість гальванометра. На практиці чутливість містка визначають за відносною зміною опору

$$S_{MK}^* = \frac{\Delta \alpha}{\Delta R / R_x}. \quad (15)$$

3. Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Вимірювання опору методом амперметра-вольтметра

Метод амперметра-вольтметра полягає в одночасному вимірюванні вольтметром і амперметром величин спаду напруги на досліджуваному опорі та сили струму, який протікає по ньому. Виміряну величину опору R_B знаходять за законом Ома $R_B = U/I$.

Цей метод використовують, коли не потрібна висока точність вимірювання. Він особливо зручний, якщо треба виміряти опір, який перебуває під напругою або змінює свою величину в процесі нагрівання.

При вимірюванні опору методом амперметра-вольтметра, як уже зазначалось, можливі дві схеми ввімкнення приладів (рис. 2).

Скориставшись схемою рис. 2, б і записавши покази амперметра і вольтметра, можна визначити опір R_B , який буде більший за дійсне значення R_x на величину внутрішнього опору амперметра, оскільки вольтметр вимірює суму спадів напруг на шуканому опорі і на амперметрі. Тому цю схему слід застосувати при вимірюванні опорів, величина яких значно більша за внутрішній опір амперметра. Тоді спад напруги на амперметрі буде порівняно малим і похибкою, яку вносить амперметр, можна знехтувати.

Аналогічно за схемою рис. 2, а знаходять R_B . Проте в цьому випадку результат вимірювання буде меншим за величину R_x , оскільки

сила струму, виміряна амперметром, дорівнює сумі сили струмів у шуканому опорі і вольтметрі. Електричною схемою рис. 2, а користуються при вимірюванні опорів, величина яких значно менша за опір вольтметра, оскільки струм вольтметра буде відносно малим і ним можна знехтувати.

Точніші результати дає вимірювання опору за схемами, наведеними на рис. 2, а і б, з врахуванням тих змін, що їх вносять самі прилади:

$$R_{\text{lx}} = \frac{U_V}{I_A - U_V / R_V}; \quad (a) \qquad R_{\text{lx}} = \frac{U_V - I_A \cdot R_A}{I_A}. \quad (б) \qquad (16)$$

Послідовність виконання завдання

1. Зібрати електричне коло за схемою, зображеною на рис. 2, а. Як досліджуваний опір R_x використати один із наявних на лабораторному макеті опорів. Повзунковий дротяний реостат повинен мати опір ~ 120 Ом, розрахований на силу струму 0,3 А. Джерело живлення постійного струму (випрямляч) повинно забезпечувати напругу на затискачах не менше 24 В і силу струму у колі близько 1 А.

2. Повзунок реостата перемістити у крайнє положення, що відповідає максимальному опорі реостата. Увімкнути випрямляч струму. Переміщуючи повзунок реостата, встановити такий струм у вимірювальному колі, щоб стрілка міліамперметра відхилялася щонайменше на 2/3 шкали приладу. Покази приладів записати у відповідну таблицю.

3. Змінюючи опір реостата, провести вимірювання U та I не менше 5 разів. Після завершення вимірювань вимкнути випрямляч.

4. Зібрати електричне коло за схемою рис. 2 б. Увімкнути джерело живлення і виконати вимірювання аналогічно вказівкам пунктів 2 і 3.

5. За внесеними в таблицю результатами вимірювань визначити опір за повною та спрощеною формулами. Оцінити похибки вимірювань.

Завдання 2. Вимірювання опору містком постійного струму

Схема електричного кола для визначення невідомого опору за допомогою містка Уїтстона, зображена на рис. 6.

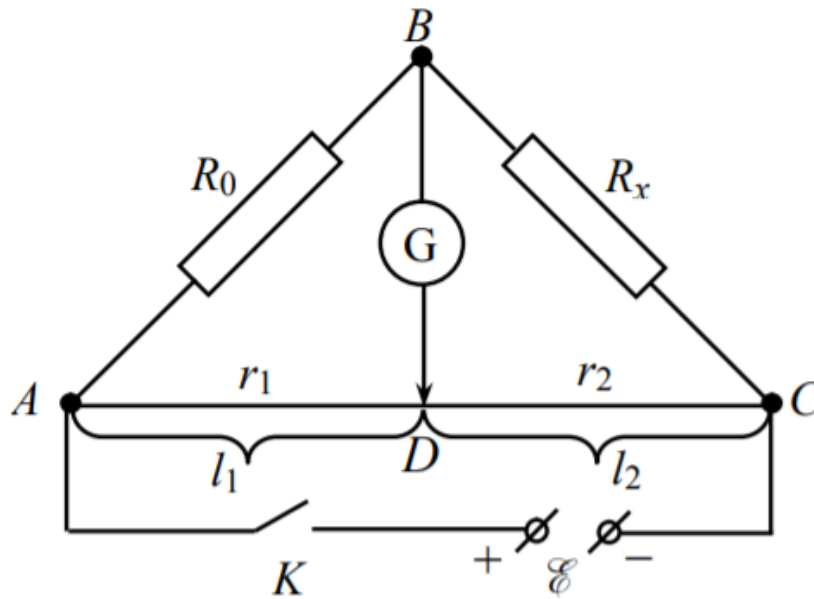


Рис. 6. Схема містка Уїтстона.

У плече містка AB увімкнений магазин опорів R_0 , а у плече BC – вимірюваний опір R_x . Ділянка кола ADC (опори r_1 і r_2) утворена реохордом. По реохорду переміщується ковзний контакт D , який дозволяє змінювати співвідношення між опорами r_1 і r_2 . У діагональ BD увімкнено гальванометр, що має нуль посередині шкали (так званий нуль-гальванометр), а діагональ AC містить джерело струму. Вимірювання опору R_x здійснюють, а) пересуваючи контакт D в таке його положення на реохорді, при якому струм, що проходить через гальванометр стане рівним нулю, або б) при фіксованому співвідношенні r_1 і r_2 змінюють R_0 . У цьому випадку кажуть про баланс містка, і досягнута умова:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{r_2}{r_1} \quad (17)$$

Опір однорідної дротинки реохорда пропорційний її довжині. Враховуючи це та позначивши довжину ділянки кола r_1 через l_1 , а довжину ділянки r_2 через l_2 , справедливе співвідношення:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{l_2}{l_1} \quad (18)$$

Тому рівність (17) можна записати так:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{l_2}{l_1} \quad (19)$$

Довжини l_1 і l_2 можна виміряти за допомогою лінійки, а R_0 також відоме, тому з рівняння (19) легко визначити шуканий опір R_x .

Точність визначення R_x даним методом значною мірою залежить від положення повзунка D на дротині реохорда AC . Найвища точність за всіх інших рівних умов досягається при $l_1 = l_2$. Для виконання цієї умови необхідно відомий опір R_0 підібрати так, щоб його значення було близьким до вимірюваного опору R_x .

Послідовність виконання завдання

1. Зібрати електричне коло за схемою, зображеною на рис.6. Установити повзунок реохорда посередині шкали. Увімкнути в магазині опорів R_0 кілька десятків Ом.

2. Увімкнути джерело живлення \mathcal{E} (робоча напруга 2–3 В). При цьому стрілка гальванометра відхилиться від нульового положення. Поступово змінюючи опір у магазині, досягти найближчого до нульового положення стрілки при заданому положенні повзунка.

3. Прецизійним переміщенням повзунка реохорда D досягти нульового положення стрілки гальванометра.

4. Виміряти довжини плечей реохорда l_1 і l_2 і за формулою (19) визначити величину невідомого опору. Оцінити похибку.

Завдання 3. Перевірка формул для опору при послідовному та паралельному з'єднанні провідників

1. Виміряти опори не менше двох резисторів окремо, а потім визначити їх сумарний опір при паралельному та послідовному з'єднанні.

2. Перевірити їх узгодженість із значеннями, обчисленими за формулами послідовного та паралельного з'єднання. Зробити висновки щодо точності вимірювань і похибок.

Контрольні запитання

1. Що таке електричний струм? Назвіть основні умови існування струму в електричному колі.

2. Сформулюйте основні закони, які описують протікання електричного струму в однорідних та неоднорідних колах.

3. Сформулюйте і поясніть закони Кірхгофа.

4. Для чого потрібні джерела струму.
5. Назвати основні причини появи опору в металах.
6. Дайте характеристики фізичних величин: сила струму в колі, напруга на ділянці кола, опір провідника, питомий опір.
7. Що прийнято за напрямок струму у колі?
8. Відтворіть, як позначаються на електричних схемах гальванічний елемент, резистор, реостат, конденсатор, амперметр, вольтметр, ключ.
9. Яке з'єднання і провідників називається послідовним? Які співвідношення справджуються для такого з'єднання? Доведіть їх.
10. Яке з'єднання і провідників називається паралельним? Які співвідношення справджуються для такого з'єднання? Доведіть
11. Які причини приводять до похибок при вимірюванні опорів методом амперметра-вольтметра?
12. Пояснити принцип роботи містків постійного та змінного струму.
13. Як працюють омметри?

Лабораторна робота № 5

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДКИ ТА РОЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: Експериментальне вивчення квазістаціонарних процесів при зарядці та розрядці конденсатора і визначення часу релаксації.

Прилади та матеріали: джерело постійного струму (випрямляч), лабораторний макет з мікроамперметром, набором конденсаторів (20 – 100 мкФ) та резисторів (0,5 – 3 МОм), секундомір, з'єднувальні провідники з наконечниками.

1. Теоретичні відомості

Процеси при переході від одного сталого режиму в електричному колі до іншого називаються перехідними. Прикладом таких процесів є зарядка і розрядка конденсатора. Закони постійного струму можна застосовувати і до змінних струмів, якщо зміна струму відбувається досить повільно. У цих випадках миттєве значення струму буде практично одне і те ж у всіх поперечних перетинах електричного кола. Такі струми і відповідні їм поля називаються квазістаціонарними. Розглянемо процеси при замиканні і розмиканні кола з конденсатором, припускаючи що струми в цих процесах є квазістаціонарними.

Як приклад квазістаціонарних струмів розглянемо процеси зарядки і розрядки конденсатора. Нехай послідовно з'єднані конденсатор з ємністю C та резистор опором R включені в електричне коло, схема якого приведена на рис. 1, *a*. Тоді, при положенні 1 перемикача конденсатор C буде через резистор R заряджатися від джерела струму, а перекидаючи перемикач в положення 2 - розряджатися.

Розглянемо детальніше процеси зарядки та розрядки конденсатора. Нехай q заряд конденсатора, U_C – різниця потенціалів між його пластинами, а U_R – спад напруги на опорі. Тоді для миттєвих значень заряду q , сили струму I і напруги U_C можна записати:

$$U_C = \frac{q}{C}; \quad U_R = I \cdot R; \quad I = -\frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

Вважатимемо, що струм, який протікає в електричному колі, є квазістаціонарним, тобто у всіх поперечних перерізах провідника, що

замикає конденсатор, його миттєве значення одне й те саме. Миттєве значення напруженості електричного поля між обкладками конденсатора таке ж, як і при тих самих, але незмінних зарядах на обкладках конденсатора. Тоді, використовуючи правило Кірхгофа для випадку розрядки конденсатора (ключ у положенні 2 на схемі рис. 1а), одержимо $U_R + U_C = 0$. Враховуючи формули (1), одержимо:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} \quad (2)$$

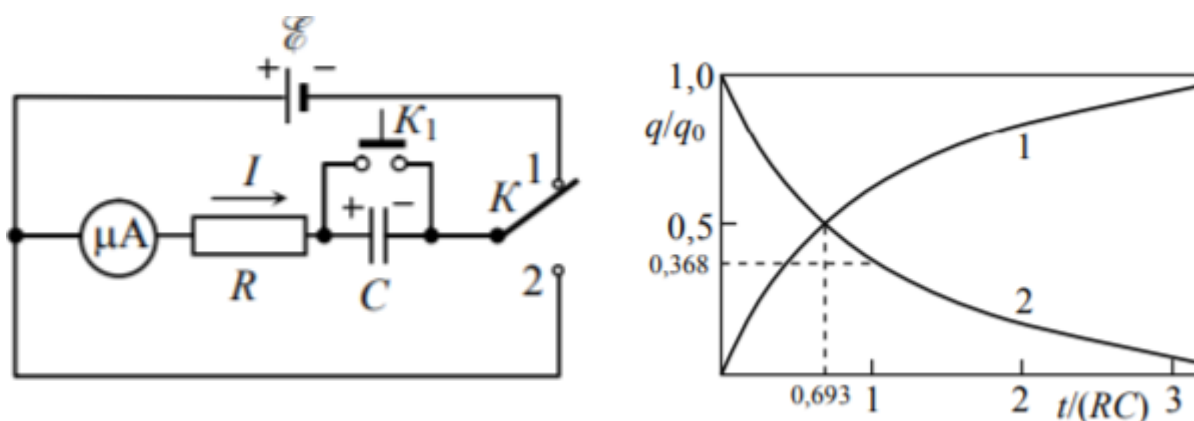


Рис. 1. Принципова схема для дослідження зарядки і розрядки конденсатора (а) та криві зарядки (1) та розрядки (2) конденсатора (б).

У рівнянні (2) швидкість зміни заряду dq/dt пропорційна величині цього заряду q . Природно очікувати, що в міру зменшення заряду швидкість dq/dt буде падати. За умови, що у початковий момент часу $t = 0$ заряд конденсатора дорівнює q_0 , розв'язком рівняння (2) є експоненціальна функція:

$$q = q_0 e^{-t/RC} \quad (3)$$

Таким чином, заряд на обкладках конденсатора при його розряджанні зменшується за експоненціальним законом (рис. 1 б, крива 2). За таким же законом змінюється і напруга на обкладинках конденсатора:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-t/RC} = U_0 e^{-t/RC} \quad (4)$$

де U_0 – напруга в початковий момент часу.

Величина $\tau = RC$ має розмірність часу. За час τ заряд конденсатора зменшується в e раз, де $e = 2.71828$ – основа натуральних логарифмів. Час τ називається часом релаксації. Релаксацією

називається самодовільний процес переходу системи в стійкий рівноважний стан. При розряджанні конденсатора за експоненціальним законом змінюється і сила струму, який протікає у провіднику:

$$I = -\frac{dq}{dt} = \frac{q_0}{RC} e^{-t/RC} = -I_0 e^{-t/RC}. \quad (5)$$

Знак « \rightarrow » означає, що струм протилежний до обраного напрямку обходу контуру.

Розглянемо процес зарядки конденсатора від джерела струму, в якого стала електрорушійна сила \mathcal{E} (рис. 1, а, ключ K в положенні 1). Застосовуючи до контуру $\mathcal{E}RC$ друге правило Кірхгофа, дістанемо:

$$U_R + U_C = \mathcal{E} \quad \text{або} \quad I \times R = \mathcal{E} - U_C \quad (6)$$

Тут I – миттєве значення сили струму, U_C – миттєве значення напруги на конденсаторі, а R – повний опір кола, що включає і внутрішній опір джерела струму та амперметра. Враховуючи, що за час dt заряд конденсатора збільшується на dq можна записати:

$$U_C = q/C, \quad I = dq/dt. \quad (7)$$

Виключаючи I і U_C з рівнянь (6) і (7) прийдемо до рівняння:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} + \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (8)$$

Розв'язком рівняння (8) з урахуванням того, що в початковий момент часу $t=0$ конденсатор ще не заряджений, тобто $q=0$, є функція:

$$q = \mathcal{E}C(1 - e^{-t/RC}). \quad (9)$$

При $t \rightarrow \infty$ значення $e^{-t/RC} \rightarrow 0$, а заряд конденсатора прямує до свого максимального значення, рівного $q_0 = \mathcal{E}C$ (рис. 1, б, крива 1). Напруга U_C на обкладках конденсатора також зростає від нуля до максимального значення, рівного електрорушійній силі джерела \mathcal{E} .

$$U_C = \frac{q}{C} = \mathcal{E}(1 - e^{-t/RC}). \quad (10)$$

Залежність сили струму зарядки конденсатора від часу має вигляд:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC} = I_0 e^{-t/RC}, \quad (5)$$

Тобто сила струму має максимальне значення в початковий момент часу і асимптотично прямує до нуля в процесі зарядки конденсатора.

2. Методика проведення експерименту

Сила струму зарядки конденсатора C через опір R , з'єднаний з ним послідовно, змінюється за експоненціальним законом (5). Принципова схема, за допомогою якої можна перевірити цей закон, наведена на рис. 1, *a*. Перевівши перемикач K у положення 1, конденсатор C заряджатиметься через активний опір R до напруги \mathcal{E} джерела постійної ЕРС. Перекидаючи перемикач у положення 2, конденсатор розряджатиметься через той самий опір. У схему включений мікроамперметр, який дозволяє вимірювати струм при заряджанні і розряджанні конденсатора в різні моменти часу. Якщо увімкнути в коло різні відомі опори і ємності, підібрані таким чином, що добутки $R \times C$ для вибраних пар залишаються однаковими, то можна переконатися у тому, що експериментально виміряні значення струму розрядки і зарядки для будь-яких пар лягають на одну і ту ж саму лінію $I_0/I = f(t)$ або на одну й ту ж пряму $\ln(I_0/I) = f(t)$. В останньому випадку очевидно, що тангенс кута нахилу прямої дорівнює $1/(R \times C)$. А тому з прямої $\ln(I_0/I) = f(t)$ легко знайти час релаксації $\tau = R \times C$. Вимірюючи струм розрядки і зарядки для невідомого опору R і ємності C , можна визначити величини R , C і τ .

3. Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Вимірювання кривих зарядки та розрядки конденсатора

1. Зібрати електричне коло за схемою, наведеною на рис. 4, увімкнувши в нього резистор із відомим опором R і конденсатор ємністю C .

2. Дослідити залежність струмів зарядки I_z і розрядки I_p від часу t для двох пар R і C ($R = 600$ кОм, 1 МОм, $C = 50$ – 100 мкФ). Кожну криву знімати не менше двох-трьох разів.

3. Побудувати залежність $\ln(I_0/I) = f(t)$ при зарядці та розрядці конденсатора і визначити сталі процесів релаксації τ . Порівняти одержане значення t із розрахованим за формулою $\tau = R \times C$.

Завдання 2. Визначення невідомого опору резистора та ємності конденсатора із процесів зарядки та розрядки конденсатора

1. Виконати пункти 1–3 завдання 1 при увімкненому невідомому опорі R і невідомій ємності C .

2. Результати вимірювань подати у вигляді графіка $\ln(I_0/I) = f(t)$. Знайти невідомий опір, користуючись законом Ома, знаючи I_0 і подану в схему напругу \mathcal{E} . Внутрішній опір мікроамперметра можна не враховувати, оскільки він малий у порівнянні з R .

3. Із графіка визначити час релаксації τ . Знаючи τ і R , знайти ємність невідомого конденсатора: $C = \tau/R$.

УВАГА!!! Всі перемикання в схемі проводити тільки при повністю розряджених конденсаторах. Для цього при вимкненому джерелі живлення розрядити конденсатор кнопкою K_1 .

Контрольні запитання

1. Що називається конденсатором? Вивести формулу ємності плоского конденсатора.

2. У яких одиницях вимірюється ємність у системі СІ? Дати її визначення.

3. За яких умов формула ємності плоского конденсатора справедлива для сферичного та циліндричного конденсаторів?

4. Чому дорівнює енергія зарядженого конденсатора?

5. Які струми називають квазістаціонарними?

6. Розглянути коло послідовно з'єднаних конденсатора C , резистора R і джерела сталої ЕРС. Записати закон Ома для цього кола.

7. Розв'язати отримане у попередньому питанні диференціальне рівняння.

8. Показати, що через час $\tau = R \times C$ струм у колі зарядки і розрядки конденсатора спадає в e разів.

9. Яка величина називається постійною часу, який її фізичний зміст?

10. Намалюйте графіки залежності струму і напруги в процесі зарядки і розрядки конденсатора.

Лабораторна робота № 6

ВИВЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ МЕТАЛІВ ТА НАПІВПРОВІДНИКІВ

Мета роботи: дослідити залежність опору металів і напівпровідників від температури; визначити температурний коефіцієнт опору металу і енергію активації електропровідності напівпровідника.

Прилади і матеріали: термошафа, в якій знаходяться 3 зразка: (1–метал (мідь); 2 – сплав (манганін) з низьким температурним коефіцієнтом опору; 3 – напівпровідник); датчик температури (термопара); лабораторний стенд, що дозволяє виконувати вимірювання температури зразків в електронагрівнику та опір зразків в процесі нагріву (охолодження).

1. Теоретичні відомості

Усі речовини за електрофізичними властивостями можна поділити на три великі класи: метали, напівпровідники та діелектрики. Вони відрізняються величиною питомого опору ρ : метали є хорошими провідниками електричного струму i , відповідно, мають малий питомий опір; на противагу металам діелектрики є дуже поганими електропровідниками, їх питомий опір великий; напівпровідники ж займають проміжкове положення між металами та діелектриками. Зазвичай речовини класифікують за величиною питомої електропровідності σ , яка є оберненою величиною до питомого опору. Електропровідність σ – фізична величина, яка характеризує перенесення електричних зарядів у речовині (дрейф) під дією зовнішнього електричного поля напруженістю E в напрямі цього поля. В системі СІ σ вимірюється в сіменсах на метр (См/м). Інтервали значень σ для вказаних вище трьох класів речовин умовно рівні:

- для металів $\sigma_{\text{м}} = 10^4 - 10^6$ См/см,
- для напівпровідників $\sigma_{\text{н.п}} = 10^4 - 10^{-10}$ См/см,
- діелектриків $\sigma_{\text{д}} < 10^{-10}$ См/см.

Умовність такого поділу пояснюється тим, що під впливом різних факторів граничні значення σ можуть перекриватися. Наприклад, електропровідність напівпровідника германію при кімнатній

температурі в залежності від технології його виготовлення лежить в межах $10^{-2} - 10^4$ См/см.

1.1. Температурна залежність опору металів

Згідно класичної електронної теорії провідності твердих тіл питома електропровідність

$$\sigma = \frac{ne^2}{2m} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}_T}, \quad (1)$$

де n – концентрація, e – заряд, m – маса електронів, $\bar{\lambda}$ та \bar{v}_T – їх середня довжина вільного пробігу та середня теплова швидкість руху, відповідно. Як видно з формули (1), електропровідність матеріалу, а значить і опір виготовленого з нього резистора, визначається такими чинниками як концентрація n носіїв заряду (електронів), середньою довжиною їх вільного пробігу $\bar{\lambda}$ та середньою швидкістю теплового руху $\bar{v}_T = \sqrt{8kT/\pi m}$. В металах концентрація електронів не змінюється із зміною температури, тому, на перший погляд, оскільки $\sigma \sim 1/\sqrt{T}$ і $\rho = 1/\sigma$, то опір R металевого резистора $R \sim \rho \sim \sqrt{T}$. Насправді у широкому інтервалі температур опір металів прямо пропорційно (лінійно) збільшується з підвищенням температури:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (2)$$

де R – опір металу при даній температурі, R_0 – опір при початковій температурі T_0 , від якої починається відлік, так що $\Delta T = T - T_0$, α - температурний коефіцієнт опору, який являє собою відносну зміну опору при зміні температури на одиницю, тобто

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{R - R_0}{R \cdot \Delta T}. \quad (3)$$

Різниця між експериментальною і передбачуваною теоретично температурною поведінкою опору металів зумовлена змістом, який вкладають у довжину вільного пробігу $\bar{\lambda}$ в класичній і квантовій теоріях металів. Класична електронна теорія металів (КЕТМ), яка розглядає вільні електрони як звичайні частинки, причину появи опору металів пояснює неперервними зіткненнями електронів з вузлами ґратки. Припускаючи, що електрони зазнають зіткнень майже з усіма вузлами ґратки, які зустрічаються на їх шляху, класична теорія приймає $\bar{\lambda}$ рівною параметру ґратки. Квантова теорія розглядає

електрон як частинку, яка має хвильові властивості, а рух електронів провідності крізь метал як процес поширення електронних хвиль, довжина яких визначається співвідношенням де Бройля ($\bar{\lambda} = h/p = h/mu$, де h – стала Планка, p , m і u – відповідно імпульс, маса і швидкість руху електрона). Ідеально правильна кристалічна ґратка, у вузлах якої знаходяться нерухомі остови, не повинна розсіювати електронні хвилі. Пучок вільних електронів повинен рухатися в ній без перешкод, тому така ґратка не повинна чинити опір проходженню електричного струму. Розсіювання електронних хвиль виникає тільки з появою в ґратці центрів розсіювання – неоднорідностей (спотворень), які за своїми розмірами більші за довжину електронних хвиль. Такими центрами є, в першу чергу, спотворення ґратки, які виникають внаслідок теплових коливань вузлів ґратки – флуктуації густини. Серед великого числа атомів, які утворюють тверде тіло, при невпорядкованому напрямі коливань завжди знайдуться такі, які в даний момент рухаються назустріч один одному. Відстані між ними у цей момент виявляться меншими за відстані між вузлами у нерухомій ґратці, а густина речовини у локальних мікрооб'ємах, які охоплюють ці атоми, – вища за середню густина речовини. У сусідніх ділянках виникають мікрооб'єми, в яких густина речовини буде меншою за її середнє значення. Подібні локальні відхилення густини від середнього значення і є флуктуацією густини середовища. Отже, внаслідок теплового руху вузлів ґратки тверде тіло в кожний момент часу є мікроскопічно неоднорідним: при переході від одного мікрооб'єму до іншого його густина змінюється. Ця зміна проявляється тим різкіше, чим менше число атомів охоплюють мікрооб'єми. Зазвичай, розмір таких мікрооб'ємів перевищує довжину електронних хвиль вільних електронів, внаслідок чого вони є ефективними центрами розсіювання цих хвиль: потік вільних електронів, який рухається в металі, зазнає на них такого ж розсіювання, якого зазнають світлові хвилі на завислих частинках каламутного середовища. Це і є причиною електричного опору абсолютно чистих металів. У досить чистому металі концентрація домішок невелика і довжина вільного пробігу аж до низьких температур визначається розсіюванням електронів на теплових коливаннях ґратки. Збуджений стан ґратки можна уподібнити ідеальному газу фононів у кристалі. У випадку електрон-фононного розсіювання кількість розсіюючих центрів визначається числом фононів. При високих температурах (T більша температури Дебая Θ_D , яка різна для різних металів: лантан – $\Theta_D = 132$ К; залізо –

$\Theta_D = 467 \text{ K}$) число фононів пропорційне температурі. У цьому діапазоні температур довжина вільного пробігу електронів у металі обернено пропорційна T . Тому, $\sigma \sim 1/T$ (питомий опір $\rho = 1/\sigma \sim T$).

В діапазоні низьких температур ($T < \Theta_D$) концентрація фононного газу пропорційна T^3 . Тому довжина вільного пробігу електронів, зумовлена розсіюванням їх на фононах, повинна бути обернено пропорційна T^3 : $\bar{\lambda} \sim T^3$. Однак це співвідношення не враховує наступної важливої обставини. При низьких температурах середній імпульс фононів настільки малий у порівнянні з імпульсом електронів металу, що для зменшення руху електрона у даному напрямі потрібно не один, а кілька актів розсіювання його на фононах. Тому ефективна довжина вільного пробігу електрона, протягом якої відбувається хаотизація його руху, пропорційна T^5 . Отже, при низьких температурах питомий опір металу буде $\rho \sim T^5$ (див. рис. 1).

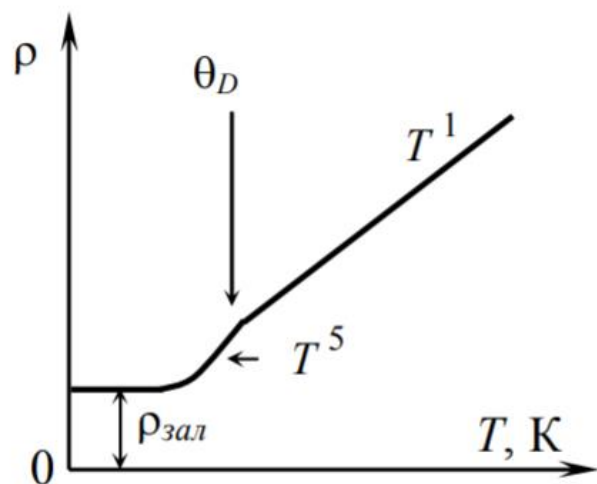


Рис. 1. Температурна залежність питомого опору металів.
 Θ_D – температура Дебая.

Теплові коливання вузлів ґратки – це не єдине джерело спотворення ґратки, яке приводить до розсіювання електронних хвиль. Другим таким джерелом є дефекти кристалічної ґратки, що завжди присутні в реальних кристалах. Дефекти будь-якого виду – хімічні домішки, власні точкові дефекти і поверхня кристала – діють як центри розсіювання електронів. При температурах, близьких до нуля, концентрація фононів зменшується настільки, що основним механізмом розсіювання є розсіювання на дефектах, які завжди присутні навіть у чистих металах. У металах з великою концентрацією домішок і в неупорядкованих сплавах довжина вільного пробігу

обернено пропорційна концентрації домішок ($\bar{\lambda} \sim 1/N_{\text{дом}}$) і слабо залежить від температури, тому питомий опір ρ набуває сталого значення, яке називають залишковим питомим опором $\rho_{\text{зал}}$. Залишковий опір – та межа, до якої прагне опір металу при охолодженні його до абсолютного нуля.

У металах, крім розсіювання електронних хвиль на теплових та структурних неоднорідностях, вклад у загальний опір вносить також зіткнення електронів провідності між собою. Ця складова опору може проявити себе при дуже низьких температурах. При цих же наднизьких температурах спостерігається у деяких металах перехід у надпровідний стан, однак ці явища не є предметом розгляду цієї лабораторної роботи.

1.2. Температурна залежність опору напівпровідників

Температурна залежність опору напівпровідників є складнішою ніж металів. Це пояснюється тим, що в них, окрім фактора, що призводить до зростання опору з підвищенням температури внаслідок зростання амплітуди коливань атомів решітки і розсіювання електронів на іонах, різко зростає число носіїв струму, тому що електрони дістають додаткову енергію і частина їх може відірватись від нейтральних атомів ґратки. Фактор зростання числа носіїв струму перебиває фактор, що призводить до зростання опору внаслідок зростання інтенсивності коливань решітки. Досліди показують, що у деяких напівпровідників при підвищенні температури на 1 К опір зменшується на (3-6)%, а при підвищенні на 10 К – приблизно на 75%.

Для пояснення такої поведінки необхідно врахувати квантово-механічну природу мікрочастинок (атомів, молекул, електронів, іонів), з яких складаються тверді тіла.

Теоретичною основою фізики металів, напівпровідників та діелектриків є зонна теорія. Зонна теорія – це квантова теорія електронів, які рухаються в періодичному полі кристалічної ґратки. З точки зору квантової механіки електрони ізольованих атомів можуть знаходитись лише в певних, відмінних один від одного (дискретних) енергетичних станах. Перехід із одного можливого стану в другий відбувається стрибкоподібно зі зміною енергії на скінченну величину ΔE . На рис. 1 схематично наведено дискретні рівні енергії E електронів в атомі.

При утворенні кристала атоми зближуються і починають все сильніше взаємодіяти. Ця взаємодія по-різному впливає на електрони, розташованих на різних енергетичних рівнях. Електрони, що знаходяться на більш глибоких рівнях, будуть збудені мало і залишаються поблизу тих атомів, до складу яких вони входили, коли атоми були ще на значній відстані. Рух же зовнішніх (валентних) електронів буде настільки збуденим, що вони перестають належати якому-небудь одному атому і стають належністю всього кристалу, або, як кажуть, колективізуються. Теорія показує, що коли число атомів, що утворюють кристал дорівнює N , то рівень кожного валентного електрона в кристалі розщеплюється на N окремих, близько розташованих один до одного рівнів. В реальних кристалах число атомів N є дуже великим, в результаті чого в кристалі виникає смуга (або зона) дозволених станів, що утворюються величезним числом надзвичайно близько розташованих один до одного рівнів.

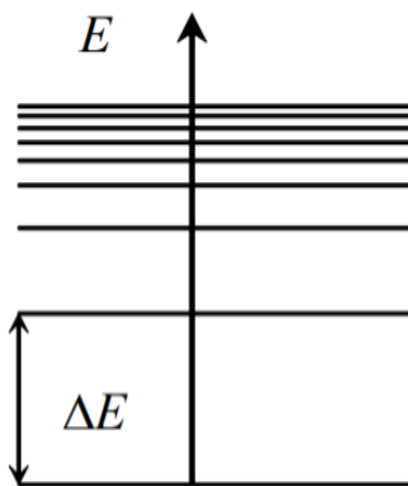


Рис. 2 Дискретні рівні енергії E електронів у атомі.

Таким чином, *енергетична зона* – це сукупність великого числа ($10^{27} \div 10^{29}$) близько розташованих рівнів, які практично зливаються в одну квазінеперервну смугу (тільки не просторову, а енергетичну).

Кожний електрон будь-якого атома характеризується одним із дозволених значень енергії, тобто займає один із дозволених енергетичних рівнів. В основному, незбуденому стані атома сумарна енергія електронів приймає мінімальне можливе значення. Через це, здавалося б, всі електрони повинні знаходитись на найнижчому рівні. Але електрони підкоряються принципу заборони Паулі, згідно з яким в будь якій квантовій системі (атомі, молекулі, кристалі і т.д.) на кожному енергетичному рівні може знаходитись не більше двох електронів, причому власні моменти (спіни) електронів, які одночасно займають один і той же рівень, повинні мати протилежні напрямки ($\uparrow\downarrow$). Отже, на нижньому рівні атома може розташуватися тільки два електрони, решта заповнює більш високі рівні.

При абсолютному нулі енергія кристала повинна бути мінімальною. Через це валентні електрони заповнюють попарно нижні

рівні дозволеної зони, що виникла з того рівня, на якому знаходяться валентні електрони в основному стані атома (будемо називати її валентною зоною). Більш високі дозволені зони будуть вільними від електронів. В залежності від ступеню заповнення валентної зони електронами і ширини забороненої зони можливі три випадки, що зображені на рис. 4.

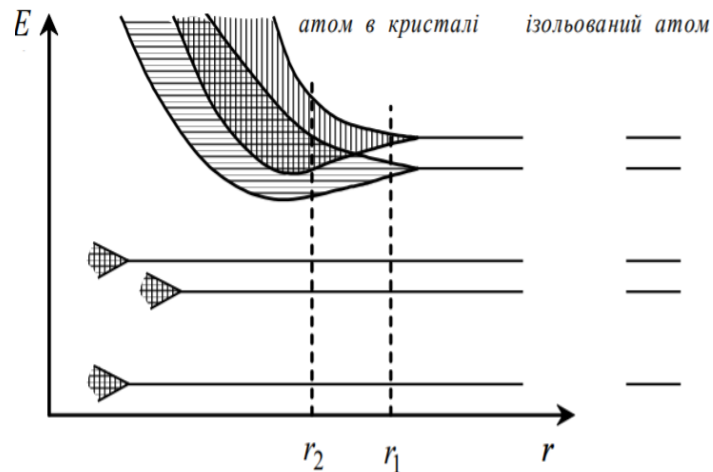


Рис. 3. Розщеплення енергетичних рівнів: енергія електронів E як функція відстані r між атомами.

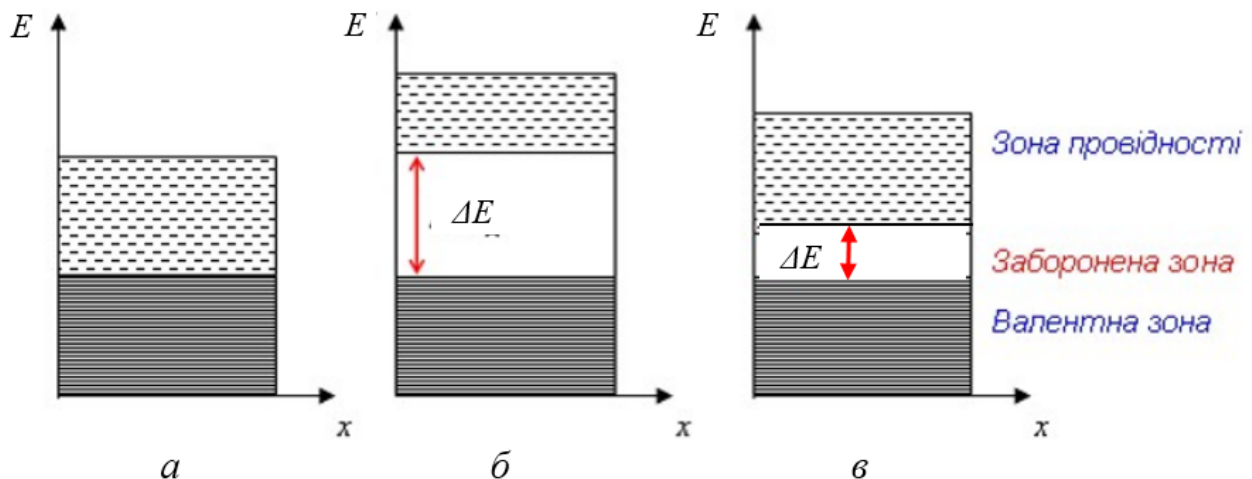


Рис. 4. Зонні структури речовин: металів (a), діелектриків ($б$) і напівпровідників ($в$) при $T = 0$ К

У випадку a електрони заповнюють валентну зону не повністю або вона перекривається з вище розташованою за енергією вільною зоною (зоною провідності). Тому достатньо надати електронам, що знаходяться на верхніх рівнях зовсім невелику енергію ($10^{-23} \div 10^{-22}$) еВ

для того, аби перевести їх на більш високі рівні. При температурах, відмінних від 0 К, частина електронів переходить на більш високі рівні. Додаткова енергія, що викликана дією на електрон електричного поля, також виявляється достатньою для переходу електрона на більш високі рівні. Кристал з подібною схемою енергетичних рівнів являє собою метал.

У випадках b і v рівні валентної зони повністю зайняті електронами – зона є заповненою. Для того аби перевести електрон у верхню вільну зону, йому потрібно надати енергію, не меншу ніж ширина забороненої зони ΔE . Електричне поле (в усякому випадку, такої напруженості, при якій не відбувається електричного пробоя кристалу) не спроможне надати електрону таку енергію. При цих умовах електричні властивості кристалу визначаються шириною забороненої зони ΔE . Якщо ΔE є невеликою (від декількох десятих до 2 еВ), енергії теплового руху kT достатньо для того, аби перевести достатню частину електронів у верхню вільну зону. Вільна зона виявиться для них зоною провідності. Одночасно стане можливим перехід електронів валентної зони на звільнені верхні рівні. Таким чином вихід електронів із заповненої валентної зони дає можливість електронам, що залишились приймати участь у провідності. В місці, яке залишив електрон, виникає надлишок позитивного заряду, або як кажуть «позитивна дірка». Ця «дірка» поводить себе як позитивний заряд, який за величиною дорівнює заряду електрона. На місце, звільнене електроном («дірку») може перейти електрон з більш глибокого рівня валентної зони, а це рівнозначно тому, що перемістилася «позитивна дірка». Тобто «дірка» почне переміщуватись по валентній зоні у бік, протилежний рухові електрона, так як переміщувався б позитивний заряд. Тому напівпровідником називається речовина, перенос заряду в якому може здійснюватися електронами в зоні провідності та дірками у валентній зоні. Відзначимо, що обидва процеси переміщення зарядів ведуть до одного напрямку струму, тому електронна та діркова складові струму у напівпровідниках додаються. У зовнішньому електричному полі електрони рухаються в бік, протилежний напруженості електричного поля, а дірки – в напрямку напруженості, тобто в той бік, куди переміщується позитивний заряд.

Електропровідність напівпровідника, що зумовлена переміщенням електронів, називається електронною провідністю, а електропровідність, що зумовлена переміщенням дірок – дірковою.

Так звана «власна» провідність характерна для бездефектного напівпровідника, коли вільні електрони й дірки утворюються в рівній кількості у зоні провідності та валентній, приймаючи участь у переносі заряду.

Якщо ширина забороненої зони ΔE є великою (порядку декількох eВ), завдяки тепловому руху у вільну зону не може потрапити помітне число електронів. У цьому випадку кристал буде ізолятором.

Розглянемо механізм електропровідності з точки зору хімічних зв'язків на прикладі власного напівпровідника кремнію (Si). Зовнішня електронна оболонка як германію, так і кремнію заповнена частково, вона містить чотири електрони. У кристалі германію або кремнію вузли розташовані впорядковано на таких відстанях один від одного, що їх зовнішні електронні оболонки перекриваються, і рівні підгруп s і p розщеплюються та утворюють одну енергетичну зону. Взаємодія зовнішніх електронних оболонок проявляється у тому, що в електронів сусідніх атомів з'являються спільні орбіти, на яких, у відповідності з принципом Паулі, може знаходитись не більше двох електронів з протилежними спінами. Ці спільні орбіти зв'язують між собою атоми германію або кремнію, утворюючи так звані ковалентні або парноелектронні зв'язки (рис. 5, а). У кристалічній ґратці кремнію чотири валентних електрони кожного атома беруть участь в утворенні ковалентних зв'язків (по два електрони в кожному). Згідно з теорією валентних зв'язків, пара валентних електронів, яка забезпечує ковалентний зв'язок між атомами кремнію, одночасно належить двом сусіднім атомам кремнію (рис. 5, а).

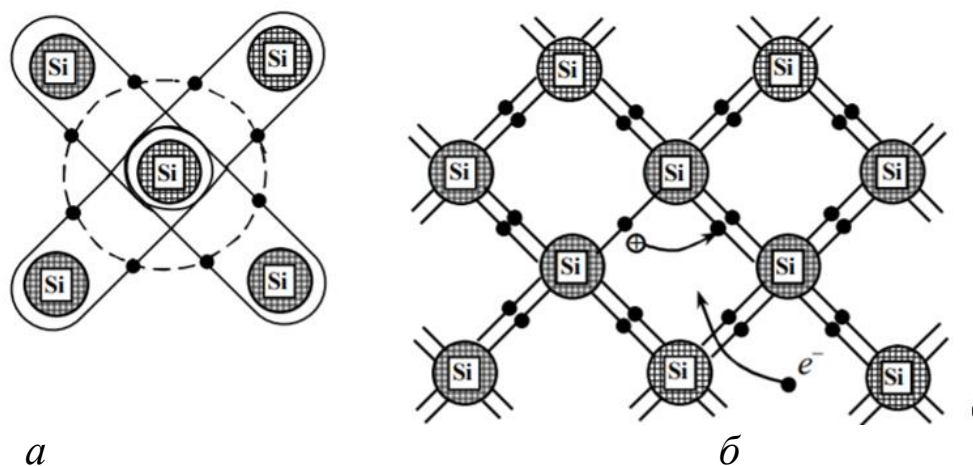


Рис. 1. а – : схема утворення ковалентних зв'язків у кристалі кремнію і доповнення зовнішньої електронної оболонки атома кремнію до 8 електронів; б – модель появи електрона як вільного носія заряду у власному напівпровіднику Si у площинному зображенні (б).

На рис. 5, б дано двовимірне зображення зв'язків у ґратці кремнію. Тут у вузлі ґратки знаходиться іон кремнію із зарядом $+4e$, якому належать чотири валентних електрони. Валентні електрони, які забезпечують ковалентний зв'язок, на рис. 5, б зображені у вигляді чорних кружків. В ідеальному напівпровіднику, зображеному на рис. 5, б, усі електрони зв'язані. Якщо помістити такий напівпровідник в електричне поле, то електричний струм не може виникнути, оскільки усі зв'язки у ґратці заповнені, і вільних носіїв заряду немає. Дійсно, при температурах, близьких до абсолютного нуля, кристал кремнію є ізолятором. Для того щоб у кристалі кремнію виникнув струм, необхідно частину електронів зробити вільними. Необхідну для відриву електрона енергію можна підвести до ґратки, опромінюючи фотонами, або нагріванням, тобто збільшенням енергії теплових коливань вузлів ґратки. Для відриву електрона у кремнію при кімнатній температурі необхідно затратити енергію 1,08 еВ. Процес перетворення зв'язаного електрона у вільний електрон є одним із каналів генерації носіїв заряду. Звільнення одного електрона породжує один незаповнений зв'язок, який має надлишковий позитивний заряд, оскільки він не скомпенсований зарядом електрона. *Вакантне місце* у валентному зв'язку отримало назву *дірки*. У цілому кристал залишається електронейтральним, бо кожному утвореному позитивному заряду дірки відповідає вільний електрон. На рис. 5, б вільні електрони і дірки зображені відповідно темними та світлими кружками. Якщо вільний електрон наблизиться до дірки, то може приєднатися до атома. Процес перетворення вільного електрона у зв'язаний електрон носить назву *рекомбінації* носіїв заряду. Напівпровідник, у якому внаслідок розриву валентних зв'язків утворюється рівна кількість вільних електронів і дірок, називається власним. При кімнатній температурі концентрація вільних електронів і дірок у германія складає приблизно 10^{13} см^{-3} , у кремнію – біля 10^{10} см^{-3} . Збільшення температури призводить до зростання числа розірваних валентних зв'язків, а значить, до збільшення концентрації вільних електронів і дірок у напівпровіднику.

За відсутності зовнішнього електричного поля електрони і дірки здійснюють у напівпровідниковому кристалі хаотичні рухи. При прикладанні до кристала різниці потенціалів з'являється напрямлений дрейф: електрони переважно рухаються проти поля, а дірки - за напрямом поля. Однак напрямлений дрейф дірок відбувається складніше, ніж рух електронів. Електрон, який знаходиться поруч з

діркою, перескакує на це вільне місце і в результаті звільнюється нова дірка у напрямі проходження струму. Наступний електрон знову займе вільне місце (дірку) і т. д., тобто відбувається переміщення дірок вздовж силових ліній електричного поля.

Необхідно зазначити, що позитивний заряд переміщується за полем внаслідок переміщення в протилежному напрямі електронів по електронних вакансіях – дірках. Безпосереднє переміщення позитивного заряду вздовж поля означало б переміщення іонізованого атома кремнію. Оскільки рухливість іонів на багато порядків менша рухливості електронів, тому іонний струм у кремнію практично не виникає. Механізм провідності, зумовлений рухом зв'язаних електронів по валентним зв'язкам, отримав назву діркової провідності. Отже, у чистому бездефектному напівпровіднику, який не містить домішок, наявні електронна та діркова електропровідність, тобто електричний струм у власному напівпровіднику визначається двома складовими - електронним та дірковим струмами, які протікають в одному напрямі.

Електропровідність власного напівпровідника можна також пояснити, виходячи з енергетичних уявлень. На рис. 6 показана спрощена модель зонної структури власного напівпровідника. Тут E_C

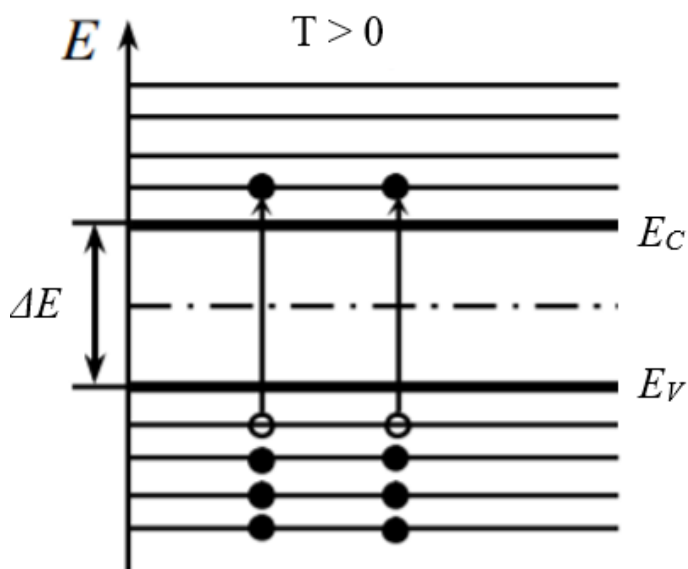


Рис. 6. Модель появи електрона як вільного носія заряду у власному напівпровіднику Si на зонній енергетичній діаграмі.

– дно зони провідності, що відповідає мінімальній енергії, яку можуть мати вільні електрони у кристалі, а величина E_V – вершина валентної зони, тобто максимальна енергія електронів у валентній зоні. При $T = 0$ К у валентній зоні власного напівпровідника усі можливі квантові стани зайняті електронами, а у зоні провідності зовсім немає електронів (рис. 6). Тому при $T = 0$ К провідність власного напівпровідника дорівнює нулю, тобто він стає діелектриком.

З підвищенням температури напівпровідника відбувається термічне збудження електронів валентної зони, внаслідок якого частина електронів набуває енергії, достатньої для переходу в зону провідності (рис. 6). Це приводить до появи у зоні провідності вільних електронів, а у валентній зоні – дірок. Якщо до такого кристала прикласти зовнішнє електричне поле, то у ньому виникне напрямлений рух електронів зони провідності і дірок валентної зони, а це призведе до появи електричного струму.

Під *власною провідністю* напівпровідника розуміють провідність, в якій бере участь однакова кількість електронів і дірок, які утворюються внаслідок переходу електронів з валентної зони у зону провідності. Такі вільні носії заряду називаються власними носіями. Процес генерації електронів і дірок у напівпровідниковому кристалі супроводжується одночасно процесом рекомбінації.

Чим вужча заборонена зона і вища температура кристала, тим більше електронів переходить у зону провідності і тим більш високу електропровідність має кристал. Так, у германію, ширина забороненої зони якого є $E_g = 0,66$ еВ, уже при кімнатній температурі концентрація електронів у зоні провідності досягає значення $n_i = 10^{16}$ см⁻³, а питомий опір складає всього 0,48 Ом×м. У той же час у фосфіду галію (GaP), який має $\Delta E = 2,24$ еВ, при кімнатній температурі виявляється $n_i = 10^3$ см⁻³ і питомий опір - 2×10^{13} Ом×м. Але при 900 К концентрація електронів у фосфіду галію збільшується на багато порядків, і питомий опір стає того ж порядку, як і у германія при кімнатній температурі.

1.3. Домішкова провідність напівпровідників

Основним способом надання напівпровідниковим матеріалам необхідних властивостей є введення домішок. Процес цілеспрямованого введення домішок у напівпровідник називають легуванням, а відповідні домішки – легуючими. Розглянемо механізм виникнення домішкової провідності на основі ковалентної природи хімічних зв'язків в елементарному напівпровіднику – кремнію.

Нехай у кристалічну ґратку кремнію як легуючу домішку введені атоми стибію (Sb). Стибій, як і усі елементи V групи Періодичної системи, для кремнію є домішкою заміщення. Зовнішня оболонка атома стибію містить п'ять електронів. Із них чотири беруть участь в утворенні ковалентного зв'язку з чотирма найближчими атомами кремнію (рис. 7, а).

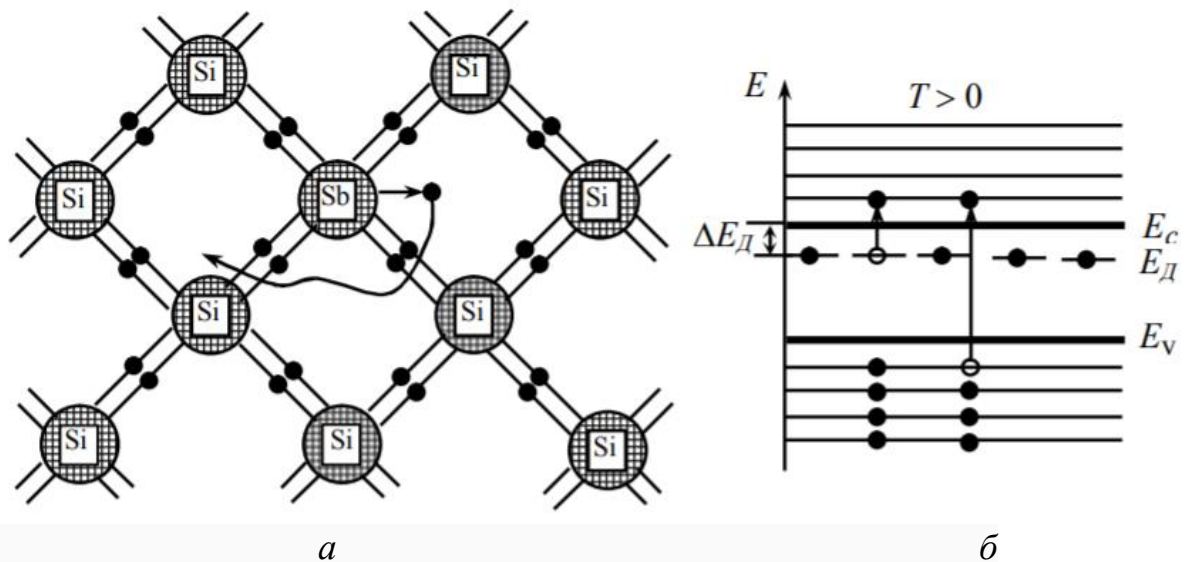


Рис. 7. Модель появи вільних електронів у кремнію, легованому домішкою стибію: *a* – в площинному зображенні; *б* – на зонній енергетичній діаграмі.

П'ятий електрон не бере участі в утворенні зв'язку, оскільки усі зв'язки уже зайняті. Водночас він буде зазнавати дії зі сторони оточуючих атомів кремнію, внаслідок чого енергія його зв'язку з атомом стибію зменшується, як показує розрахунок, приблизно в ϵ разів (де ϵ – відносна діелектрична проникність, для кремнію $\epsilon = 12$). Це означає, що п'ятий електрон атома Sb може стати вільним при затраті енергії у десятки разів меншої, за енергію, яку необхідно для відриву електрона від атома основної речовини – кремнію. Тому домішка може бути легко іонізована, і у кристалі з'явиться велике число вільних електронів, яке набагато перевищує число вільних електронів у чистому кремнію. При прикладанні до кристалу електричного поля ці електрони прискорюються у напрямі проти поля, і, отже, будуть брати участь в утворенні електричного струму.

Атоми домішки, які віддали електрон, перетворюються на позитивно заряджені іони (Sb^+). Але позитивно заряджений іон домішки не бере участі в утворенні струму, оскільки він локалізований у вузлі ґратки. Тому донорна домішка є постачальником тільки вільних електронів. У цьому випадку кристал має електронну провідність, електричний струм зумовлений впорядкованим рухом електронів (*n*-тип провідності).

Наявність у напівпровідниковому кристалі домішкових атомів означає порушення у ньому стехіометричного складу і періодичності кристалічної ґратки. Атоми легуючої домішки створюють в енергетичній структурі напівпровідника додаткові дискретні рівні, які

локалізовані у забороненій зоні для ідеального кристала (рис. 7, б). Ці рівні називають локальними тому, що вони виникають не у всій ґратці, а тільки у місцях розташування дефектів. Утворені дефектами локальні рівні в нормальному стані можуть бути вільними або зайнятими електронами.

Дефект ґратки, в якому у незбудженому стані локальний рівень зайнятий і при збудженні здатний віддати електрон у зону провідності (рис. 7, б), називають донором. Домішку, атоми якої є донорами, називають донорною домішкою. Донорними домішками для германію і кремнію є елементи V групи: фосфор (P), миш'як (As), стибій (Sb), вісмут (Bi).

Мінімальна енергія, яку необхідно надати електрону, який знаходиться на донорному рівні, щоб перевести його у зону провідності, називається енергією іонізації донора (ΔE_d). Донорні рівні, як правило, розташовані у забороненій зоні ближче до дна зони провідності на відстанях кількох десятих або сотих електрон-вольт.

Розглянемо випадок *акцепторної домішки*. Напівпровідник, у якому основними носіями струму є дірки, називають дірковим напівпровідником (*p*-тип). Домішку, яка зумовлює діркову електропровідність кристалів, називають акцепторною. Акцепторними домішками для германію і кремнію є елементи III групи: бор (B), алюміній (Al), галій (Ga), індій (In), талій (Tl). Домішки є акцепторами, якщо валентність домішкового атома менша за валентність атома основної ґратки. Якщо кристал кремнію пролегувати елементами III групи, то для забезпечення зв'язку з чотирма сусідніми атомами у домішкового атома не вистачає одного електрона. Як приклад, на рис. 8, а зображена двовірна модель кристалічної ґратки кремнію з домішкою індію. Потреба в установленні чотиривалентних зв'язків з атомами кристалічної ґратки кремнію приводить до того, що атом індію захоплює електрон від одного із сусідніх атомів кремнію. При цьому атом індію виявляється іонізованим, перетворюючись на негативний іон індію, локалізований у вузлі кристалічної ґратки. Атом кремнію, який втратив один електрон, стає позитивно зарядженим іоном, у якого є вільний квантовий стан. Іонізований атом кремнію для заповнення валентних зв'язків може захоплювати електрон від іншого сусіднього атома кремнію. Тоді вільний стан з'явиться у цього атома кремнію. Такий незаповнений електронний стан атома у кристалічній ґратці і є діркою.

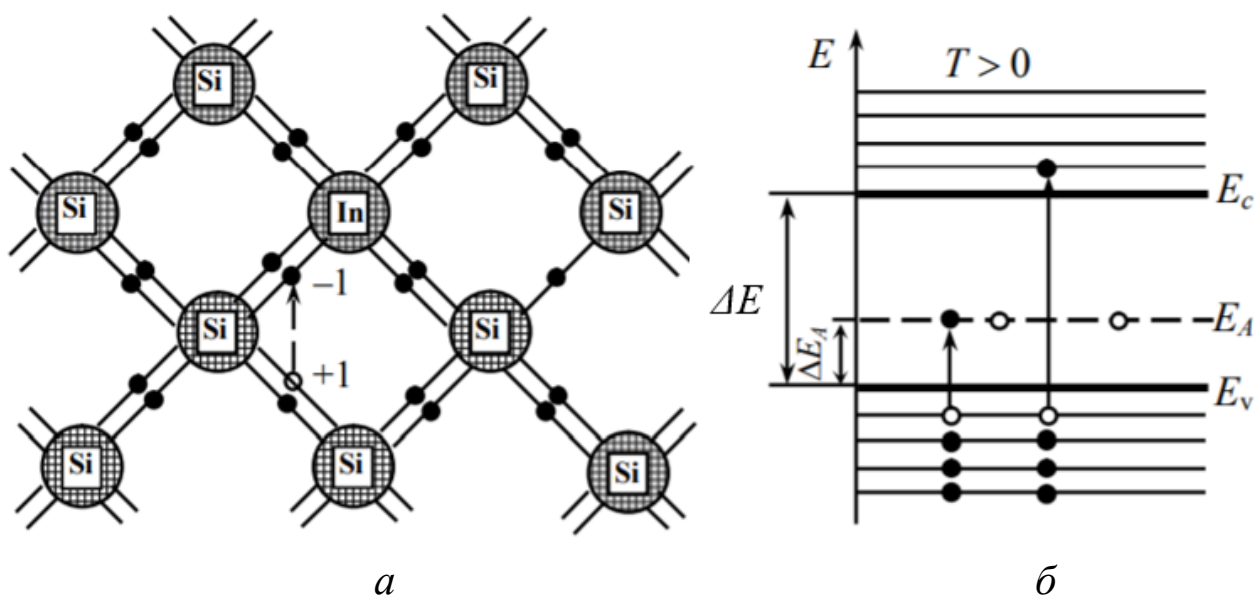


Рис. 8. Модель появи вільних дірок у кремнію з домішкою галію: *a* – у площинному зображенні; *б* – на зонній енергетичній діаграмі.

Дірка, яка з'явилася внаслідок введення в кристал акцепторної домішки, може переміщуватись у кристалі напівпровідника. При прикладанні до кристалу електричного поля дірки отримують прискорення, і у кристалі виникає електричний струм, зумовлений напрямленим рухом дірок.

Введення домішки індію в кристал кремнію призводить до появи у забороненій зоні локалізованого акцепторного рівня ΔE_A , який розташований поблизу верху валентної зони (рис. 8, б). Мінімальна енергія, яку необхідно надати електрону валентної зони, щоб перевести його на акцепторний рівень, називається енергією іонізації акцептора (ΔE_A).

Електропровідність напівпровідника, зумовлена іонізацією атомів донорної і (або) акцепторної домішок (при довільному способі збудження), називається домішковою електропровідністю, а вільні носії заряду, які утворюються завдяки переходу електронів з донорних рівнів у зону провідності або із валентної зони на акцепторні рівні, називаються домішковими носіями.

У напівпровідниках з донорною домішкою в діапазоні низьких температур, коли середня енергія теплових коливань кристалічної ґратки $kT \ll \Delta E$ переходами електронів із валентної зони у зону провідності можна знехтувати, і вважати, що усі електрони провідності з'являються внаслідок іонізації донорної домішки. У цьому випадку концентрація вільних електронів переважає над концентрацією вільних дірок ($n \gg p$), а електропровідність такого

напівпровідника зумовлена в основному переміщенням електронів провідності (електронна провідність n -типу).

У напівпровіднику з акцепторною домішкою при низьких температурах концентрація вільних дірок значно більша за концентрацію вільних електронів ($p \gg n$), а тому електропровідність їх в основному зумовлена переміщенням дірок провідності (діркова електропровідність p -типу)

При високих температурах (вище кімнатної) у домішкових напівпровідниках помітно зростає і концентрація власних носіїв заряду, а провідність їх зумовлюється власними та домішковими носіями заряду. Для домішкової електропровідності характерна сильна залежність σ від концентрації домішки. Якщо у домішковий напівпровідник, який має електронну електропровідність, ввести акцепторні домішки, то вони будуть захоплювати електрони, зменшуючи тим самим концентрацію носіїв заряду. Те ж саме відбувається і при введенні донорних домішок у домішковий напівпровідник з дірковою електропровідністю. Домішковий напівпровідник, в якому концентрації донорів і акцепторів рівні між собою, називається *скомпенсованим*.

Як вже вказувалось вище, електропровідність напівпровідників дуже сильно залежить від температури. Питома електропровідність напівпровідників, як і металів, визначається концентрацією вільних носіїв та їх довжиною вільного пробігу. Оскільки механізми розсіювання носіїв заряду розглянуті для металів притаманні також і напівпровідникам, залишається проаналізувати температурну залежність їх концентрації.

При температурі $T > 0$ у власному напівпровіднику частина електронів з валентної зони перейде у зону провідності, а у валентній зоні утвориться стільки ж дірок. Рівноважна концентрація електронів n і дірок p рівна і набагато менша від числа рівнів у дозволених зонах. Тому електрони у зоні провідності займають рівні поблизу її нижньої границі, а дірки у валентній зоні – поблизу її верхньої границі. Отже концентрація електронів і дірок у власному напівпровіднику визначається концентрацією електронів біля дна зони провідності і концентрацією дірок поблизу вершини валентної зони.

У найбільш спрощеному підході можна вважати, що електрони ведуть себе як класичні частинки, і розподілені по енергіям за законом розподілу Больцмана

$$f_B(E) = e^{-\frac{E}{2kT}}, \quad (4)$$

а густина станів $N(E)$, тобто число станів в одиничному інтервалі енергій для одиничного об'єму кристала, слабо залежить від енергії електронів. Тоді загальна концентрація електронів у зоні провідності

$$n \sim \int N(E) \cdot f_B(E) dE = A e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (5)$$

тобто експоненціально зростає з підвищенням температури. Отже, враховуючи що лінійна функція, яка описує розсіювання електронів, набагато слабша ніж експоненціальна, за якою змінюється їх концентрація, для опору зразка напівпровідника можна записати:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}. \quad (6)$$

де k – стала Больцмана, R_0 – константа, яка може бути визначена експериментально, ΔE – ширина забороненої зони.

Аналогічні вирази можна одержати для домішкових напівпровідників, у кінцеві вирази яких замість ширини забороненої зони ΔE увійдуть енергії активації ΔE_D донорної та ΔE_A акцепторної електропровідності, відповідно.

Таким чином, у першому наближенні для температур, що незначно відрізняються від кімнатної, з підвищенням температури опір напівпровідника різко зменшуватиметься, чим принципово відрізняється від температурної поведінки опору металів (рис. 9 а).

Зазвичай при комплексному дослідженні напівпровідникових матеріалів вивчають його електропровідність у широкому температурному інтервалі. Як видно з рис. 9, б залежність $\ln \sigma$ від $1/T$ має три добре виражені ділянки: *аб*, *бв* і *вг*. При низьких температурах у напівпровіднику наявна домішкова провідність (ділянка *аб*, рис. 9, б), яка визначається залежністю концентрації домішкових носіїв від температури, оскільки кількість власних носіїв при низьких температурах дуже мала. З підвищенням температури на ділянці домішкової провідності концентрація носіїв збільшується до тих пір, поки усі атоми домішки не іонізуються і число носіїв не виявиться рівним числу атомів домішки N_D . Якщо при цьому концентрація власних носіїв залишається дуже малою, то при досягненні повної

іонізації домішкових атомів (у точці δ), загальне число носіїв практично перестає залежати від температури.

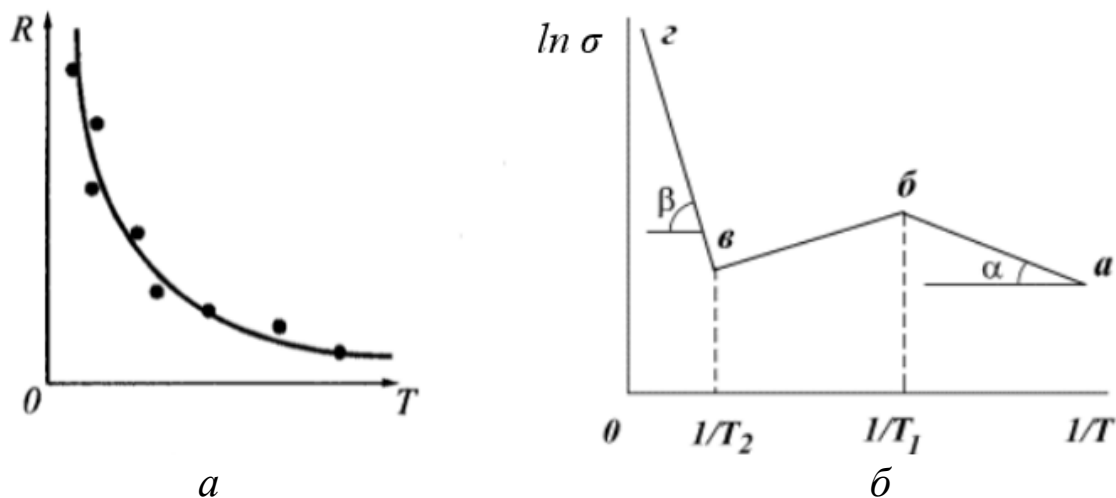


Рис. 9. Температурна залежність опору напівпровідника у вузькій області температур (a), та залежність електропровідності від оберненої температури у широкому температурному інтервалі (δ).

Ділянка $\delta\epsilon$ відповідає виснаженню домішок і температурний хід електропровідності визначається залежністю довжини вільного пробігу носіїв заряду від температури. Якщо у цьому діапазоні температур основним механізмом є розсіювання носіїв на теплових коливаннях ґратки, то із зростанням T їх рухливість буде зменшуватись, внаслідок чого буде зменшуватись і провідність. На ділянці ϵz енергія коливань атомів кристала досягає такої величини, що відбувається інтенсивне збудження власних носіїв і напівпровідник набуває власної провідності, яка швидко зростає з підвищенням температури.

2. Методика проведення експерименту

Експериментально дослідження залежності опору металевих резисторів і напівпровідникового терморезистора від температури здійснюється за допомогою лабораторної установки, яка складається з термошафи А і лабораторного стенда Б (рис. 10).

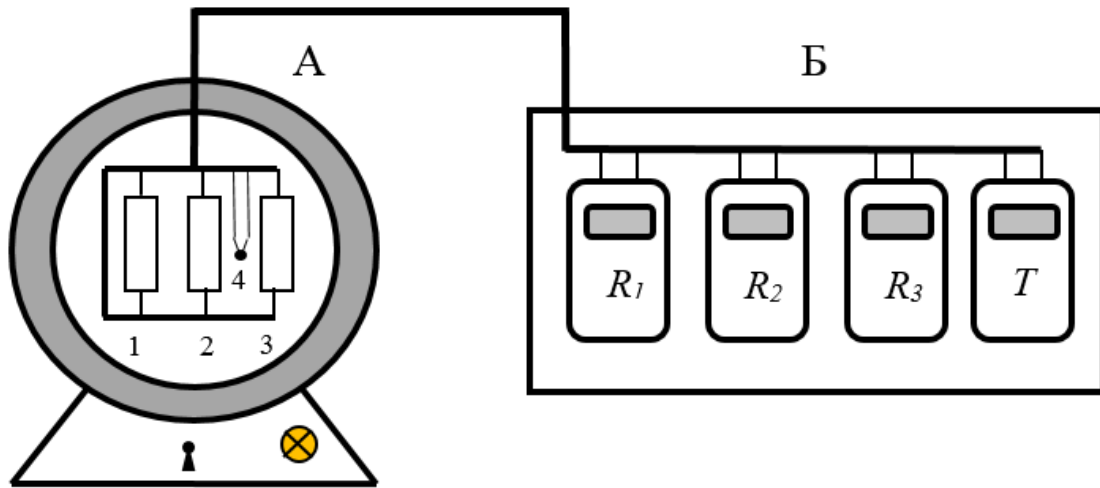


Рис. 10. Схема лабораторної установки для дослідження температурної залежності опору металів та напівпровідників.

Досліджувані металеві резистори 1 і 2, а також напівпровідниковий терморезистор 3 розташовані у термошафі, температура у якому змінюється за допомогою електронагрівника, що живиться від мережі 220 В. Швидкість нагрівання регулюється за допомогою додаткового реостата, розташованого у корпусі термошафи. Для вимірювання температури використано стандартну термопару 4, розташовану безпосередньо біля досліджуваних резисторів. Максимальна температура у термошафі обмежена 100°C , оскільки металеві резистори виконані у виді намотаних котушок з проводу, ізоляція якого при вищих температурах може бути пошкоджена. Резистори, як і термопара, за допомогою багатожильного кабелю під'єднані до лабораторного стенду на якому розташовані цифрові мультиметри для вимірювання опору і температури.

Змінюючи температуру в термошафі, через кожні $(3 - 5)^{\circ}\text{C}$ вимірюють опори R_1 , R_2 і R_3 . Для металевих резисторів за одержаними даними будують графіки $R = f(T)$, із якого визначають температурний коефіцієнт опору за формулою:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)}, \quad (7)$$

де R_1 і R_2 – опір котушки при температурах T_1 і T_2 відповідно.

Дослідження температурної залежності питомої електропровідності напівпровідників проводять вимірюючи не провідність σ , а опір напівпровідника R , які зв'язані між собою наступним співвідношенням:

$$\sigma = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{S},$$

де S – площа поперечного перерізу досліджуваного зразка, l – його довжина. Зміна опору з температурою описується експоненціальним законом (6). Логарифмуючи вираз (6) одержимо

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{E}{2k} \cdot \frac{1}{T} \quad (8)$$

У напівлогарифмічному масштабі графік залежності $\ln R = f(1/T)$ буде мати вигляд прямої лінії, нахил якої до осі абсцис визначається величиною:

$$\operatorname{tg} \varphi = \Delta E / (2k). \quad (9)$$

Із графіка визначають:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \quad (10)$$

де R_1 і R_2 – опір напівпровідника при температурах T_1 і T_2 відповідно. Тоді

$$\Delta E = (2k) \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = (2k) \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (11)$$

3. Завдання та хід виконання роботи

1. Встановити в омметрах для вимірювання опору металів (R_1 , R_2) перемикачем піддіпазон 200 Ом, а для напівпровідника - 2кОм.

2. Увімкнути шнури живлення термошафи і лабораторного стенду в електромережу. Вимірювання опору розпочати з кімнатної температури.

3. Через кожні 4–5°C в інтервалі температур 20–100°C виміряти опір металевих котушок і напівпровідника. Вимірювання опору провести як при нагріванні, так і при охолодженні. При охолодженні нагрівник термошафи вимкнути. Одержані результати занести у таблицю.

Завдання 1. Дослідження температурної залежності опору металів.
Визначення температурного коефіцієнту опору

1. Побудувати графік залежності $R_M = f(t)$, переконатися в його лінійності.

2. Із графіків визначити опори R_1 і R_2 при температурах T_1 і T_2 (для зменшення похибки інтервал $\Delta T = T_2 - T_1$ слід вибирати достатньо великим. За формулою (7) обчислити температурний коефіцієнт опору. Порівняти одержаний результат з табличним для досліджуваних матеріалів (міді і манганіну).

Завдання 2. Дослідження температурної залежності опору
напівпровідників. Визначення енергії активації електропровідності
напівпровідника

1. Доповнити одержану таблицю даних колонками T (у Кельвінах), $1/T$ (у K^{-1}), $\ln R_{НП}$.

2. Побудувати графіки $R_{НП} = f(T)$, та $\ln R_{НП} = f(1/T)$. Переконатися в лінійності залежності логарифма опору напівпровідника від оберненої температури.

3. З графіка знайти значення $\ln R_1$ і $\ln R_2$ при температурах T_1 і T_2 , за формулою (11) визначити енергію активації електропровідності ΔE і виразити її в електрон-вольтах.

Контрольні запитання

1. Сформулювати основні положення класичної електронної теорії металів (КЕТМ).

2. На основі положень КЕТМ вивести формули електропровідності та закону Ома у диференціальній формі.

3. Чим пояснюється той факт, що класична електронна теорія металів дає залежність типу $R \sim T^{0,5}$, а експеримент $R \sim T^{1,0}$?

4. Які механізми розсіювання електронних хвиль мають місце в металах?

5. Чим відрізняються напівпровідники від металів та діелектриків?

6. Який напівпровідник називається власним?

7. Який напівпровідник називається домішковим? Що таке донорні та акцепторні домішки?

8. На прикладі двовимірної ґратки кремнію пояснити механізм власної та домішкової провідності.

9. Як змінюється рухливість та концентрація носіїв заряду у напівпровідниках з температурою?

10. Пояснити температурний хід електропровідності власного та домішкового напівпровідника.

11. Як визначається термічна ширини забороненої зони напівпровідника?

Лабораторна робота № 7

ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ РЕЗИСТОРА, ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА ТА ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ, ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ. ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЗСУВУ ФАЗ МІЖ СТРУМОМ І НАПРУГОЮ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи: обчислити опір резистора, ємність конденсатора та індуктивність котушки, перевірити виконання закону Ома за вимірними значеннями струму і напруги у колі змінного струму з різними елементами. Порівняти обчислені та одержані експериментально значення потужності та зсуву фаз між струмом і напругою.

Прилади та матеріали: Лабораторні макети з резисторами, конденсаторами та котушками індуктивності, міліамперметр, вольтметр типу електромагнітної системи Э59, ватметр електродинамічної системи типу Д539, (або комплект вимірювальний К505) лабораторний автотрансформатор ЛАТР.

1. Теоретичні відомості

Змінним струмом називають такий струм, який періодично змінюється як за значенням, так і за напрямом. Зазначимо, що характер зміни сили струму з часом у загальному випадку може бути різним. Найпростішим є гармонічний або синусоїдальний закон зміни струму:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

де I – миттєве значення, I_0 – амплітуда струму, ω – циклічна частота, $\omega t + \varphi_0$ – фаза коливань, φ_0 – початкова фаза.

Змінні електричні струми створюють у навколишньому середовищі змінні електромагнітні поля, які поширюються у просторі зі скінченою швидкістю. Для технічних струмів, які змінюються з часом досить повільно і протікають в електричних системах порівняно не великих розмірів, їхні електромагнітні поля проходять ці відстані практично миттєво. Отже, для таких струмів і їхніх електричних кіл з достатньою точністю можна вважати електромагнітне поле однаковим у всіх ділянках кола. У провідниках також нехтують струмами зміщення (струми, які породжуються змінним електричним полем) і

враховують лише струми провідності. Струми, які задовольняють цим умовам, називають *квазістаціонарними*.

Умову *квазістаціонарності* змінного струму можна записати так. Якщо відстань між найбільш віддаленими точками електричного кола l , а швидкість поширення електромагнітного поля вздовж кола (лінії) u , то найбільший час, необхідний для поширення поля в колі, $t = l/u$. Тоді умова квазістаціонарності має вигляд: $t \ll T$, де T – період коливань, що відбуваються в колі, або $l \ll \lambda$, де $\lambda = u \times T$ – довжина електромагнітної хвилі, що відповідає періоду T . Для звичайного технічного змінного струму $\lambda = 3 \times 10^8 \text{ м/с} \times 0,02 \text{ с} = 6 \times 10^6 \text{ м} = 6 \times 10^3 \text{ км}$. Тому технічний струм у лініях довжиною в кілька сотень кілометрів можна розглядати як квазістаціонарний. Величина струму в даний момент часу в будь-якій точці такого кола однакова, бо зміна струму відбувається досить повільно, а електромагнітні поля поширюються по колу з швидкістю, рівною швидкості світла.

При включенні в електричне коло змінного синусоїдального струму (1) резистора, конденсатора та ідеальної (без опору) котушки індуктивності напруга U на цих елементах змінюватиметься за законами:

$$U_R = IR = I_0 R \sin(\omega t + \varphi_0) = U_{0R} \sin(\omega t + \varphi_0);$$

$$U_L = I_0 \omega L \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) = U_{0L} \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right); \quad (2)$$

$$U_C = I_0 \frac{1}{\omega C} \sin\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right) = U_{0C} \sin\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right).$$

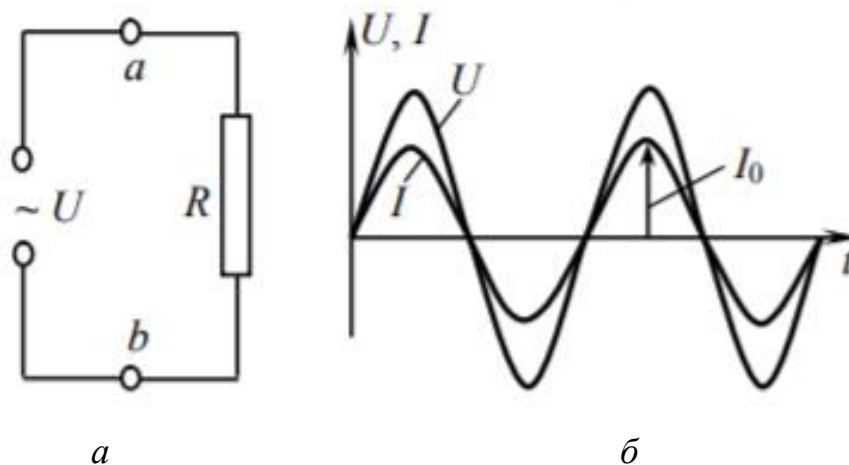


Рис. 1. Резистор у колі змінного струму (а).
Коливання струму і напруги на омичному опорі (б).

Із наведених виразів слідує, що зміна струму і напруги співпадає за фазою тільки на активному опорі (рис. 1), в той час як на індуктивності напруга випереджає струм на $\pi/2$ (рис. 2), а на ємності відстає за фазою на $\pi/2$ (рис. 3).

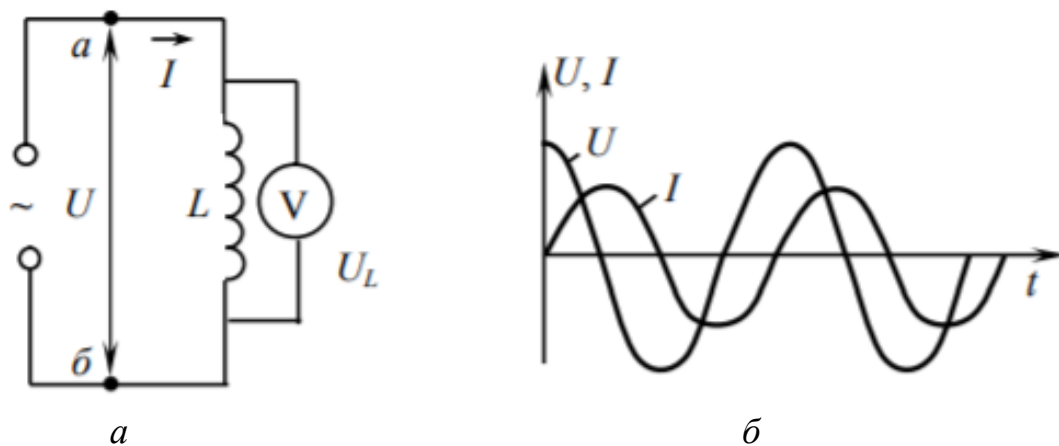


Рис. 2. Котушка індуктивності у колі змінного струму (а). Коливання струму і напруги у котушці індуктивності (б).

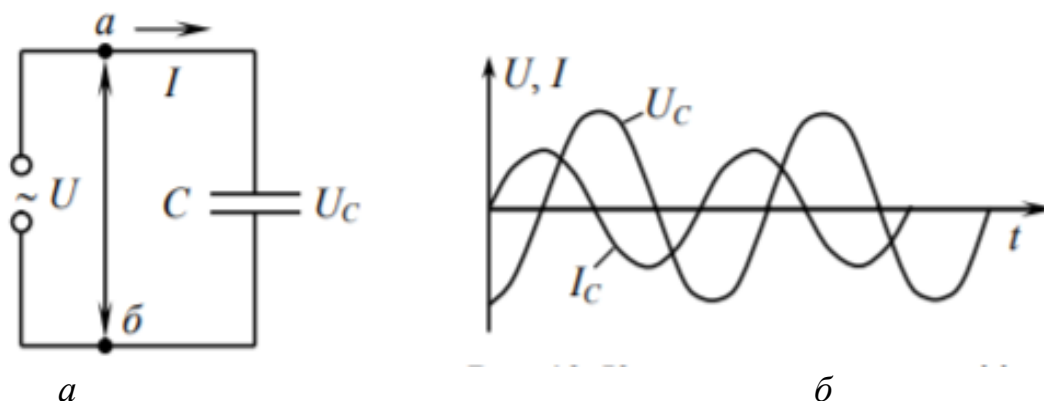


Рис. 3. Конденсатор у колі змінного струму (а). Коливання струму і напруги на конденсаторі (б).

Векторні діаграми. Гармонічні коливання можна представити як проекцію вектора, що обертається із кутовою швидкістю ω , на вибраний напрям, наприклад вісь x . Враховуючи це, розглянуті вище коливання струмів і напруг при $t = 0$, $\varphi_0 = 0$ на опорі, індуктивності і ємності можуть бути представлені як векторні діаграми, які наведені на рис. 4. Напрямок вектора визначається кутом, який відраховується від позитивного напрямку осі дійсних величин. Якщо кут позитивний, то він відраховується проти годинникової стрілки, і навпаки: негативний – за годинниковою стрілкою

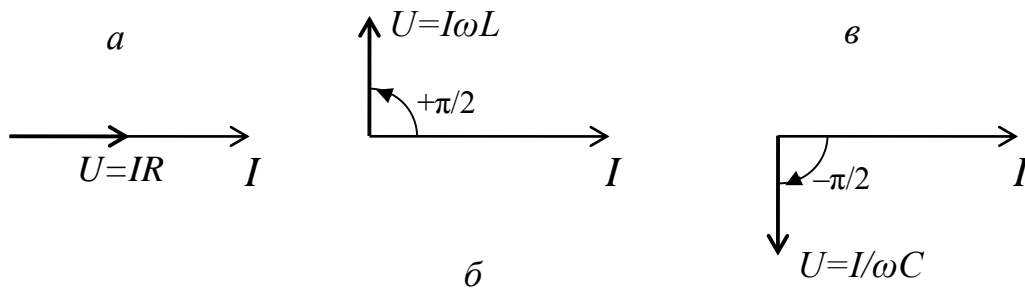


Рис. 4. Найпростіші векторні діаграми.

Комплексні опори. У комплексній площині, усякий вектор зображується відрізком, довжина якого в масштабі виражає модуль вектора. Для того, щоб виконувались співвідношення між векторами струму I і напруги U , які наведені на рис. 4 необхідно опори резистора, котушки індуктивності і конденсатора представити у виді комплексних величин \tilde{Z} :

$$\tilde{Z}_R = R, \quad \tilde{Z}_L = i\omega L, \quad \tilde{Z}_C = -\frac{i}{\omega C}, \quad (3)$$

де $i = \sqrt{-1}$.

Така формалізація дозволяє значно спростувати розрахунки струмів і напруг у колах змінного струму, які містять поряд з активними опорами резисторів реактивні опори конденсаторів і котушок індуктивності, і використовувати такі ж правила як при розрахунку кіл постійного струму. Наприклад, при послідовному з'єднанні елементів електричного кола їх комплексні опори додаються. Зокрема при послідовному з'єднанні резистора, котушки та конденсатора (рис. 5, а) комплексний опір \tilde{Z} і його модуль $|\tilde{Z}|$ обчислюються за формулами (4), а відповідна векторна діаграма представлена на рис. 5, б.

$$\tilde{Z} = R + i\left(\omega L + \frac{1}{\omega C}\right) \quad |\tilde{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (4)$$

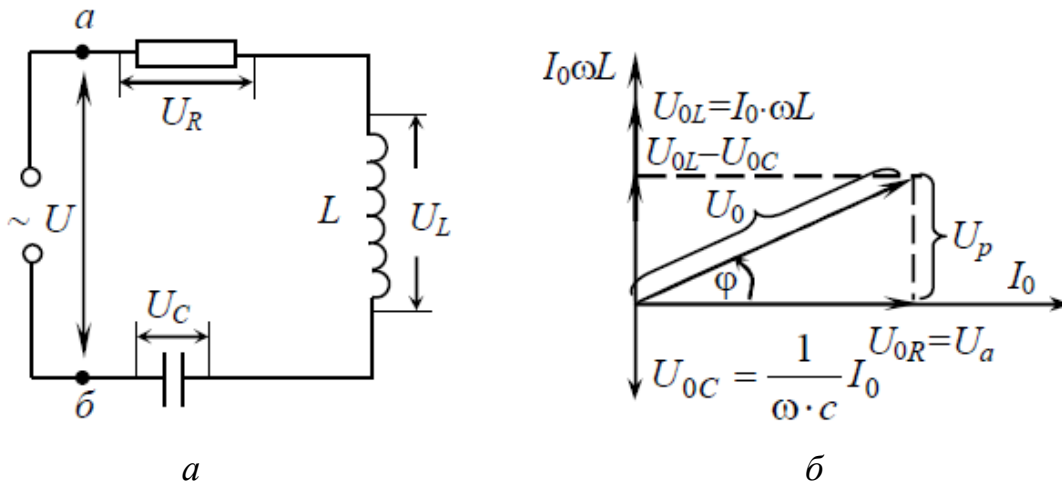


Рис. 5. Послідовне з'єднання резистора, котушки та конденсатора (а) та відповідна векторна діаграма (б).

Зазначимо, що величину струму і напругу змінних струмів у електротехніці характеризують їх ефективними значеннями. Так само всі амперметри і вольтметри для вимірювання змінного струму звичайно градуують за ефективними значеннями струму і напруги. Діюче (ефективне) значення змінного струму I_D і напруги U_D визначається за його тепловою дією і для синусоїдального струму

$$I_D = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_D = \frac{U_0}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

а модуль комплексного опору

$$|\tilde{Z}| = \frac{U_D}{I_D}. \quad (5)$$

Отже вимірюючи діючі (ефективні) значення змінного струму I_D і напруги U_D за формулою (5) можна визначити модуль комплексного опору, і далі, з врахуванням формул (3) і (4), розрахувати опір резистора, ємність конденсатора і індуктивність котушки, включених у коло змінного струму.

Розглянемо, чому дорівнює робота, яка виконується в колі, коли у ньому протікає змінний струм. Робота змінного струму в колі, як і постійного, визначається його напругою і силою. Але оскільки обидві ці величини змінюються в часі, потужність струму також є змінною. Для характеристики роботи струму в певний момент часу вводять поняття *миттєвої потужності струму*, як відношення роботи, яку

виконує струм за проміжок часу Δt , набагато менший від періоду коливань струму T , до цього проміжку часу.

У загальному випадку, коли в електричному колі змінного струму, крім активного опору є й реактивний (ємність та індуктивність), між коливаннями сили струму і напруги виникає зсув фаз φ , і значення миттєвої потужності:

$$P_M = I_0 \sin \omega t \cdot U_0 \sin (\omega t + \varphi) = (1/2) I_0 U_0 [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = I_D U_D [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]. \quad (6)$$

Вираз у квадратних дужках, а, отже, і миттєва потужність, може бути як додатним, так і від'ємним. Додатна миттєва потужність - це потужність, яка поступає в електричне коло від генератора. Від'ємна миттєва потужність - це потужність яка віддається генератору, і яка виникає з струмів самоіндукції, що виникають у колі, і розрядних струмів конденсаторів.

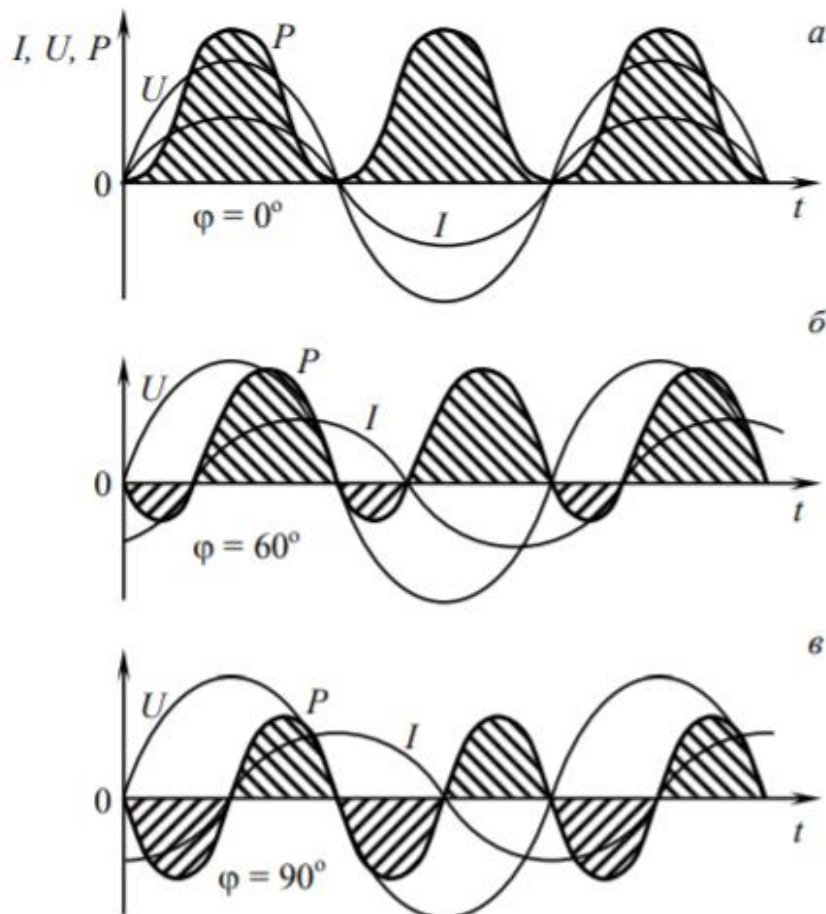


Рис. 6. Коливання миттєвої потужності змінного струму:
 а - коло має суто активний опір; б - зсув фаз між струмом і напругою $\varphi = 60^\circ$;
 в - випадок суто реактивного опору.

На рис. 4 наведені графіки зміни миттєвої потужності (заштриховані площі) при різних кутах зсуву фаз у колі змінного струму. Із цих графіків видно, що протягом одного періоду струму миттєва потужність чотири рази змінює знак. При $\varphi = 0$ у всі моменти часу миттєва потужність додатна, вона витрачається у колі на виконання різних видів робіт. При $0 < \varphi < \pi/2$ в окремі проміжки часу миттєва потужність від'ємна (відповідає заштрихованим площам нижче осі часу). Від'ємна миттєва потужність характеризує процес передавання енергії генератору із електричного і магнітного полів кола. При $\varphi = \pi/2$ додатна миттєва потужність дорівнює від'ємній потужності, додатна робота струму за період (заштриховані площі вище осі часу) буде дорівнювати від'ємній його роботі (заштриховані площі нижче осі часу). Робота струму за період дорівнює нулю, а отже середня потужність струму також дорівнює нулю. При цьому енергія періодично накопичується у магнітних і електричних полях, а потім знову передається до генератора. Останній випадок може реалізуватися лише при $R = 0$.

Середнє значення споживаної потужності \bar{P} можна одержати з виразу (6) його усередненням у часі. Очевидно, що другий доданок у квадратних дужках періодична функція $\cos(2\omega t + \varphi)$, яка приймає як додатні так і від'ємні значення, тому у середньому вона рівна нулю, тобто середня *активна потужність* електричного кола для синусоїдального струму:

$$P_A = \bar{P} = \bar{P}_M = I_D U_D \cos \varphi, \quad (7)$$

де φ – зсув фаз між струмом та напругою.

З фізичної точки зору, активна потужність P_A - це енергія, яка у вигляді тепла виділяється за одиницю часу в нерухомому провіднику першого роду опором R (тому цей опір і називають активним). Таким чином, активна потужність P_A залежить не тільки від сили струму I_D і напруги U_D , але й від зсуву фаз між напругою і струмом. Максимальне значення $P_{\text{МАКС}} = I_D \cdot U_D$ досягається при $\varphi = 0$. Отже, $\cos \varphi = P_A / P_{\text{МАКС}}$ показує, яку частину активна потужність складає від максимально можливої при тих же значеннях сили струму і напруги у колі. Величина $\cos \varphi$ називається *коефіцієнтом потужності*. Якщо в колі реактивний опір відсутній, то $\cos \varphi = 1$ і $P_{\text{МАКС}} = I_D U_D$. Якщо ж коло містить тільки реактивний опір, то $\cos \varphi = 0$ і середня потужність дорівнює нулю, якими б великими не були напруга і струм, тобто на

ідеальній індуктивності (L) і ємності (C) струм ніякої роботи не виконує.

2. Методика проведення експерименту

Для проведення вимірювань використовується схема, приведена на рис.7 .

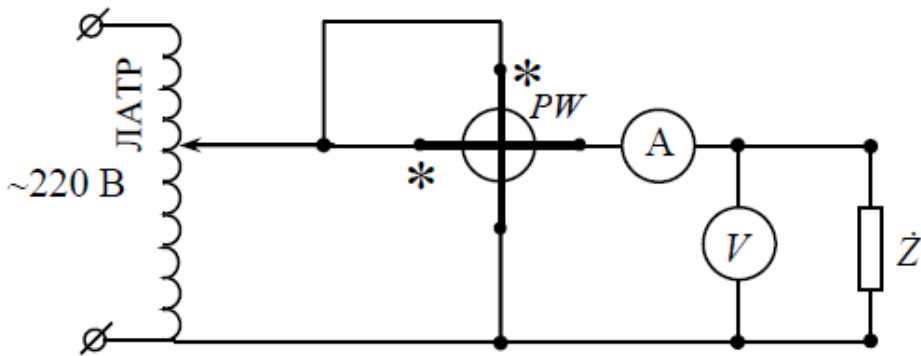


Рис. 7. Електрична схема для проведення вимірювань.

Для вимірювання сили струму і напруги використовуються міліамперметр і вольтметр електромагнітної системи та ватметр електродинамічної системи (або комплект вимірювальний К505). Змінна напруга в схемі регулюється лабораторним автотрансформатором ЛАТР, у який вмонтовано вольтметр для контролю напруги. На окремому лабораторному стенді змонтовані резистори, конденсатори та котушки індуктивності із зафіксованими виводами для зручності їх з'єднання і підключення.

В якості навантаження \tilde{Z} схеми, наведеної на рис. 7, використовуються різні комбінації з'єднань резистора, конденсатора і котушки які показані на рис. 8.

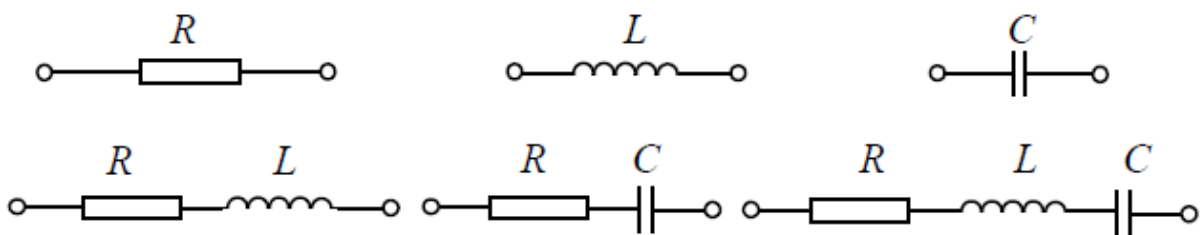


Рис.8. Комбінації з'єднань опору, конденсатора і котушки.

3. Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Вимірювання опору резистора, ємності конденсатора та індуктивності котушки в колі змінного струму

1. Виміряти і занести у таблиці 1, 2, 3 по п'ять значень U_D , I_D та P для включених у коло змінного струму резистора, конденсатора і котушки індуктивності (верхній рядок на рис. 8).

2. Занести у таблицю класи точності γ приладів, номінальні значення вимірюваних величин X_H та оцінити максимальне значення відносної систематичної похибки $\varepsilon_{СИСТ}(в\%) = (\gamma X_H)/(X_{МИН})$, де $X_{МИН}$ мінімальне значення вимірюваної величини.

3. За приведеними нижче формулами, які слідують з виразів (3) та (5), обчислити модуль комплексного опору $|\tilde{Z}|$, опір резистора R , ємність конденсатора C та індуктивність котушки L . Врахувати, що активний опір котушки індуктивності (опір на постійному струмі) $R_L = 600$ Ом, циклічна частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад).

$$|\tilde{Z}| = \frac{U_D}{I_D}, \quad R = |\tilde{Z}|, \quad C = \frac{1}{\omega |\tilde{Z}|}, \quad L = \frac{1}{\omega} \sqrt{|\tilde{Z}|^2 - R_L^2}.$$

4. Знайти середні значення, оцінити відносні випадкову $\varepsilon_{ВИП}$ і загальну $\varepsilon_{ЗАГ}$ та абсолютну похибки вимірюваних величин.

Таблиця 1. Вимірювання опору резистора. *

U_D , В	150	140	130	120	110	$\gamma=0,5; U_H=150В; \varepsilon_C=$
I_D , мА	197	175	163	150	137	$\gamma=0,5; I_H=200мА; \varepsilon_C=$
Z , Ом						
R , Ом						$R=\langle R \rangle \pm \Delta R =$
P , Вт	29,25	24,0	21,25	18,00	15,00	$\gamma=0,5; P_H=37,5Вт$
$\cos\varphi$						$\cos\varphi = \langle \cos\varphi \rangle \pm \Delta(\cos\varphi) =$
$(\cos\varphi)_T$	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$(\cos\varphi)_T =$

Таблиця 2. Вимірювання ємності конденсатора. *

U_D , В	150	140	130	120	110	$\gamma=0,5; U_H=150В; \varepsilon_C=$
I_D , мА	141	132	124	113	104	$\gamma=0,5; I_H=200мА; \varepsilon_C=$
Z , Ом						
C , мкФ						$C = \langle C \rangle \pm \Delta C =$
P , Вт	0,50	0,50	0,25	0,25	0,25	$\gamma=0,5; P_H=37,5Вт$
$\cos\varphi$						$\cos\varphi = \langle \cos\varphi \rangle \pm \Delta(\cos\varphi) =$
$(\cos\varphi)_T$	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$(\cos\varphi)_T =$

Таблиця 3. Вимірювання індуктивності котушки. *

U_D , В	150	140	130	120	110	$\gamma=0,5; U_H=150В; \epsilon_C=$
I_D , мА	172	161	149	138	126	$\gamma=0,5; I_H=200мА; \epsilon_C=$
Z , Ом						
L , Гн						$L=<L>\pm\Delta L=$
P , Вт	18,00	15,75	13,50	11,50	9,75	$\gamma=0,5; P_H=37,5Вт$
$\cos\varphi$						$\cos\varphi=<\cos\varphi>\pm\Delta(\cos\varphi)=$
$(\cos\varphi)_T$	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$(\cos\varphi)_T=$

Завдання 2. Перевірка закону Ома для кола змінного струму

1. Виміряти і занести у таблицю 4 п'ять значень U_D , I_D та P для випадку включення у коло змінного струму послідовно з'єднаних конденсатора і котушки.

2. Занести у таблицю класи точності γ приладів, номінальні значення вимірюваних величин X_H та оцінити максимальне значення відносної систематичної похибки $\epsilon_{\text{сист}}(\text{в } \%) = (\gamma X_H)/(X_{\text{мін}})$, де $X_{\text{мін}}$ - мінімальне значення вимірюваної величини.

3. За приведеними нижче формулами, які слідують з виразів (3) та (5), обчислити експериментальне значення модуля комплексного опору (Z_E), та його теоретичне значення (Z_T) з використанням знайдених у Завданні 1 значень L і C . Врахувати, що активний опір котушки індуктивності (опір на постійному струмі) $R_L=600$ Ом, циклічна частота $\omega = 2\pi f = 2*3,14*50 = 314$ (рад).

$$Z_E = \frac{U_D}{I_D}, \quad Z_T = \sqrt{R_L^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

4. Зробити висновок, щодо справедливості закону Ома для кіл змінного струму.

Таблиця 4. Перевірка закону Ома для кола змінного струму. *

U_D , В	140	130	120	110	100	$\gamma=0,5; U_H=150В; \epsilon_C=$
I_D , мА	190	176	162	149	135	$\gamma=0,5; I_H=200мА; \epsilon_C=$
Z_E , Ом						$Z_E=<Z_E>\pm\Delta Z_E=$
Z_T , Ом	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$Z_T=$
P , Вт	21,50	18,5	15,75	13,25	11,00	$\gamma=0,5; P_H=37,5Вт$
$\cos\varphi$						$\cos\varphi=<\cos\varphi>\pm\Delta(\cos\varphi)=$
$(\cos\varphi)_T$	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$(\cos\varphi)_T$

Завдання 3. Вимірювання потужності та зсуву фаз між струмом і напругою у колі змінного струму

1. Доповнити попередні результати вимірюванням п'яти значень U_D , I_D та P для кола з послідовно з'єднаними резистора R та конденсатора C (таблиця 5), або іншою схемою включення елементів R , L , C (за вказівкою викладача).

2. За приведеними нижче формулами, які сліднують з виразів (3), (5) та (7) та векторної діаграми (рис. 5, б) обчислити експериментальні значення косинуса кута зсуву фаз між струмом і напругою ($\cos \varphi$) у колі змінного струму та їх теоретичні значення $(\cos \varphi)_{TEOP}$ з використанням знайдених у Завданні 1 значень R , L і C . Врахувати, що активний опір котушки індуктивності (опір на постійному струмі) $R_L = 600$ Ом, циклічна частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ (рад).

$$\cos \varphi = \frac{P}{I_D U_D}, \quad \text{для } R \Rightarrow (\cos \varphi)_{TEOP} = 1, \quad \text{для } C \Rightarrow (\cos \varphi)_{TEOP} = 0,$$

$$\text{для } RL \Rightarrow (\cos \varphi)_{TEOP} = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}}, \quad \text{для } RC \Rightarrow (\cos \varphi)_{TEOP} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$\text{для } RLC \Rightarrow (\cos \varphi)_{TEOP} = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

3. Порівняти експериментальні $\cos \varphi$ та теоретичні $(\cos \varphi)_{TEOP}$ значення, зробити висновок.

Таблиця 5. Вимірювання потужності та зсуву фаз між струмом і напругою у колі змінного струму. *

U_D , В	150	140	130	120	110	$\gamma=0,5; U_H=150\text{В}; \epsilon_C=$
I_D , мА	113	104	97	90	82	$\gamma=0,5; I_H=200\text{мА}; \epsilon_C=$
Z_E , Ом						$Z_E = \langle Z_E \rangle \pm \Delta Z_E =$
Z_T , Ом	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$Z_T =$
P , Вт	10,25	8,75	7,50	6,50	5,5	$\gamma=0,5; P_H=37,5\text{Вт}$
$\cos \varphi$						$\cos \varphi = \langle \cos \varphi \rangle \pm \Delta (\cos \varphi) =$
$(\cos \varphi)_T$	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	$(\cos \varphi)_T =$

* В Таблицях 1 - 5, як приклад, наведені дані серії вимірювань для одного з резисторів, конденсаторів, котушок лабораторного стенду.

Контрольні запитання

1. Який струм називається змінним? Як одержують змінний струм?
2. Поясніть умову квазістаціонарності змінного струму.
3. Назвіть основні характеристики змінного струму. Що таке зсув фаз?
4. Чому в колі змінного струму котушка індуктивності, крім активного опору, має індуктивний опір? Які причини появи цього опору?
5. Дати визначення ємнісного опору? Від чого він залежить?
6. Як визначити повний опір у колі змінного струму? Від чого він залежить?
7. Поясніть принцип побудови векторних діаграм.
8. Поясніть метод розрахунку струмів і напруг у колах змінного струму з використанням поняття комплексних опорів.
9. Як визначити зсув фаз у випадку наявності в колі змінного струму тільки індуктивного опору? Нарисувати векторну діаграму для цього випадку.
10. Чому закон Ома для кола змінного струму виконується тільки для амплітудних або ефективних значень напруги і струму?
11. Що називається імпедансом? Чому дорівнює модуль імпедансу?

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

Мета роботи: Вивчення процесів намагнічування феромагнетиків та визначення основних параметрів петлі магнітного гістерезису за допомогою осцилографа.

Прилади та матеріали: лабораторний макет з досліджуваним феромагнітним осердям, електронний осцилограф, амперметр електромагнітної системи на 0 – 200 мА, лабораторний авто-трансформатор (ЛАТР), набір з'єднувальних провідників.

1. Теоретичні відомості

1.1. Загальна характеристика магнітних властивостей матеріалів

Магнітні властивості речовини зумовлені трьома причинами: орбітальним моментом електронів, який виникає внаслідок їхніх рухів навколо ядер; магнітним моментом електронів, який перебуває у певному співвідношенні з власним механічним моментом – спіном; власним магнітним моментом, або спіном атомних ядер. Рух атомних ядер через їхню велику масу значно повільніший за рух електронів. Тому магнітні моменти атомних ядер на кілька порядків менші від орбітальних і спінових магнітних моментів електронів, і часто при розгляді магнітних властивостей речовини ними нехтують. Магнітні моменти електронів і ядер додаються за принципом суперпозиції полів, і одержується результуючий магнітний момент атома або молекули. Атоми і молекули речовини перебувають у безперервному хаотичному русі. Їхні результуючі магнітні моменти в кожний момент часу орієнтовані в просторі статистично рівномірно в усіх напрямках, тому збуджувані ними магнітні поля взаємно компенсуються. Під час внесення речовини в зовнішнє магнітне поле магнітні моменти атомів набувають переважної орієнтації у напрямку зовнішнього поля, і речовина стає джерелом додаткового магнітного поля. Отже, речовини які в зовнішньому магнітному полі змінюються так, що самі стають джерелами магнітного поля, називають *магнетиками*. Набуття магнітних властивостей речовиною під дією зовнішнього магнітного поля називають намагнічуванням.

Намагніченість – характеристика стану магнетика у зовнішньому магнітному полі. Кількісною мірою інтенсивності намагніченості

речовини є вектор намагніченості \vec{J} , який чисельно дорівнює сумарному магнітному моменту атомів одиниці об'єму магнетика:

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_{Mi}, \quad (1)$$

де $\vec{p}_{Mi} = I_{\text{мол}} \cdot S \cdot \vec{n}$ – магнітний момент молекулярних струмів $I_{\text{мол}}$ однієї молекули, S – площа контуру, який охоплює цей струм, \vec{n} – одиничний вектор нормалі до площі S , напрям якого визначається за правилом правого буравчика.

У першому наближенні, очевидно, чим більша напруженість H зовнішнього магнітного поля, тим більша буде його орієнтуюча дія, отже

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (2)$$

де χ – магнітна сприйнятливості речовини.

Виявляється, що J визначає ту додаткову (внутрішню) напруженість магнітного поля у магнетика, яка зумовлена його намагнічуванням.

Магнітна сприйнятливості χ – це безрозмірна фізична величина, яка характеризує здатність речовини змінювати свій магнітний момент (вектор намагніченості) під дією зовнішнього магнітного поля.

Магнітна індукція всередині магнетика є сумарною магнітною індукцією поля у вакуумі, створеного макрострумами, і магнітного поля, створеного молекулярними струмами магнетика:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}, \quad (3)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала (фундаментальна фізична константа).

Принагідно нагадаємо, що вектор індукції \vec{B} є силовою характеристикою магнітного поля, і показує силу Ампера, з якою поле діє на одиничний елемент струму $I \cdot l$, розташований перпендикулярно до вектора індукції \vec{B} .

З урахуванням (2) рівність (3) можна переписати так:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (4)$$

де $\mu = (1 + \chi)$ – характеристика магнітних властивостей речовини, яка одержала назву *магнітної проникності*.

На відміну від діелектричної проникності ϵ , яка для всіх діелектриків більша від одиниці, для магнетиків μ може бути як більшою, так і меншою від одиниці, оскільки χ може бути додатною і від'ємною.

Усі речовини за їх магнітними властивостями поділяють на *діамагнетики*, *парамагнетики* і *ферромагнетики*. Речовини, атоми яких не мають власного магнітного моменту, тобто у яких спінові та орбітальні магнітні моменти електронів взаємно скомпенсовані, називають *діамагнетиками*. Діамагнетики послаблюють зовнішнє магнітне поле своїми наведеними магнітними моментами атомів, які протилежні за напрямом до зовнішнього магнітного поля. Їх магнітна проникність $\mu < 1$, а магнітна сприйнятливість від'ємна $\chi < 0$, причому для всіх діамагнетиків $|\chi| \ll 1$.

Речовини, які складаються з атомів та молекул, що мають відмінний від нуля власний магнітний момент, називають *парамагнетиками*. Парамагнетики підсилюють зовнішнє поле ($\mu > 1$, $\chi > 0$), за рахунок орієнтації магнітних моментів окремих атомів або молекул вздовж магнітного поля. Зазвичай для більшості парамагнетиків також $|\chi| \ll 1$.

Ферромагнетики. У деяких речовинах магнітні моменти сусідніх атомів сильно взаємодіють один з одним. В результаті навіть за відсутності зовнішнього поля виникає спонтанне (самочинне) намагнічування, магнітні моменти сусідніх атомів виявляються орієнтованими паралельно (або антипаралельно) один одному. Зовнішнє поле змінює розміри областей спонтанної намагніченості (магнітних доменів). В результаті речовина намагнічується за полем, подібно до парамагнетика, але ефекти намагнічування виражені значно сильніше, ніж в діа- і парамагнетиках. Це ефекти, аналогічні поляризації сегнетоелектриків у електростатичному полі. Отже, *ферромагнетики* – речовини, які за певних умов мають (спонтанну) намагніченість, і величина їх магнітної проникності $\mu \gg 1$. Ферромагнетизм зумовлений міжелектронною обмінною взаємодією. Обмінна взаємодія – це специфічна квантова взаємодія між тотожними частинками, якими є електрони.

1.2. Механізм виникнення феромагнетизму

Необхідна умова феромагнетизму – наявність постійних (таких, що не залежать від зовнішніх магнітних полів) магнітних (спінових чи орбітальних, або тих і інших разом) моментів електронних оболонок атомів (іонів) речовини. Однак при конденсації магніто-активних атомів (іонів) у кристал чи аморфне тіло їхні електронні оболонки часто деформуються таким чином, що кристал чи аморфне тіло уже не має у своїх вузлах постійних магнітних моментів. Найбільшої перебудови при деформації зазнає зовнішній (валентний) шар електронної оболонки. Це зумовлено тим, що хвильові функції валентних електронів у сусідніх атомах в твердому тілі сильно перекриваються, що призводить до колективізації валентних електронів.

У випадку металів вони при цьому утворюють фермі-газ (чи фермі-рідину) електронів провідності, а у неметалічних речовинах – локалізовані спін-насичені зв'язки. Зазвичай, в обох випадках для основного стану ($T = 0 \text{ К}$ та $\vec{H} = 0$) намагніченість $\vec{J} = 0$. Експериментальні дослідження виявили у атомних ядрах (Fe, Co, Ni та деяких інших елементах) дуже сильні магнітні поля – до $10^1 \dots 10^2 \text{ Тл}$, джерелом яких є "деформовані" внутрішні $1s$ -, $2s$ - та $3s$ -шари оболонки іонних остовів. Електрони провідності, намагнічені через обмінну взаємодію з d - чи f - шарами атомної оболонки, приймають участь у спонтанному намагнічуванні феромагнетика.

У випадку, коли феромагнетик складається з атомів перехідних елементів, у ньому можливе збереження незалежного від зовнішнього поля магнітного моменту. При цьому можна розрізнити 4 основних типи феромагнітної речовини: 1) металічні речовини (чисті метали, сплави і сполуки) на основі перехідних елементів з недобудованими d -шарами (передусім $3d$ -шарами у атомах групи Fe); 2) металічні речовини на основі перехідних f -елементів (передусім рідкоземельних з недобудованим $4f$ - шаром); 3) неметалічні сполуки при наявності хоча б одного компонента з перехідних d - чи f - елементів; 4) сильно розбавлені розчини парамагнітних іонів d - чи f - елементів у діамагнітних речовинах.

Як приклад, розглянемо будову атома типового феромагнетика – заліза (рис. 1). Цифрами зазначена кількість електронів у шарах

оболонок, а стрілки \uparrow чи \downarrow вказують на напрямки їх спінів. Цей атом має 26 електронів. Перша оболонка складається з одного $1s$ - шару і має два електрони з протилежно орієнтованими спінами. Друга оболонка складається з двох ($2s$ та $2p$) шарів, містить вісім електронів (два на $2s$ - шарі та шість на $2p$). Третя оболонка недобудована (повинна містити 18 електронів). Вона складається з трьох ($3s$, $3p$ та $3d$) шарів, і містить 14 електронів (два на $3s$ - шарі, шість на $3p$ та шість на $3d$). Чотири електрона, яких не вистачає у третій оболонці, припадають на $3d$ - шар (рис. 1). Четверта оболонка також недобудована (може містити 32 електрони), вона складається з одного $4s$ - шару, що містить два електрони.

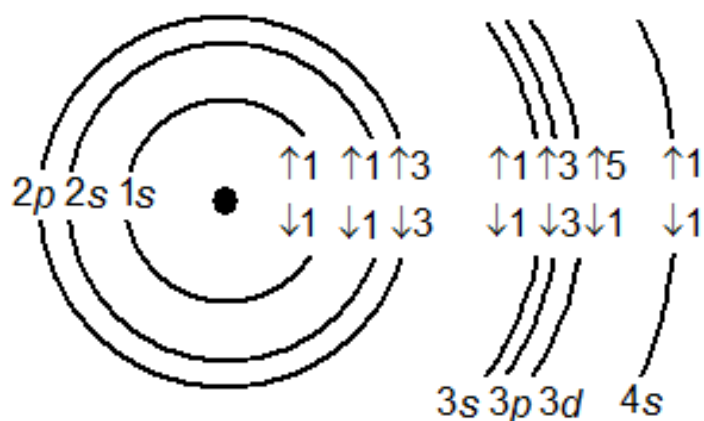


Рис. 1. Заповнення електронних оболонок атома заліза.

Природа власних магнітних моментів (спінів) електрона є такою, що вони можуть мати тільки одну з двох взаємно протилежних орієнтацій у просторі. На рис. 1 це зображено стрілками – \uparrow чи \downarrow . На кожній оболонці може міститися відповідне до правил квантування число електронів, а з урахуванням принципу Паулі їх подвоєна кількість з протилежною орієнтацією спінів. Повністю забудовані перша і друга оболонки мають однакову кількість електронів з \uparrow та \downarrow власними магнітними моментами. Ці моменти у кожній оболонці взаємно компенсують один одного. У третій оболонці $3s$ - та $3p$ - шари нейтральні у магнітному відношенні, а на $3d$ - шарі є чотири некомпенсовані (\downarrow) магнітні моменти. Магнітні моменти зовнішніх (валентних) електронів скомпенсовані. Відповідно, весь атом у цілому має певний магнітний момент за рахунок електронів недозаповненого $3d$ - шару.

Але наявність некомпенсованих власних магнітних моментів електронів є лише необхідною умовою ферромагнетизму. Виникнення

у всіх зазначених вище речовинах атомного магнітного порядку спричинено так званою *обмінною взаємодією* у магнетику. Обмінна взаємодія – суто квантомеханічний ефект, її неможливо описати за допомогою класичних моделей.

Енергія системи буде залежати від взаємної орієнтації спінів – паралельної чи антипаралельної. Встановлено, що при взаємодії багатоелектронних атомів феромагнітних елементів обмінна енергія виявляється меншою при паралельній ($\uparrow\uparrow$) орієнтації спінів сусідніх атомів або іонів. Саме різниця енергій, що відповідають паралельній і антипаралельній орієнтації спінів, називається обмінною енергією. Обмінна енергія буде визначатись як енергія переорієнтації заданого спіна у присутності інших. Квантова теорія показує, що вираз для енергії взаємодії i -го та j -го атомів має вигляд:

$$W = -2I_{ob}(\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j), \quad (5)$$

де \vec{S}_i, \vec{S}_j – спіни i -го та j -го атомів, а I_{ob} – обмінний інтеграл (параметр речовини, що визначає імовірність обміну електронами між атомами), величина якого залежить від ступеня перекриття електронних оболонок i -го та j -го атомів.

Стійкий стан системи слід очікувати у випадку коли \vec{S}_i і \vec{S}_j паралельні, а $I_{ob} > 0$ (згідно (5) значення W буде мінімальним).

Таким чином, причиною феромагнетизму є обмінна взаємодія, що намагається встановити спіни (а відповідно і магнітні моменти) сусідніх атомів або іонів паралельно один одному. У цьому випадку обмінний інтеграл має додатне значення, а енергія $W < 0$ – мінімальною.

Наявність у атомі внутрішніх недобудованих оболонок (існування некомпенсованих магнітних моментів електронів) та додатний знак обмінного інтегралу (що зумовлює паралельну орієнтацію цих моментів) є необхідною і достатньою умовами виникнення феромагнетизму.

1.3. Доменна структура феромагнетиків

З дослідів відомо, що при $\vec{H} = 0$ термодинамічному стійкому стану макрозразка (тобто мінімуму термодинамічному потенціалу) відповідає розмагнічений стан, оскільки в протилежному випадку на поверхні зразка, як правило, утворюються магнітні полюси, що

створюють розмагнічуюче поле і з яким пов'язана велика додатна енергія. Таким чином, виникає тенденція розмагнічування скінченних зразків, хоча обмінні сили намагаються їх «намагнітити». В результаті відбувається розбиття феромагнітного зразка на макрообласті однакової намагніченості – феромагнітні домени. Отже, феромагнетик у ненамагніченому стані спонтанно розбивається на домени, тобто просторові області, намагнічені до насичення внаслідок паралельної орієнтації в них спінових моментів (рис. 2). Теорія феромагнетизму якісно визначає розміри і форму доменів, які залежать від конкуренції різних взаємодій всередині феромагнетика. Рівноважна структура доменів при $\vec{H} = 0$ має вигляд сукупності зв'язаних замкнених магнітних потоків всередині зразка.

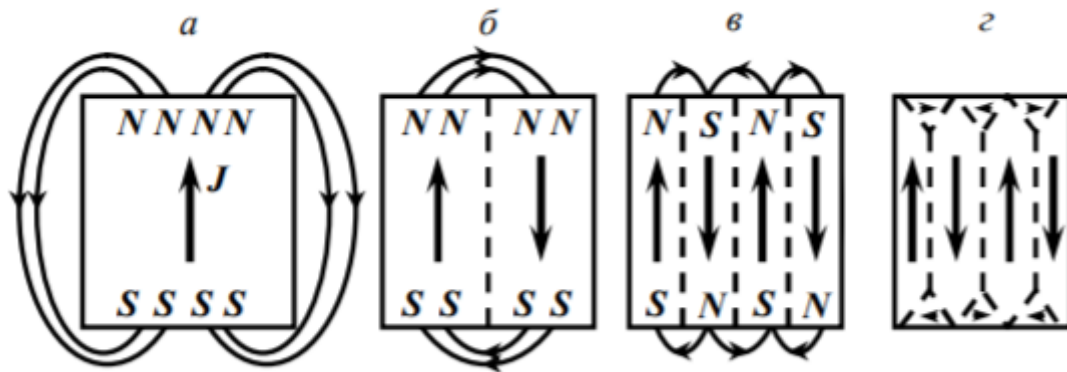


Рис. 2. Процес поетапного розбиття феромагнетика на домени.

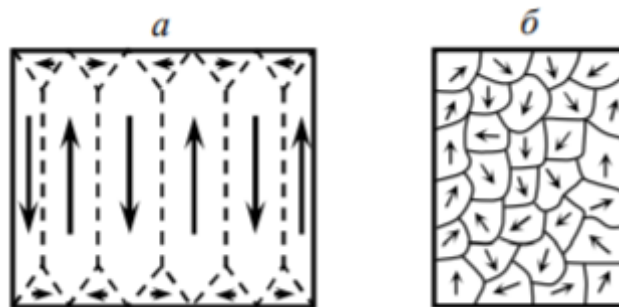


Рис. 3. Доменна структура одновісного монокристала згідно з теорією Ландау і Лівшица (а); доменна структура полікристала (б).

За відсутності зовнішнього поля результуючий магнітний момент феромагнетика дорівнює нулю, оскільки магнітні моменти доменів, як і маленьких кристаликів у полікристалічному зразку, орієнтовані хаотично (рис. 3, а,б). Між доменами утворюються проміжні шари (стінки) скінченої товщини, у яких вектор \vec{J} неперервно змінює свій напрямок від орієнтації, що відповідає вектору \vec{J} у одному домені, до орієнтації, що відповідає напрямку \vec{J} у сусідньому(рис. 4, а,б). На

утворення цих стінок витрачається додатна енергія, але її величина по всьому у зразку менше енергії поля, яка виникла б у відсутності доменів. Товщина стінки визначається конкуренцією двох факторів. З одного боку, будь-який проміжний стан між станами стабільних доменів має підвищену енергію, тому перехідний шар повинен би мати мінімальну товщину. Але, з іншого боку, різкі зміни структури зразка енергетично не вигідні.

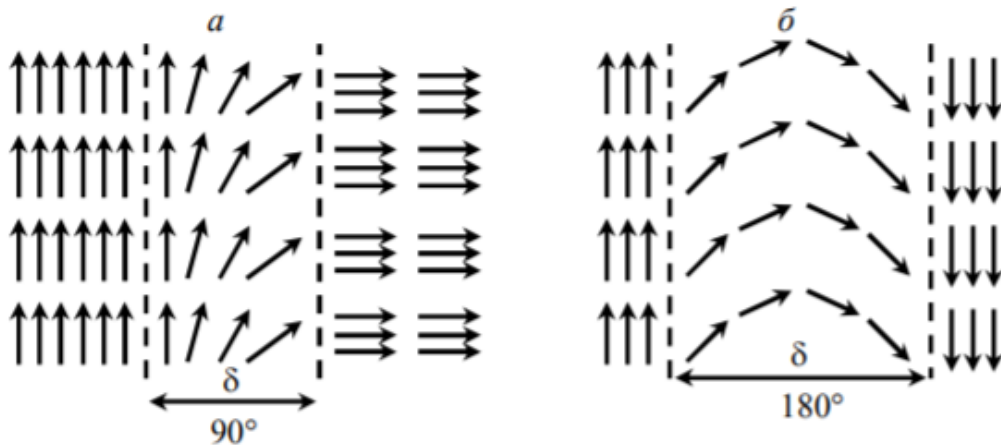


Рис. 4. Положення спінів всередині межі між доменами:
a – 90-градусна межа; *б* – 180-градусна межа.

Межа між доменами має скінчену товщину порядку 30 – 40 атомних діаметрів, тобто біля 0,5 – 0,6 мкм. Всередині цього граничного шару спіни поступово повертаються до їх напрямку в сусідньому домені (рис. 4).

Існування доменів у феромагнетиках доведено дослідями. Спостерігати домени в ненамагніченому феромагнетикі можна за допомогою дрібнодисперсного феромагнітного порошку або колоїдних магнітних суспензій, виготовлених з окислу заліза (метод Акулова - Біттєра). При осадженні тонкого шару магнітної суспензії на відполіровану поверхню феромагнетика феромагнітні частинки магнітного залізняку $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ збираються на межах доменів і роблять їх видимими. Спостереження проводять під мікроскопом.

1.4. Процеси намагнічування та перемагнічування у феромагнетиках

У зовнішньому магнітному полі феромагнетик почне намагнічуватись, тобто виникне і буде зростати його результуючий магнітний момент. Криві намагнічування та петлі гістерезису (процеси перемагнічування) визначаються, в першу чергу, зміною доменної

структури у зовнішньому магнітному полі \vec{H} . Це відбувається шляхом зміни об'єму доменів з різною орієнтацією векторів \vec{J} у них за рахунок зсуву границь доменів. Окрім того, відбувається обертання векторів \vec{J} у напрямку зовнішнього поля.

При розмагнічуванні феромагнетика із стану магнітного насичення відбувається відновлення доменної структури шляхом виникнення зародків перемагнічування – областей з зворотною (по відношенню до початкової) намагніченістю. Схематично процес намагнічування феромагнетика зображено на рис. 5.

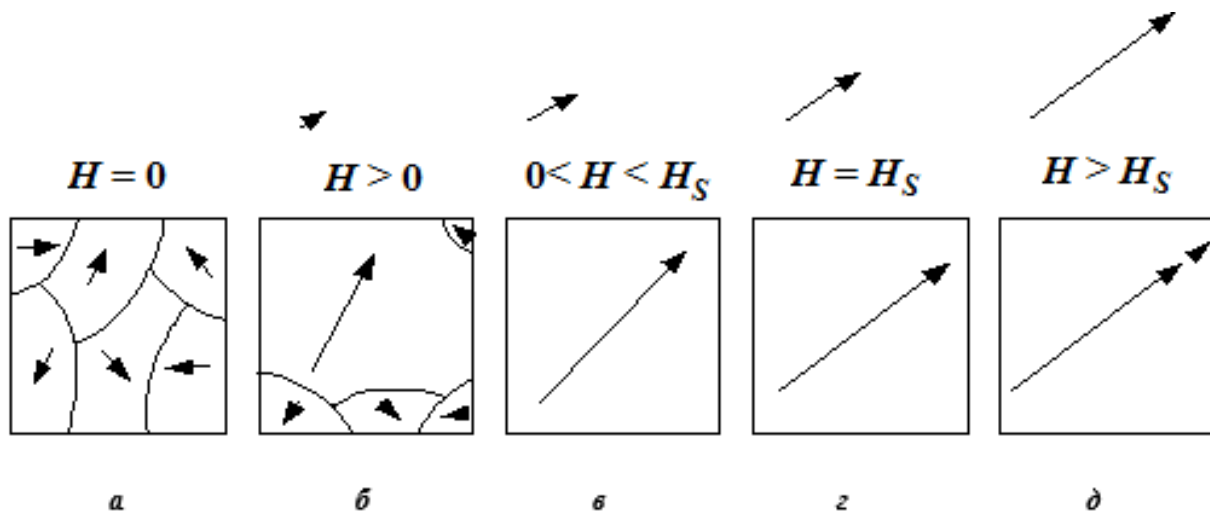


Рис. 5. Зміна у доменній структурі феромагнетика у зовнішньому магнітному полі.

На рис. 5, *a* зображено ділянку феромагнетика за відсутності зовнішнього магнітного поля ($\vec{H} = 0$). Збільшення зовнішнього магнітного поля ($\vec{H} > 0$) приводить до того, що об'єм доменів, орієнтація векторів \vec{J} у яких найбільш близька до орієнтації поля \vec{H} , буде зростати за рахунок сусідніх доменів з іншою орієнтацією \vec{J} (рис. 5, *б*). Це зростання відбувається шляхом зсуву доменних стінок. При деякому значенні поля \vec{H} феромагнетик буде складатися лише з одного домена з моментом \vec{J}_s (рис. 5, *в*). При подальшому збільшенні поля момент \vec{J}_s почне повертатися ближче до орієнтації \vec{H} до повного співпадання (рис. 5, *г*). При цьому має місце так зване технічне насичення. Величина технічного насичення дорівнює величині спонтанної намагніченості \vec{J}_s , оскільки моменти практично всіх існуючих магнітних моментів орієнтовані вздовж поля. Поле \vec{H}_s , що

відповідає цьому випадку, називається полем насичення. При подальшому збільшенні поля момент \vec{J}_S не змінює свого напрямку, однак буде незначно змінюватися його величина за рахунок так званого парамагнітного процесу (рис. 5, δ). Парамагнітний процес – це збільшення на завершальному етапі намагнічування феромагнетиків (після «зсуву» і «обертання» вектора \vec{J} в доменах), що зумовлене орієнтацією у полі \vec{H} елементарних носіїв магнетизму (спінових і орбітальних магнітних моментів атомів чи іонів), що залишилися невпорядкованими внаслідок теплового руху.

Слід зазначити, що розглянутий випадок є ідеалізованим. У реальних матеріалах ці три процеси («зсув», «обертання» та парамагнітний процес) можуть накладатися. Детальне вивчення кривої намагнічення феромагнетиків показало, що зі збільшенням напруженості магнітного поля \vec{H} зростання \vec{J} відбувається не плавно, а стрибкоподібно. Особливо це добре проявляється на ділянці різкого зростання кривої намагнічення (вставка на рис. 6, δ). Цей відрізок складається з великого числа сходинок, які відповідають окремим стрибкам у зміні \vec{J} при плавному збільшенні \vec{H} . Стрибкоподібний характер протікання процесу намагнічення був встановлений Баркгаузенем.

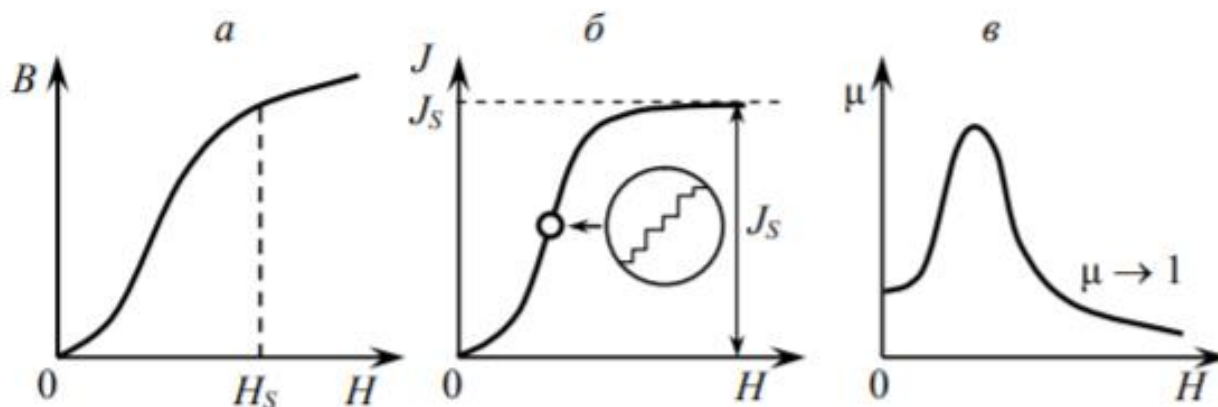


Рис. 6. Залежність магнітної індукції (a), намагніченості (b) і магнітної проникності (v) від напруженості магнітного поля.

Магнітна індукція \vec{B} у слабких полях зростає швидко зі зростанням \vec{H} внаслідок збільшення \vec{J} , а в сильних полях, оскільки другий доданок у формулі (3) сталий ($\vec{J} = \vec{J}_S$), \vec{B} зростає зі збільшенням \vec{H} за лінійним законом (рис. 6, a). Суттєва особливість

ферромагнетиків – не тільки велике значення μ , але і залежність μ від \vec{H} (рис. 6, в). Внаслідок нелінійної залежності \vec{B} від \vec{H} магнітна проникність μ залежить від напруженості магнітного поля. Крива залежності μ від \vec{H} зростає зі збільшенням поля від початкового значення $\mu_{\text{поч}}$ до деякої максимальної величини μ_{max} , але потім, після проходження через максимум,

Перемагнічування ферромагнетика полягає у зміні його намагніченості на протилежну. Це досягається зміною величини і напрямку магнітного поля, у якому знаходиться ферромагнетик. При перемагнічуванні доменна магнітна структура ферромагнетиків зумовлює явище магнітного гістерезису – відставання в змінах вектора намагніченості \vec{J} ферромагнетика від відповідних змін вектора напруженості \vec{H} зовнішнього намагнічуючого поля. Оскільки згідно формули (3) поведінка \vec{J} визначає і значення вектора індукції \vec{B} , то ці відставання виявлятимуться також у змінах векторів \vec{H} та \vec{B} при перемагнічуванні ферромагнетика в змінному полі. Гістерезис показує необоротний характер змін магнітних властивостей ферромагнетика під впливом магнітних процесів, яким він раніше піддавався.

Розглянемо спочатку магнітний гістерезис на прикладі перемагнічення у періодичному магнітному полі ненамагніченого ферромагнітного зразка. Поступово збільшуючи напруженість зовнішнього магнітного поля \vec{H} до певного значення \vec{H}_1 , одержуємо криву намагнічення $\vec{B}(\vec{H})$ (рис. 7, лінія OA_1). Внаслідок зміни \vec{H} від $+\vec{H}_1$, до $-\vec{H}_1$ крива намагнічення, як показують досліди, не збігається з кривою A_1O , а відстає і проходить по лінії $A_1C_1D_1$. Якщо відбувається наступна зміна від $-\vec{H}_1$, до $+\vec{H}_1$, то крива намагнічення пройде вздовж лінії $D_1F_1A_1$. Замкнену криву $A_1C_1D_1F_1A_1$ називають петлею гістерезису. Якщо початкову криву намагнічення продовжити до насичення (точка A), то при перемагнічуванні одержимо граничну петлю гістерезису $ACKDFK_1A$. Із цієї петлі видно, що після одержання кривої першого намагнічення OA зменшення напруженості зовнішнього магнітного поля H до нуля не спричиняє зменшення індукції B до нуля, яка зображується відрізком OC і характеризує залишкову намагніченість $J_{\text{зал}}$. Ферромагнетик у цьому стані є постійним магнітом

Щоб ліквідувати залишкову намагніченість, треба змінити напрям намагнічення на протилежний, змінивши напрям зовнішнього

поля \vec{H} . Напруженість, яка відповідає точці K і зумовлює повне розмагнічення феромагнетика, називають затримуючою, або коерцитивною, силою феромагнетика H_c .

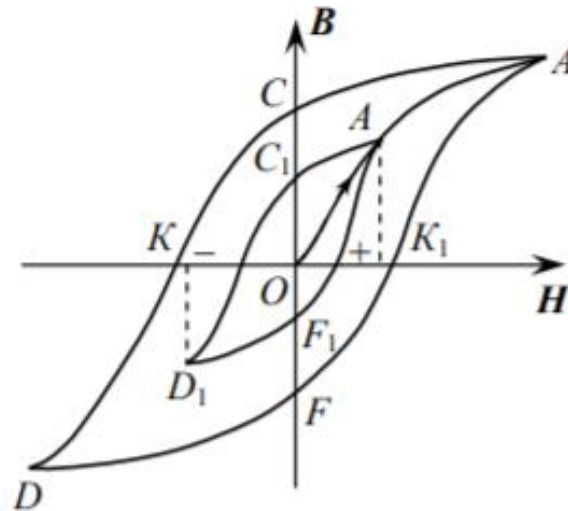


Рис. 7. Петля гістерезису феромагнетика.

Форма петлі гістерезису, залишкова намагніченість і коерцитивна сила – це основні характеристики феромагнітних матеріалів, які є різними для різних феромагнетиків. За цими характеристиками феромагнетика поділяють на магнітном'які, з великою магнітною проникністю і малою коерцитивною силою, та магнітотверді, з відносно великою магнітною проникністю і великою коерцитивною силою. Магнітном'які феромагнетика використовують у радіо- і електротехніці (різні осердя електромагнітів, трансформаторів тощо), магнітотверді – для виготовлення постійних магнітів. Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, яка розсіюється у феромагнетику за один цикл його перемагнічення.

2. Методика проведення експерименту

Магнітну індукцію зручно визначати за допомогою ЕРС, яка виникає при зміні магнітного потоку Φ в котушці, яка охоплює досліджуваний зразок:

$$\mathcal{E} = -d\Phi/dt. \quad (6)$$

Нехай котушка щільно охоплює зразок, а індукція B в зразку однорідна. У цьому випадку:

$$\Phi = SNB, \quad (7)$$

де N – число витків у вимірювальній котушці, S – площа витка. Підставляючи (7) у вихідну формулу (9), після інтегрування знайдемо:

$$B = - (1/SN) \int \mathcal{E} dt. \quad (8)$$

Таким чином, для визначення B потрібно проінтегрувати сигнал, наведений змінним магнітним полем у вимірювальній котушці, намотаній на зразок. Для інтегрування сигналу застосовують різного роду інтегруючі пристрої. Найпростіший із них складається з послідовно з'єднаних резистора та конденсатора (рис. 8). Вхідний струм I для цієї схеми:

$$I = \frac{U_{\text{вх}}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (9)$$

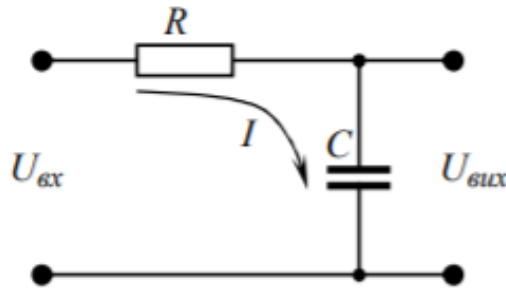


Рис. 8. Найпростіша схема інтегратора.

При умові $R \gg (1/\omega C)$ струм $I = U_{\text{вх}} / R$, а

$$U_{\text{вих}} = q/C = (1/C) \int I dt = (1/RC) \int U_{\text{вх}} dt. \quad (10)$$

Із виразу (10) бачимо, що вихідний сигнал RC -ланцюжка справді пропорційний інтегралу від вхідного. Цей висновок тим ближчий до істини, чим більше постійна часу $\tau = RC$ перевищує характерний час процесу – його період.

Принципова схема вимірювальної установки наведена на рис. 9.

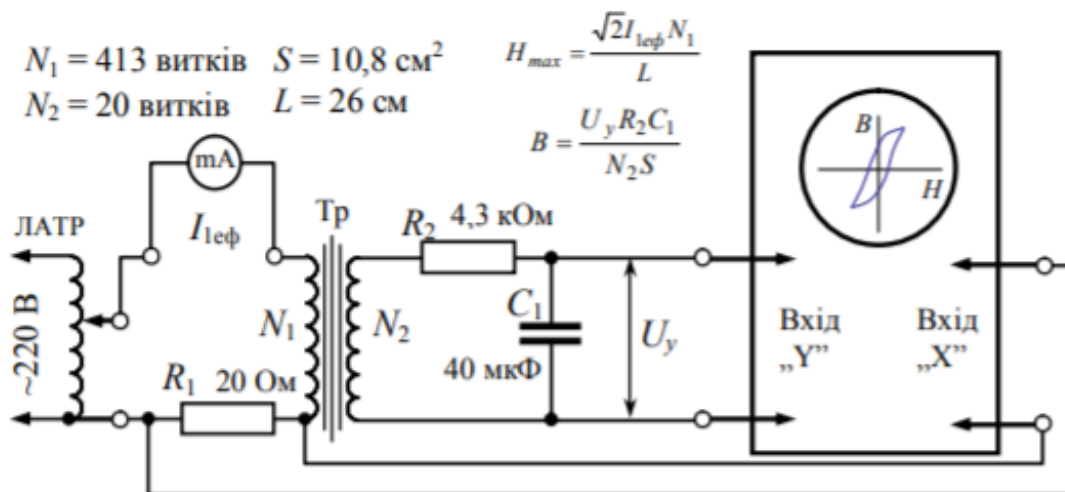


Рис. 9. Схема установки для дослідження намагнічування тороїдальних зразків феромагнетика.

Досліджуваний зразок магнетика є замкнутим кільцевим сердечником (тороїдом), складеним із тонких пластин трансформаторної сталі. На сердечник намотані намагнічувальна та вимірювальна обмотки з числом витків N_1 та N_2 , відповідно. Напряга з мережі частотою 50 Гц за допомогою автотрансформатора подається на намагнічувальну обмотку N_1 . Вимірювальна обмотка N_2 увімкнена до інтегруючого RC -ланцюжка. Через обмотку N_1 , від джерела напруги проходить змінний струм, величина якого вимірюється міліамперметром. Послідовно з міліамперметром з'єднаний резистор R_1 . На ньому виникає спад напруги, пропорційний струму в обмотці, а, отже, напруженості H магнітного поля в зразку. Цей сигнал подається на вхід «X» осцилографа. Сигнал U_y з інтегруючої ємності C , пропорційний величині вектора B , подається на вхід «Y». Картина на екрані осцилографа в певному масштабі відтворює петлю гістерезису досліджуваного зразка. Щоб надати цій кривій кількісний характер, необхідно установити масштаб зображення, тобто провести калібрування горизонтального і вертикального каналів осцилографа. Максимальний відхил по осі «X» електронного променя на екрані відповідає подвоєному амплітудному значенню струму в намагнічувальній обмотці, а отже, і максимальному значенню напруженості магнітного поля, яка обчислюється за формулою:

$$H_{\max} = 1,4 \times I_{\text{ef}} \times N_1 / L, \quad (11)$$

де L – довжина досліджуваного тороїдального сердечника (осердя) вздовж середньої лінії.

У вимірювальній котушці індукується ЕРС:

$$\mathcal{E} = U_C = N_2 \times S \times dB/dt, \quad (12)$$

де S – площа поперечного перерізу сердечника. Ця електрорушійна сила викликає у вимірювальній котушці струм $I_2 = \mathcal{E} / R_2$ (якщо знехтувати індуктивним опором котушки та ємнісним опором конденсатора C_1 , які набагато менші R_2). Струм I_2 створює на конденсаторі напругу:

$$U_C = q/C_1 = 1/C_1 \int I_2 dt = 1/RC_1 \int U_C \times dt, \quad (13)$$

яка подається на «Y» вхід осцилографа. Таким чином, враховуючи вираз (12):

$$U_y = - N_2 S B / R_2 C_1. \quad (14)$$

Звідки:

$$B = U_y C_1 R_2 / N_2 S. \quad (15)$$

Напруга U_y вимірюється каліброваним входом осцилографа, а значення $C_1 \times R_2$, N_1 , N_2 вказані на лабораторному макеті.

3. Завдання та хід виконання роботи

Завдання 1. Дослідження намагнічування феромагнетика за допомогою осцилографа

1. Зібрати електричне коло за схемою, наведеною на рис. 9. Частково вона вже зібрана на макеті; ті елементи, які необхідно під'єднати, показані на рисунку. Повернути проти годинникової стрілки до упору ручку плавного регулювання напруги на автотрансформаторі. Увімкнути в електромережу осцилограф та автотрансформатор.

2. Підібрати такий струм живлення обмотки намагнічування і положення ручок вхідних подільників (канал підсилення «Y»), щоб петля гістерезису займала половину екрана (ручка плавного регулювання підсилення осцилографа повинна бути повернута праворуч до упору).

3. За допомогою міліамперметра виміряти величину струму $I_{\text{еф}}$ у обмотці намагнічування. За формулою (11) обчислити амплітуду напруженості магнітного поля в сердечнику. Це значення H визначає масштаб вздовж осі X. Користуючись формулою (15), прокалібрувати відхилення по осі «Y» в одиницях індукції магнітного поля B (Тл).

4. Замалювати граничну петлю гістерезису з екрану осцилографа. Із одержаної петлі гістерезису визначити залишкову індукцію, коерцитивне поле, а за площею петлі – втрати енергії за один цикл перемагнічування.

Завдання 2. Визначення початкової, статичної та динамічної магнітної проникності

1. Регулюючи автотрансформатором струм в обмотці намагнічування, одержати і замалювати серію частинних петель гістерезису. За вершинами петель побудувати основну криву намагнічування феромагнетика.

2. За тангенсом кута нахилу дотичної до кривої намагнічування в околі початку координат визначити відношення $\Delta B/\Delta H$ та за формулою (4) обчислити початкову магнітну проникність. Оцінити статичну магнітну проникність у кількох точках (при кількох значеннях H) кривої намагнічування за формулою $\mu = B/\mu_0 H$. За тангенсом кута нахилу дотичної до кривої намагнічування у кількох точках (при кількох значеннях H) кривої намагнічування визначити відношення $\Delta B/\Delta H$ та обчислити динамічну магнітну проникність.

Контрольні запитання

1. Які речовини називаються феромагнетиками?
2. Чому магнітна індукція у феромагнетиках, внесених у магнітне поле, значно перевищує індукцію цього поля?
3. Чому феромагнетик розбивається на домени?
4. Які типи доменів зустрічаються у феромагнетиках? Якими методами можна спостерігати доменну структуру?
5. Чим відрізняється доменна структура полікристала від монокристала?
6. Який механізм намагнічування феромагнетиків?
7. Що таке петля гістерезису? Які причини явища гістерезису?
8. Чому саме речовини, які містять атоми з недобудованою внутрішньою оболонкою, можуть бути феромагнетиками?
9. Яким чином можна розмагнітити феромагнітний зразок?
10. Що називається точкою Кюрі феромагнетика? Яким законом описується температурна залежність магнітної сприйнятливості феромагнітної речовини вище температури Кюрі?
11. Якими методами можна вивчати петлю гістерезису?

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Основна література

1. Бушок Г. Ф., Венгер Є. Ф. Курс фізики: У 3 кн. Кн. 2. Електрика і магнетизм: Навч. посіб. – К.: Вища школа, 2003. – 278 с.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. – К.: Вища школа, 1995. – 431 с.
Горват А. А., Молнар О. О., Мінькович В. В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel. Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. – 182 с
Горват А. А., Молнар О. О., Мінькович В. В. Обробка, візуалізація та аналіз експериментальних даних з використанням пакету Origin. Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2020. – 64 с.
Блецкан Д. І., Горват А. А., Кабацій В. М. Електричні вимірювання. – Ужгород: Видавництво «Закарпаття», 2008. - 409 с.

Додаткова література

1. Lea Susan, Burke John. Physics: the nature of things. – West Publishing Company, USA, 1997. – 1199 p.
2. Блецкан Д. І., Горват А. А. Електричні вимірювання і електровимірні прилади. Ужгород, 1999. – 124 с.
3. Блецкан Д. І., Горват А. А. Фізичний практикум (Електрика і магнетизм). Ужгород, 1999. – 176 с.
5. Физический практикум, Под ред. Кемборовского Г. С. – Минск: Университетское, 1986. – 352 с.
6. Лабораторные занятия по физике. Под ред. Гольдина Л. Л. – М.: Наука, 1983. – 704 с.

Інформаційні ресурси в мережі Інтернет

1. <http://www.nbuv.gov.ua> (Національна бібліотека України імені В.І.Вернадського)
2. <http://www.lib.uzhnu.edu.ua/> (Наукова бібліотека УжНУ)
3. <http://4uth.gov.ua/> (Державна бібліотека України для юнацтва)
4. <https://ddpu.edu.ua/fizmatzbirnyk/slovniky/sl11.pdf> (М.О. Вакуленко , О.В. Вакуленко. Фізичний тлумачний словник)
5. <https://www.unian.ua/science> (Новини науки і технологій)

<https://sites.google.com/a/uzhnu.edu.ua/andrew-horvat/home/3-navcalno-metodicna-robota> (Робоча програма навчальної дисципліни «Електрика і магнетизм, оптика» для студентів денної форми навчання зі спеціальності 163 Біомедична інженерія / Розр. Горват А. А. – Ужгород, 2021 – 17 с.)

6. <http://library.ntu-kpi.kiev.ua:8080/handle/123456789/153> (Фізика. Розділ «Електрика і магнетизм» [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів спеціальностей «Промислова біотехнологія», «Обладнання фармацевтичної та мікробіологічної промисловості» / НТУУ «КПІ» ; уклад. О. П. Кузь. - Електронні текстові дані (1 файл: 7,44 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2009)

7. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/6363> (Кузь, О. П. Методичні вказівки для самостійної підготовки та вивчення дисципліни фізика. Розділ: «Оптика» для студентів факультетів біотехнології та хіміко-технологічного напрямку підготовки 6.051401 «Біотехнологія», 6.051301 «Хімічна технологія» [Електронний ресурс] / О. П. Кузь, О. В. Дрозденко ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 12,5 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 93 с.)

8. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2711> (Методичні вказівки для самостійної підготовки та вивчення дисципліни фізика розділ:«Магнетизм» для студентів факультетів: біотехнології та хіміко-технологічного напрямку підготовки 6.051401 «Біотехнологія» та 6.051301 «Хімічна технологія» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. О. В. Дрозденко, О. П. Кузь, О. В. Долянівська, О. М. Слободян. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,49 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 115 с.)

9. https://www.studmed.ru/cholpan-pp-fzika-pdruchnik_205e71e7ff9.html (Чолпан П.П. Фізика: Підручник Київ, Вища школа, 2003. — 567 с.

10. http://web.kpi.kharkov.ua/tef/wp-content/uploads/sites/114/2020/11/cp_2011.pdf (Компьютерный лабораторный практикум по физике: уч. - метод. пособие / Сук А. Ф., Синельник И. В., Синельник А. В. – Харьков: Изд-во «Точка», 2011. – 247 с).

ДОДАТКИ

Додаток 1

Повний перелік наявних лабораторних робіт фізичного практикуму «Електрика і магнетизм»

1. Вивчення електростатичного поля.
2. Вивчення температурної залежності поляризації та діелектричної проникності сегнетоелектриків.
3. Градування амперметра і вольтметра.
4. Вивчення принципу електричних компенсаційних вимірювань.
5. Вимірювання опору металів методом амперметра-вольтметра та за допомогою містка постійного струму.
6. Дослідження процесів зарядки та розрядки конденсатора
7. Вивчення температурної залежності опору металів і напівпровідників.
8. Вивчення роботи напівпровідникового діода.
9. Визначення електрохімічного еквівалента речовини, числа Фарадея і заряду електрона.
10. Дослідження петлі магнітного гістерезису
11. Визначення індуктивності котушки, ємності конденсатора і перевірка закону Ома для кола змінного струму.
12. Вимірювання потужності змінного струму та зсуву фаз між струмом і напругою.
13. Вивчення будови та використання електронного осцилографа.
14. Вивчення згасаючих коливань у коливальному контурі.
15. Дослідження розповсюдження електромагнітні хвилі в двопровідній лінії.

Універсальні фізичні величини

УНІВЕРСАЛЬНІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ	ПОЗНА- ЧЕННЯ	ЧИСЛОВЕ ЗНАЧЕННЯ
Швидкість світла у вакуумі	c	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Електрична стала	ε_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Стала Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Стала Фарадея	F	$0,965 \cdot 10^5$ Кл/моль
Елементарний заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	m_e	$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Питомий заряд електрона	e/m_e	$1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Маса спокою протона	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Питомий заряд протона	e/m_p	$0,959 \cdot 10^8$ Кл/кг
Магнетон Бора	μ_B	$9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Магнітний момент електрона	μ_e	$9,3 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Ядерний магнетон	$\mu_{\text{я}}$	$5,05 \cdot 10^{-27}$ Дж/Тл
Класичний радіус електрона	r_e	$2,82 \cdot 10^{-15}$ м
Борівський радіус	a_0	$5,29 \cdot 10^{-11}$ м

Формули для наближених обчислень.

Нерівності вказують значення $x \ll 1$, при яких розрахунок приводить до помилок, які не перевищують 0,1%

- | | | |
|--|--|-----------------------------|
| 1. $(1 \pm x)^n \approx 1 \pm nx$ | при $x < 0,031/n$; | 10. $\pi = 3,1416$; |
| 2. $\frac{1}{1 \pm x} \approx 1 \mp x$ | при $x < 0,031$; | 11. $\pi^2 = 9,8696$; |
| 3. $\sqrt{1 \pm x} \approx 1 \pm 0,5x$ | при $x < 0,085$; | 12. $\sqrt{\pi} = 1,7725$; |
| 4. $e^{\pm x} \approx 1 \pm x$ | при $x < 0,045$; | 13. $e = 2,7183$; |
| 5. $\ln(1 \pm x) \approx \pm x$ | при $x < 0,045$; | 14. $e^2 = 7,3892$ |
| 6. $\sqrt{x \cdot y} \approx 0,5(x + y)$ | при $x \approx y$; | 15. $\sqrt{e} = 1,6467$ |
| 7. $\frac{1 \pm x}{1 \pm y} \approx 1 \pm (x - y)$ | при x та $y \ll 1$; | 16. $\lg e = 0,4343$; |
| 8. $\sin x \approx \operatorname{tg} x \approx x$ | при $x < 4,4^\circ (0,077 \text{ рад})$; | 17. $\ln 10 = 2,3026$; |
| 9. $\cos x \approx 1 - \frac{1}{2}x^2$ | при $x < 22,2^\circ (0,387 \text{ рад})$; | 18. $1/e = 0,3689$. |

Діелектрична проникність речовин ε

РЕЧОВИНА	ε	РЕЧОВИНА	ε
1. Азот (рідина)	1,445	12. Кварц	3,75
2. Азот (газ)	1,0006	13. Кисень (газ)	1,0005
3. Ацетон	20,74	14. Мармур	6,6–8,5
4. Вода (рідина)	81	15. Масло трансформ.	2,2
5. Вода (пара)	1,0126	16. Парафін	2
6. Віск	7,8	17. Плексиглас	3,5
7. Гас	2	18. Скло	5,6 – 10
8. Гетинакс	7 – 8	19. Слюда	7,5
9. Ебоніт	2,6–4	20. Спирт метиловий	33,1
10. Каучук	2,3	21. Текстоліт	8
11. Кераміка: ZrNiO ₄	28 – 30	22. Фарфор	6
TiO ₂	78 – 88	23. Бурштин (янтар)	2,8
CaTiO ₃	150 – 160		

Магнітна сприйнятливість $\chi = \mu - 1$ деяких речовин

ПАРАМАГНЕТИКИ	$(\mu - 1),$ 10^{-6}	ДІАМАГНЕТИКИ	$(1 - \mu),$ 10^{-6}
1. Алюміній	23	1. Бензол	7,5
2. Вольфрам	176	2. Водень	0,063
3. Платина	360	3. Вода	9,0
4. Ебоніт	14	4. Вісмут	як 176
5. Азот	0,013	5. Кварц	15,1
6. Повітря	0,38	6. Кам'яна сіль	12,6
7. Кисень	1,9	7. Мідь	10,3
8. Кисень (рідкий)	3400	8. Скло	12,6

Питомий опір(ρ)
та температурний коефіцієнт опору (α)

РЕЧОВИНА	ρ , нОм·м	α , мК ⁻¹	РЕЧОВИНА	ρ , Ом·м
1. Алюміній	28	3,8	18. Бакеліт	$2 \cdot 10^{14}$
2. Вольфрам	55	5,1	19. Ебоніт	$2 \cdot 10^{13}$
3. Вугілля	40	-0,8	20. Кварц плавл.	$6 \cdot 10^5$
4. Графіт	8000		21. Кварц (осі)	$1 \cdot 10^{12}$
5. Залізо	98	6,2	22. Кварц (\perp осі)	$3 \cdot 10^{14}$
6. Золото	23	3,6	23. Папір	$1 \cdot 10^{10}$
7. Мідь	17,2	4,3	24. Парафін	$1 \cdot 10^{16}$
8. Ртуть	958	0,9	25. Сірка	$1 \cdot 10^{15}$
9. Свинець	211	4,2	26. Скло листове	$2 \cdot 10^{11}$
10. Срібло	15	4,1	27. Слюда	$1 \cdot 10^{14}$
11. Сталь	120	6,0	28. Фарфор	$1 \cdot 10^{13}$
12. Цинк	59	5,3	29. Целюлоїд	$2 \cdot 10^8$
13. Константан	440 – 520	$1 \cdot 10^{-2}$	30. Шелак	$1 \cdot 10^{14}$
14. Манганін	420 – 480	$3 \cdot 10^{-2}$	31. Шифер	$1 \cdot 10^6$
15. Нейзильбер	280 – 350	$4 \cdot 10^{-2}$	32. Бурштин (янтар)	$1 \cdot 10^{14}$
16. Нікелін	390 – 450	$2 \cdot 10^{-2}$		
17. Ніхром	1050	20		

Електрохімічні еквіваленти, $k_x \cdot 10^{-6}$ кг/Кл

ПОЗИТИВНІ ІОНИ	k_x	ПОЗИТИВНІ ІОНИ	k_x
1. Алюміній (+ + +)	0,093	10. Свинець (+ +)	1,073
2. Вісмут (+ + +)	0,719	11. Срібло (+)	1,118
3. Водень (+)	0,0104	12. Цинк (+ +)	0,338
4. Залізо (+ +)	0,289		
Залізо (+ + +)	0,193	НЕГАТИВНІ ІОНИ	
5. Золото (+)	2,043	13. Кисень (- -)	0,0829
Золото (+ +)	0,681	14. Хлор (-)	0,3672
6. Кальцій (+ +)	0,2077	15. Хром (- - -)	0,180
7. Мідь (+)	0,659	16. ОН (-)	0,1762
Мідь (+ +)	0,329	17. CO ₃ (- -)	0,3108
8. Натрій (+)	0,238	18. NO ₃ (-)	0,642
9. Нікель (+ +)	0,304	19. SO ₄ (- -)	0,497
Нікель (+ + +)	0,203		

Густина речовин d

ТВЕРДІ ТІЛА	$d \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	РІДИНИ	$d \cdot 10^{-3}$ кг/м ³
1. Алмаз	3,5	1. Бензол	0,88
2. Алюміній	2,7	2. Вода (t=+4 C ⁰)	1,00
3. Берилій	1,84	3. Вода (t=+100 ⁰ C)	0,958
4. Вольфрам	19,1	4. Важка вода	1,260
5. Графіт	1,6	5. Гас	0,80
6. Залізо(сталь)	7,8	6. Гліцерин	1,26
7. Золото	19,1	7. Касторове масло	0,80
8. Кадмій	8,65	8. Рицинова олія	0,95
9. Калій	0,87	9. Ртуть	13,6
10. Кобальт	8,9	10. Скипидар	0,858
11. Лід	0,916	11. Спирт етил.	0,789
12. Мідь	8,9	12. Спирт метил.	0,792
13. Молібден	10,2	13. Толуол	0,858
14. Натрій	0,97	14. Ефір	0,72
15. Нікель	8,9	ГАЗИ	d , кг/м ³
16. Олово	7,4	(за норм. умов)	
17. Платина	21,5	1. Азот	1,25
18. Свинець	11,3	2. Водень	0,09
19. Срібло	10,5	3. Вуглекислий газ	1,98
20. Титан	4,5	4. Гелій	0,18
21. Уран	19,0	5. Кисень	1,43
22. Цинк	7,0	6. Повітря	1,29

Робота виходу електронів з металів A , eВ

РЕЧОВИНА	A	РЕЧОВИНА	A	РЕЧОВИНА	A
1. Алюміній	3,74	9. Літій	2,40	17. Рубідій	2,13
2. Барій	2,49	10. Магній	3,46	18. Срібло	4,74
3. Вісмут	4,62	11. Мідь	4,47	19. Тантал	4,07
4. Вольфрам	4,54	12. Молібден	4,20	20. Титан	3,92
5. Залізо	4,74	13. Натрій	2,30	21. Торій	3,41
6. Золото	4,68	14. Нікель	5,00	22. Цезій	1,97
7. Калій	2,00	15. Платина	5,20	23. Цинк	4,00
8. Кальцій	2,67	16. Ртуть	4,52	24. Уран	3,74

Рухливість електронів у металах b , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

МЕТАЛ	Ag	Na	Be	Ca	Au	Li	Al	Cd	Zn
b	56	48	44	35	30	19	10	7,9	5,8

Рухливість іонів (водні розчини) b , $\text{мм}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

ПОЗИТИВНІ ІОНИ	b^+	НЕГАТИВНІ ІОНИ	b^-
1. H	0,326	1. OH	0,18
2. Na	0,045	2. F	0,049
3. K	0,067	3. Cl	0,068
4. Ag	0,056	4. Br	0,07
5. NH	0,067	5. NO ₃	0,064
6. N	0,127	6. N	0,184
7. Zn	0,048	7. SO ₄	0,068
8. Fe	0,046	8. CO ₃	0,062
9. Li	0,0346		

Рухливість іонів (гази за норм. умов) b , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

РЕЧОВИНА	ПОЗИТИВНІ ІОНИ	НЕГАТИВНІ ІОНИ
1. Азот	1,27	1,84
2. Аргон	1,37	1,70
3. Водень	5,91	8,26
4. Водяна пара(100°C)	0,62	0,51
5. Кисень	1,29	1,79
6. Повітря	1,37	1,91
7. Хлор	0,6	0,5
8. Оксид вуглецю	1,10	1,14

Енергія іонізації A_I , eВ

АТОМ	A_I	АТОМ	A_I	МОЛЕКУЛА	A_I
1. Ar	15,7	7. N	14,5	1. CO ₂	14,4
2. H	13,5	8. Na	15,8	2. H ₂	15,4
3. He	24,58	9. Ne	21,5	3. H ₂ O	13,2
4. Hg	10,4	10. O	13,5	4. N ₂	15,8
5. K	4,32	11. Xe	12,8	5. O ₂	12,5
6. Kr	13,9				

ЗМІСТ

	стр.
Передмова	3
Лабораторна робота №1 Класифікація методів і засобів вимрювань. Аналогові електромеханічні вимірювальні прилади. Градування амперметра та вольтметра	7
Лабораторна робота №2 Цифрові вимірювальні прилади. Дослідження статичної передавальної характеристики мультиметра	46
Лабораторна робота №3 Вивчення характеристик електростатичного поля	72
Лабораторна робота №4 Вимірювання опору резистора методом амперметра-вольтметра та за допомогою містка постійного струму	83
Лабораторна робота №5 Вивчення процесів зарядки та розрядки конденсатора	95
Лабораторна робота №6 Вивчення температурної залежності опору металів та напівпровідників	100
Лабораторна робота №7 Визначення опору резистора, ємності конденсатора та індуктивності котушки, перевірка закону Ома для кола змінного струму. Вимірювання потужності та зсуву фаз між струмом і напругою у колі змінного струму	121
Лабораторна робота №8 Дослідження петлі гістерезису феромагнетиків	133
Рекомендовані джерела інформації	150
Додатки	152

Навчальне видання

ГОРВАТ Андрій Андрійович
ГРАБАР Олександр Олексійович

ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. Частина 3. Електрика і магнетизм.
Навчальний посібник

Редактор **XXXXXXX**

Коректор **XXXXXXX**

Комп'ютерна верстка **XXXXXXXXXX**

Підписано до друку **XX.XX.2022** Формат 60x84/16

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний.

Умовн. друк. арк. **XX,х**. Тираж **XX**. Замовлення **XXX**.

Видавництво «**XXXX**»,

Горват А.А.

Г-67 ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ. Частина 3. Електрика і магнетизм. Навчальний посібник. А. А. Горват, О. О. Грабар : Ужгород: Видавництво **XXXX**, 2022 р. –159 с.

У посібнику наведені описи лабораторних робіт загального фізичного практикуму, які містять короткі теоретичні відомості, методику проведення експерименту, опис приладів та завдання і порядок їх виконання з курсу „Електрика і магнетизм, класична оптика” дисципліни "Загальна фізика" для студентів фізичного факультету УжНУ спеціальностей 163 «Біомедична інженерія» і 153 «Мікро-та наносистемна техніка».

Посібник призначений для використання при підготовці до лабораторних занять та для самостійної роботи студентів, які навчаються за вказаними спеціальностями і може бути корисним для студентів інших інженерних спеціальностей.

УДК 53 (075.8)

ББК 22.33я73

