

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Теорія електричних кіл»
для студентів прискореної форми навчання
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Частина 1

Затверджено
на засіданні кафедри фізичного
матеріалознавства для електроніки
та геліоенергетики,
протокол №7 від 30.01.2019 р.

Харків НТУ «ХПІ» 2019

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електричних кіл» для студентів прискореної форми навчання спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». Частина 1 / Уклад.: Р.В. Зайцев, Г.А. Дроздова, Д.А. Кудій. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 47 с.

Укладачі: Р.В. Зайцев,
Г.А. Дроздова,
Д.А. Кудій

Рецензент проф. Хрипунов Г.С.

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики

ВСТУП

Лабораторні заняття з курсу «Теорія електричних кіл» є найважливішим елементом навчального процесу в плані придбання студентами навичок в плануванні експерименту, використанні вимірювальних приладів і апаратури, в експериментальному дослідженні схем, пристроїв та електронних елементів, а також в засвоєнні і практичній конкретизації лекційного матеріалу.

До методичних вказівок входять лабораторні роботи по всіх розділах дисципліни «Теорія електричних кіл». Для кожної лабораторної роботи сформульовано мету досліджень, дано перелік необхідних приладів та обладнання, визначені конкретні завдання та порядок виконання роботи, а також приведені контрольні питання і зазначений обсяг звітних матеріалів. Короткий виклад теоретичних відомостей з досліджуваного питання допоможе студентам у підготовці до лабораторних робіт і їх виконанню.

Особливість методичних вказівок до лабораторних робіт в тому, що роботи мають навчально-дослідницький характер. Вони розвивають у студентів навички проведення експериментальних досліджень, знайомлять з методами досліджень процесів в електричних ланцюгах і технікою виміру їх параметрів, поводження з електротехнічними пристроями чи електровимірювальною апаратурою.

ПРАВИЛА ВНУТРІШНЬОГО РОЗПОРЯДКУ І ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

При роботі в лабораторії електротехніки та електроніки для уникнення нещасних випадків, а також передчасного виходу з ладу приладів і обладнання студент при виконанні лабораторних робіт повинен виконувати наступні правила внутрішнього розпорядку і техніки безпеки.

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, знайомі з правилами внутрішнього розпорядку і техніки безпеки.

2. Після ознайомлення з правилами внутрішнього розпорядку та інструктажу з техніки безпеки кожен студент повинен розписатися в спеціальному журналі.

3. Працюючи в лабораторії забороняється приносити з собою речі і предмети, які захащують робочі місця.

4. У лабораторії забороняється голосно розмовляти, покидати робочі місця без дозволу викладача і переходити від одного стенду до іншого.

5. Приступаючи до роботи в лабораторії, студентська група ділиться на бригади, які потім розподіляються по лабораторним столам.

6. Електричні ланцюги збираються при відключеному джерелі живлення. При необхідності змін в ланцюзі в процесі роботи потрібно відключити джерело живлення.

7. Збірку електричного кола виконують сполучними проводами в суворій відповідності зі схемою, представленою в методичних вказівках, забезпечуючи при цьому надійність електричних контактів всіх роз'ємних сполук. При збірці необхідно стежити, щоб з'єднувальні дроти не скручувалися петлями.

8. Зібраний електричний ланцюг пред'являється для перевірки викладачеві або лаборанту.

9. Включення електричного кола під напругу проводиться після перевірки її викладачем з його дозволу і в його присутності.

10. При виявленні несправності в ланцюзі, появи специфічного запаху, пошкодження обладнання або приладів необхідно негайно відключити електроживлення стенду і сповістити про це викладача або лаборанта.

11. Перед включенням регульованого джерела живлення необхідно переконатися, що його ручка знаходиться в положенні, відповідному мінімальній вихідній напрузі.

12. При роботі з конденсаторами слід пам'ятати, що на їх затискачах, відімкнутих від мережі, якийсь час зберігається електричний заряд, який може бути причиною удару електричним струмом.

13. При роботі з мультиметром слід правильно вибирати рід вимірюваної величини, межу її вимірювання та гнізда для підключення щупів. При роботі з осцилографом щоб уникнути перевантаження по входу необхідно правильно обрати межу вимірювання його підсилювача.

14. При використанні електричних машин строго виконуйте правила і порядок їх пуску.

15. Після затвердження викладачем результатів лабораторної роботи необхідно розібрати досліджуваний електричний ланцюг і привести в порядок робоче місце.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Підготовка до лабораторних робіт. Експериментальні задачі, запропоновані на лабораторних заняттях, можуть бути успішно вирішені у відведений відповідно до розкладу занять час тільки за умови ретельної попередньої підготовки до кожної з них. Тому для виконання лабораторних робіт студент повинен керуватися наступними положеннями:

- 1) попередньо ознайомитися з графіком виконання лабораторних робіт;
- 2) уважно ознайомитися з описом відповідної роботи і встановити, в чому полягає основна мета і завдання цієї роботи;
- 3) по лекційному курсу і відповідним літературними джерелами вивчити теоретичну частину, що відноситься до даної лабораторної роботи;
- 4) до проведення лабораторної роботи підготувати в робочому зошиті відповідні схеми, таблиці спостережень, розрахункові формули;
- 5) завершує етап підготовки до виконання лабораторної роботи складання відповідей на контрольні запитання, наведені в методичних вказівках.
- 6) непідготовлені студенти до роботи не допускаються.

Виконання лабораторної роботи. Для успішного виконання лабораторних робіт необхідно виконання наступних вимог.

1. Перед складанням електричного кола студенти повинні попередньо ознайомитися з електричним устаткуванням і вимірювальними приладами, призначеними для проведення відповідної лабораторної роботи. При цьому слід переконатися, що лабораторний стенд знеструмлений.

2. Збірку ланцюга необхідно проводити в точній відповідності із завданням. Доцільно спочатку з'єднати всі елементи ланцюга, що включаються послідовно, а потім - паралельно. При складанні доцільно користуватися проводами різних кольорів, наприклад, для паралельних гілок.

3. Після закінчення складання електричний ланцюг обов'язково повинен бути пред'явлений до перевірки. Включати ланцюг під напругу можна тільки з дозволу викладача або лаборанта.

4. Запис показань всіх приладів в процесі виконання роботи слід проводити по можливості одночасно і швидко. Слід уникати перерви розпочатої серії спостережень і у всіх випадках, коли виникає сумнів у правильності отриманих спостережень, їх необхідно повторити кілька разів.

5. Результати вимірювань заносяться кожним студентом в свій робочий зошит.

6. Після виконання окремого етапу лабораторної роботи результати дослідження разом з найпростішими контрольними розрахунками пред'являються для перевірки викладачеві до розбирання електричного ланцюга.

7. Розбирати електричний ланцюг, а також переходити до складання нового можна лише за дозволом викладача.

8. Якщо при дослідженні ланцюга постійного струму стрілка вимірювального приладу іде за межі шкали в зворотному напрямку, треба відключити ланцюг і перемкнути підходящі до приладу дроти.

9. Якщо стрілка якого-небудь приладу виходить за межі шкали, треба негайно вимкнути джерело живлення, доповісти викладачеві або лаборанту.

10. Лабораторна робота вважається виконаною тільки після затвердження її результатів викладачем і приведення робочого місця в порядок.

11. Під час занять в лабораторії студенти зобов'язані перебувати на своїх робочих місцях. Виходити з приміщення лабораторії під час заняття можна тільки з дозволу викладача.

Обробка результатів та оформлення звіту. Складання звіту про проведені дослідження є найважливішим етапом виконання лабораторної роботи. По кожній виконаній роботі кожен студент складає звіт, керуючись наступними положеннями.

1. Звіт з лабораторної роботи виконується відповідно до вимог і стандартів НТУ «ХП».

2. Звіт включає в себе розділи, що відображають всі етапи виконання роботи.

2.1. На титульному аркуші зазначаються назва навчального закладу, кафедри, порядковий номер та найменування лабораторної роботи, прізвище та ініціали студента, який виконав роботу, номер його академічної групи, дата виконання роботи.

2.2. Мета роботи, яка відображає основні завдання теоретичного та експериментально плану, які вирішуються в даній роботі.

2.3. Розрахункове завдання, яке виконується перед лабораторною роботою і є одним з основних елементів допуску до виконання лабораторної роботи.

2.4. Експериментальна частина, яка включає в себе електричні схеми та результати досліджень, зведені в таблиці. Кожен етап або дослідження повинні мати свій підзаголовок.

2.5. Обробка результатів експерименту. Наводяться таблиці результатів розрахунків за експериментальними результатами, розрахункові співвідношення, за якими робилися ці розрахунки, побудовані за результатами експериментів і розрахунків графіки, діаграми.

2.6. Звіт повинен містити основні висновки, відповідні цілі лабораторної роботи. За вказівкою викладача в звіті даються відповіді на контрольні питання керівництва.

3. Графічна частина звіту (схеми, таблиці, графіки) виконуються олівцем із застосуванням відповідних креслярських інструментів.

3.1. Принципові схеми викреслюються відповідно до вимог діючих стандартів. У місцях електричних з'єднань (вузлах) ставиться крапка.

3.2. Векторні діаграми будуються в масштабі з дотриманням величин кутів і зазначенням масштабу.

3.3. При побудові графіків слід пам'ятати, що, так як завданням лабораторних досліджень є з'ясування загальних закономірностей, то усі шкали графіків повинні починатися з нуля. На осях графіків дається зазвичай рівномірна шкала з круглими значеннями оцифрованих поділок. При необхідності одна з шкал може мати логарифмічний характер. При кресленні графіків треба враховувати, що будь-яке вимірювання має випадкові похибки. При цьому не слід проводити криві через всі експериментальні точки, на робочому полі вказуються експериментальні точки, за якими будується плавна безперервна крива, яка проходить серед експериментальних точок. Якщо в одних координатних осях будують кілька графіків функцій однієї незалежної змінної, то слід провести додаткові шкали паралельно основній поза основного поля. При побудові графіків вздовж осі абсцис у обраному масштабі відкладають незалежну змінну. Умовне буквене позначення цієї величини рекомендується ставити під віссю, а найменування одиниць виміру чи їх десяткових кратних або часткових одиниць - після позначення величини. Уздовж осі ординат масштабні цифри ставлять зліва від осі, найменування або умовне позначення величин, що відкладаються, - також зліва від осі і під цим позначенням вказують одиницю виміру. Найменування одиниць вимірювань дається без дужок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

СТРІЛОЧНІ Й ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Мета роботи – вивчення й розшифрування позначень, що наносяться на шкалу електровимірювального приладу, вивчення устрою вольтметра й практичне ознайомлення з ним.

1.1 Загальні відомості

1.1.1 Вимірювальні механізми

Кожний вимірювальний механізм має одну або кілька обмоток, по яких при включенні приладу в електричне коло йде струм. Струм створює в навколишньому просторі магнітне поле. Крім обмоток, вимірювальний механізм має постійний магніт або сердечник, який намагнічується, коли по обмотках йде струм. Магнітне поле струму й магнітне поле, створюване сердечником, взаємодіють один з одним, внаслідок чого вказівна стрілка відхиляється. Стрілка приладів, у яких відсутній сердечник, але є дві обмотки, відхиляється в результаті взаємодії магнітних полів, створюваних минаючими по обмотках струмами. Залежно від виду такої взаємодії розрізняють системи вимірювальних механізмів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, індукційну.

Магнітоелектрична система зображена на рисунку 1.1. Принцип дії - взаємодія магнітного поля струму, що проходить по обмотці рамки, з магнітним полем постійного магніту.

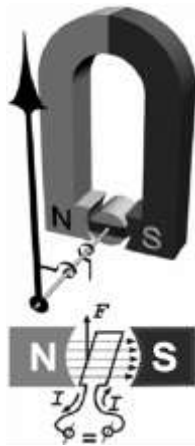


Рис. 1.1 - Вимірювальний механізм магнітоелектричної системи і його схема

Струм до обмотки рамки йде по двом спіральним пружинам. Коли по обмотці рамки йде струм, вона повертається на кут, величина якого пропорційна вимірюваному струму (напрузі). Напрямок повороту рамки, а виходить, і стрілки залежить від напрямку струму в обмотці рамки.

Основні переваги: висока точність; рівномірність шкали; незалежність точності показань від дії зовнішніх магнітних полів.

Основні недоліки: неможливість вимірювати тим самим приладом постійний і змінний струми (якщо в приладі немає випрямного обладнання); порівняно висока вартість.

Електромагнітна система зображена на рисунку 1.2. Принцип дії - взаємодія магнітного поля струму, що проходить по обмотці котушки, з магнітним полем сердечника, що піддається намагнічуванню. Внаслідок цієї взаємодії феромагнітний (здатний добре намагнічуватися), сердечник втягується усередину котушки, завдяки чому відхиляється вказівна стрілка.

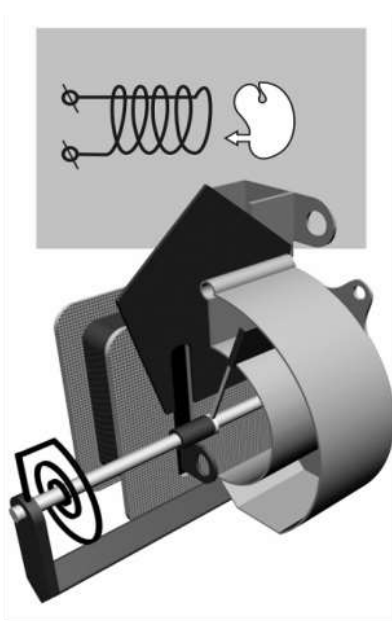


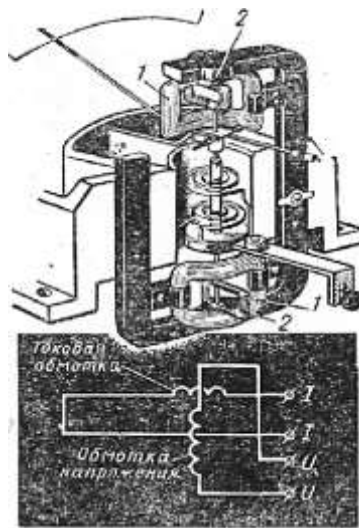
Рис. 1.2 - Вимірювальний механізм електромагнітної системи і його схема

При зміні напрямку струму в обмотці одночасно змінюється полярність сердечника, що намагнічується. Тому при будь-якому напрямку струму в обмотці сердечник втягується усередину, а стрілка, отже, відхиляється в ту саму сторону.

Основні переваги: простота обладнання; відносно невисока вартість; придатність для виміру постійного й змінного струму; стійкість до перевантажень.

Основні недоліки: невисока точність; нерівномірність шкали; залежність точності показань від впливу зовнішніх магнітних полів; порівняно більша потреба в електроенергії.

Електродинамічна система зображена на рисунку 1.3. Принцип дії - взаємодія магнітних полів струмів, що протікають по двом обмоткам, одна з яких нерухлива, а інша може обертатися.



- 1 - струмова обмотка (нерухлива);
 2 - обмотка напруги (рухлива)

Рис. 1.3 - Вимірювальний механізм електродинамічної системи і його схема

Обмотка нерухливої котушки називається струмовою обмоткою. Вона має мало витків і включається в ланцюг послідовно.

Обмотка рухливої котушки має багато витків, включається в ланцюг паралельно й називається обмоткою напруги. При включенні приладу в ланцюг струм одночасно проходить по обмотках обох котушок. У результаті взаємодії магнітних полів струмів рухлива котушка повертається на кут, пропорційний добутку струмів. Напрямок струму в обмотках може змінюватися лише одночасно.

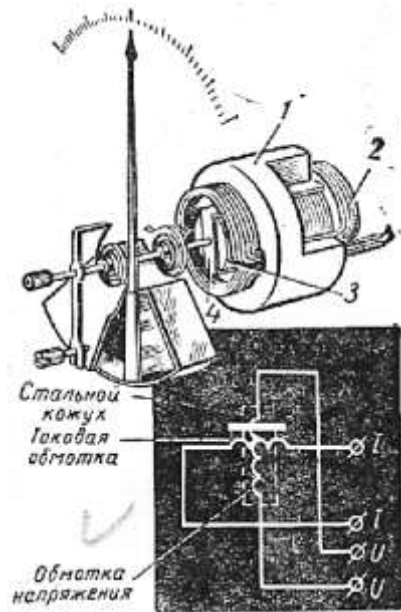
Тому незалежно від напрямку струму рухлива котушка, а виходить, і стрілка повертаються тільки в одну сторону. Механізм електродинамічної системи застосовується в амперметрах, вольтметрах і ватметрах.

Поряд з вимірювальними механізмами електродинамічної системи широко застосовуються механізми феродинамічної системи. Принцип дії механізмів цих систем однаковий. Конструкція феродинамічного механізму (рис. 1.4) відрізняється тим, що його нерухлива обмотка поміщена на магнітопроводі, завдяки чому підвищується чутливість приладу.

Основні переваги: висока точність; можливість виміру тим самим приладом постійного й змінного струму.

Основні недоліки: порівняно висока вартість, точність показань погіршується під впливом зовнішніх магнітних полів (особливо в електродинамічних); порівняно мала стійкість до перевантажень.

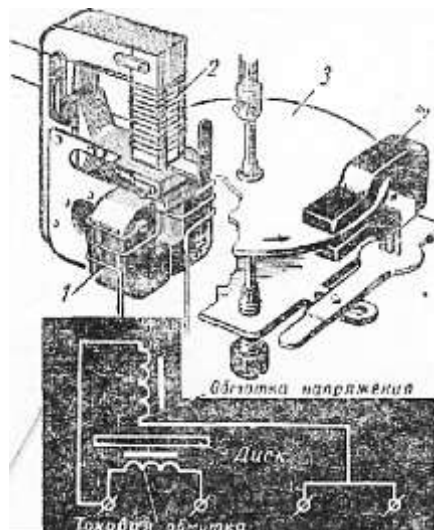
Індукційна система зображена на рисунку 1.5. Принцип дії - взаємодія магнітних полів струмів, що протікають по двом обмоткам, з магнітним полем струму, що індукується в алюмінієвому диску, який перебуває між цими обмотками.



1 - сталевий кожух; 2 - струмова обмотка;
3 - сталевий циліндр; 4 - обмотка напруги

Рис. 1.4 - Вимірювальний механізм феродинамічної системи і його схема

Механізми індукційної системи звичайно застосовують в інтегрованих приладах. Тому вісь, на якій укріплений диск, через систему передач з'єднують не зі стрілкою, а з рахунковим механізмом. Такий механізм застосовується в обладнанні лічильників електроенергії.



1 - струмова обмотка; 2 - обмотка напруги;
3 - алюмінієвий диск; 4 - постійний магніт (заспокоювач)

Рис. 1.5 - Вимірювальний механізм індукційної системи і його схема

1.1.2 Умовні графічні позначення на шкалі

Шкала приладу служить для відліку значення вимірюваної величини.

Крім того, на шкалі за допомогою умовних знаків дається докладна технічна характеристика приладу, знати яку необхідно для правильного вибору й застосування приладу.

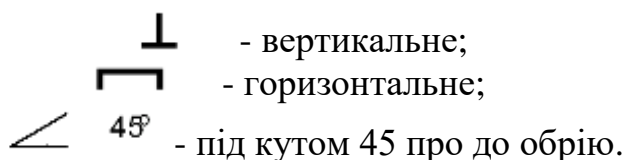
На шкалі приладу вказують рід вимірюваного струму (постійний, змінний), систему вимірювального механізму (див. нижче), клас точності (цифри, що позначають клас точності, іноді обводять окружністю).

Кожний прилад розрахований на певні умови експлуатації, що також вказують на шкалі. Ступінь захищеності від зовнішніх магнітних полів позначають римськими цифрами I, II, III, IV. Менша цифра відповідно означає, що прилад краще захищений від дії зовнішніх магнітних полів.

Умови роботи приладу при відповідних температурі й вологості позначаються на шкалі буквами:

- А - нормально працює при температурі навколишнього повітря від +10 до +35°C і відносної вологості до 80%;
- Б - нормально працює при температурі навколишнього повітря від -20 до +50°C і відносної вологості до 80%;
- В - нормально працює при температурі навколишнього повітря від -40 до +60°C і відносної вологості до 98%.

Під час роботи прилад повинен бути розташований так, як зазначено на його шкалі:



Позначення типів систем:



На шкалі приладу зазначена величина напруги, при якій була випробувана електрична міцність ізоляції (рис. 1.6), а також марка заводу-виробника, заводський номер, рік випуску й тип приладу.



Рис. 1.6 - Умовні позначки величини напруги, при якій випробувана ізоляція

1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Устаткування робочого місця

Роботу виконують на лабораторному столі, де встановлюють досліджувані вимірювальні прилади з інструкцією, складеної відповідно до його технічного опису.

1.2.2 Порядок дій

1. Одержати у викладача електровимірювальні прилади.
2. Вивчити технічні характеристики приладів по нанесених на них умовним позначкам і заповнити таблицю 1.1.
3. У таблицю 1.1 заносять умовні позначки (символи), наявні на шкалі приладу, а потім дають їхнє письмове розшифрування.

Таблиця 1.1 – Характеристики досліджуваних приладів

Тип, марка	Межа виміру	Вид струму	Система	Клас точності	Умови експлуатації	Положення	Напруга ізоляції	Заводський номер	Інше

4. Накреслити шкалу електромеханічного вимірювального приладу із вказівкою оцифрованих точок і відградуювати її для нових меж вимірів.
5. Провести вимір напруги елемента живлення за допомогою цифрового вольтметра, показання занести у звіт.
6. Скласти звіт за встановленою формою.

1.3 Контрольні питання

1. Прилади магнітоелектричної системи, їх переваги й недоліки.
2. Прилади електромагнітної системи, їх переваги й недоліки.
3. Чим відрізняються прилади феродинамічної системи від приладів електродинамічної системи?

4. Прилади яких систем стійкі до впливів зовнішніх магнітних полів?
5. Коли використовуються прилади індукційної системи?
6. Характеристики цифрового вольтметра.
7. Додаткові функції цифрових мультиметров.
8. Точність виміру цифрових приладів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ПОСЛІДОВНЕ ТА ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ОПОРІВ

Мета роботи – вивчення основних законів постійного електричного струму, експериментальна перевірка закономірностей електричного кола при послідовному і паралельному з'єднанні опорів.

2.1 Загальні відомості

2.1.1 Електричний струм

Електричним струмом називається всякий впорядкований рух електричних зарядів. Лінії, уздовж яких рухаються заряджені частинки, називаються лініями струму. За направлення електричного струму беруть напрям руху позитивних електричних зарядів. Насправді в металевих провідниках електричний струм створюється рухом електронів в напрямку зворотному напрямку струму. Впорядкований рух електричних зарядів може бути здійснено шляхом переміщення в просторі зарядженого тіла (провідника або діелектрика). Такий струм називається конвекційним. Наприклад, струм, пов'язаний з рухом по орбіті Землі, що володіє надлишковим негативним зарядом. Мікроскопічні електричні заряди можуть рухатися впорядковано в вакуумі незалежно від макроскопічних тіл. Такий спрямований рух зарядів називають струмом в вакуумі. Прикладом можуть служити потоки електронів в електронопроменевих трубках осцилографів, в кінескопах телевізорів. Впорядкований рух електричних зарядів всередині макроскопічного тіла (твердого, рідкого або газоподібного) під дією електричного поля називається струмом провідності. Для появи електричного струму провідності необхідні дві умови:

– наявність в даному середовищі вільних зарядів, які могли б у ній переміщатися (такими зарядами в металах, є електрони; в рідких провідниках - позитивні і негативні іони; в газах - позитивні іони і електрони);

– наявність в даному середовищі електричного поля, енергія якого витрачається на переміщення вільних електричних зарядів.

Для того, щоб в ланцюзі існував би тривалий час струм необхідний пристрій, в якому будь-який вид енергії безперервно перетворювався б у енергію електричного поля. Такий пристрій називається джерелом електрорушійної

сили, або джерелом струму. Для характеристики електричного струму вводиться поняття сили струму. Силою струму називається скалярна величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (2.1)$$

де dq – електричний заряд, що проходить крізь поперечний переріз провідника за час dt .

Якщо сила струму і його напрям не змінюються з плином часу, то струм називається постійним. В цьому випадку сила струму:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (2.2)$$

де q – електричний заряд, що проходить за час t через поперечний переріз провідника. Одиниця сили струму в системі СІ - ампер (А). Він визначається на підставі електромагнітної взаємодії двох паралельних прямолінійних постійних струмів. З формули (2.2) випливає, що якщо сила струму дорівнює одному амперу, то через поперечний переріз провідника за одну секунду протікає заряд рівний одному кулону. Для характеристики розподілу електричного струму по перетину провідника вводиться вектор щільності струму. Напрямок вектора збігається з напрямком струму і по модулю дорівнює силі струму в розрахунку на одиницю площі поперечного перерізу провідника, перпендикулярної до ліній струму:

$$j = \frac{dI}{dS}, \quad (2.3)$$

де dI – сила струму через елементарну площадку dS , розташовану перпендикулярно до напрямку вектору \vec{j} . Щільність струму в системі СІ вимірюється в А/м².

З (2.3) виходить, що повна сила струму у провіднику дорівнює:

$$I = \int_S j dS. \quad (2.4)$$

Якщо площадка dS не перпендикулярна до \vec{j} , то у цьому разі замість j необхідно брати складову щільності струму $j_n = j \cos \alpha$, перпендикулярну до dS . У співвідношенні α - кут між вектором \vec{j} і нормаллю до площадки dS .

Досліди показали, що щільність постійного струму однакова за всім поперечним перерізом S однорідного провідника. Тому для постійного струму:

$$I = jS. \quad (2.5)$$

У ланцюзі постійного струму, що складається з провідників зі змінною площею поперечного перерізу, щільності струмів в різних перетинах S_1 і S_2 обернено пропорційні площам цих перерізів:

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (2.6)$$

Електрони провідності в металі, іони в електроліті, іони і електрони в газі, тобто всі заряджені частинки, що містяться в різних тілах, скоюють хаотичний (тепловий) рух.

Електричне поле \vec{E} в речовині надає всім вільним зарядженим частинкам додаткову швидкість упорядкованого руху, який і зумовлює струм. Середня швидкість упорядкованого руху u в твердих і рідких тілах зазвичай досить мала в порівнянні зі швидкістю теплового руху. Вона становить 10^{-1} - 10^{-3} см/с. Таким чином, в ланцюзі постійного струму електрони рухаються вздовж провідника досить повільно.

Однак ця швидкість упорядкованого руху не має ніякого відношення до швидкості поширення струму в провіднику. Коли на електростанції включається рубильник, струм в квартирі з'являється в момент приходу електромагнітної хвилі, яка розповсюджується вздовж проводів зі швидкістю v , яка дорівнює швидкості світла в середовищі:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (2.7)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, ϵ – діелектрична проникність середовища, μ – магнітна проникність середовища.

Швидкість цієї хвилі і є швидкістю поширення струму в провіднику.

Виділимо всередині провідника площадку dS перпендикулярну u . Побудуємо на цій площадці, як на основі прямий циліндр з висотою рівною $u dt$ (рис. 2.1). Тоді число частинок, які пройдуть через розглянуту площадку за час dt , буде дорівнює числу частинок всередині циліндра.

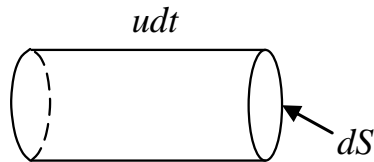


Рис. 2.1 – Елементарна частинка провідника

Якщо e - заряд носія струму, n - концентрація заряджених частинок (число частинок в одиниці об'єму), то число частинок усередині циліндра одно, а заряд, що переноситься через площадку dS , буде рівний $q = enudtdS$.

Тому величина щільності струму

$$j = \frac{dq}{dtdS} = enu \quad (2.8)$$

Так як e і n скалярні величини, а скорість \vec{u} вектор, то

$$\vec{j} = en\vec{u} \quad (2.9)$$

2.1.2 Електрорушійна сила

Якщо в провіднику створити електричне поле і не взяти заходів для його підтримки, то переміщення зарядів дуже швидко призведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм припиниться. Для того, щоб підтримувати струм досить тривалий час, потрібно від кінця провідника з меншим потенціалом φ_2 (носії заряду вважаються позитивними) безперервно переносити заряди до кінця провідника з великим потенціалом φ_1 (рис. 2.2).

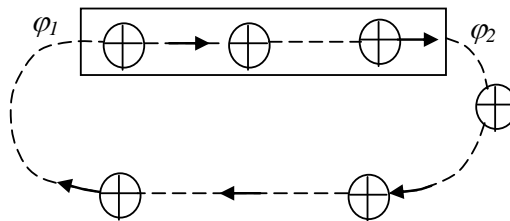


Рис. 2.2 – Схематичне зображення переносу носіїв

Переміщення зарядів в напрямку від меншого потенціалу до більшого, тобто проти сил електричного поля, можливо лише за допомогою сил неелектростатичного походження, які називають сторонніми силами. Це можуть

бути сили вихрового електричного поля, породжуваного змінним магнітним полем; хімічні процеси в акумуляторах і гальванічних елементах та інші.

Сторонні сили можна охарактеризувати роботою, яку вони здійснюють над зарядами, що переміщуються по ланцюгу. Електрорушійна сила (ЕРС), що діє в електричному ланцюзі або на його ділянці, чисельно дорівнює роботі сторонніх сил при переміщенні по електричному ланцюгу або по його ділянці одиничного позитивного заряду.

Отже, якщо робота сторонніх сил над зарядом q дорівнює A_{cm} , то ЕРС дорівнює

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q} . \quad (2.10)$$

ЕРС вимірюється в тих же одиницях, що і потенціал, а саме, в вольтах.

Стороння сила

$$\vec{F}_{cm} = q\vec{E}^* . \quad (2.11)$$

Векторну величину \vec{E}^* називають напруженістю поля сторонніх сил. Роботу сторонніх сил над зарядом q на всьому протязі замкнутого ланцюга можна представити таким чином:

$$A = \oint \vec{F}_{cm} d\vec{l} = \oint q\vec{E}^* d\vec{l} . \quad (2.12)$$

Розділивши цю роботу на q , отримаємо ЕРС, що діє в колі

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}^* d\vec{l} . \quad (2.13)$$

Таким чином, ЕРС, що діє у замкнутому колі, може бути визначена як циркуляція вектора напруженості поля сторонніх сил.

Електрорушійна сила, що діє на ділянці кола 1-2, дорівнює

$$\mathcal{E}_{1,2} = \int_1^2 E^* dl \quad (2.14)$$

Крім сторонніх сил на заряд діють сили електростатичного поля $\vec{F}_e = q\vec{E}$. Отже, результуюча сила, що діє в кожній точці ланцюга на заряд q , дорівнює

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_{cm} = q(\vec{E} + \vec{E}^*) . \quad (2.15)$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке 1-2, даётся выражением

$$A = q \int_1^2 \vec{E}^* d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = q\mathcal{E}_{1,2} + q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (2.16)$$

При виведенні формули (2.16) ми користувалися тим, що на ділянці кола 1-2 напруженість поля $E = -\frac{d\varphi}{dl}$.

Величина, котра чисельно дорівнює роботі, яку здійснюють електростатичні і сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду, називається падінням напруги або напругою U на даній ділянці ланцюга

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{1,2} \quad (2.17)$$

За відсутності сторонніх сил, тобто коли $\mathcal{E}_{1,2} = 0$, напруга U співпадає з різницею потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

2.1.3 Закон Ома в інтегральній формі

Експериментально встановлено, що сила струму в провіднику пропорційна падінню напруги U і обернено пропорційна опорю провідника R

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.18)$$

Якщо ділянка ланцюга не містить ЕРС (рис. 2.3), то така ділянка ланцюга називається однорідною і закон Ома для неї буде мати вигляд:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (2.19)$$

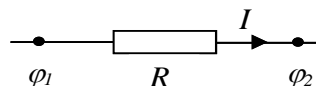


Рис. 2.3 – Закон Ома для однорідної ділянки ланцюга

Ділянка ланцюга, що має ЕРС, називається неоднорідною (рис. 2.4) і для неї закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{1,2}}{R + r}, \quad (2.20)$$

де R – опір зовнішньої ділянки електричного ланцюга, r – опір джерела ЕРС.

Якщо електричне коло замкнене (рис. 2.5), то $\varphi_1 = \varphi_2$. Тоді

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (2.21)$$

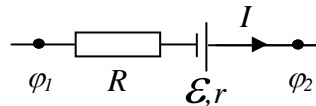


Рис. 2.4 – Закон Ома для неоднорідної ділянки ланцюга

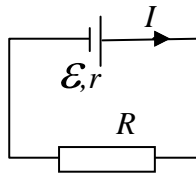


Рис. 2.5 – Закон Ома для замкненого електричного ланцюга

Величина опору залежить від форми й розмірів провідника, а так само від властивостей матеріалу, з якого він виготовлений. Для однорідного циліндричного провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.22)$$

де l – довжина провідника, S – площа його поперечного перерізу, ρ – питомий електричний опір матеріалу.

Значення питомого опору матеріалу ρ залежить від природи матеріалу й температури провідників. Для чистих металів при кімнатній температурі й вище питомий опір ρ лінійно збільшується з температурою $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, де α – температурний коефіцієнт опору, t – температура, ρ_0 – питомий опір провідника при 0°C . Для порівняння відзначимо, що опір напівпровідників зменшується при нагріванні.

2.1.4 Закон Ома у диференціальній формі

Знайдемо зв'язок між вектором щільності струму \vec{j} й напруженістю поля \vec{E} в деякій крапці M ізотропного провідника (рис. 2.6).

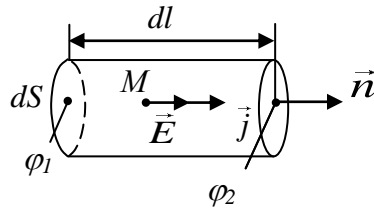


Рис 2.6 – Ділянка ізотропного провідника

Для цього виділимо в околиці цієї крапки елементарний об'єм у вигляді прямого циліндра, що утворюється паралельно вектору \vec{j} .

Позитивні носії заряду в кожній крапці ізотропного провідника рухаються в напрямку вектора \vec{E} .

Сила струму в елементарному об'ємі $I = jdS$, опір цього об'єму $R = \rho \frac{dl}{dS}$.

Напругу в елементарному об'ємі можна розрахувати по формулі $U = Edl$, тому що усередині цього об'єму поле однорідне. Використовуючи закон Ома (2.18), одержимо

$$I = \frac{U}{R} = jdS = \frac{l}{\rho} EdS .$$

Отже, для щільності струму j будемо мати:

$$j = \frac{l}{\rho} E .$$

У векторній формі

$$\vec{j} = \frac{l}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E} , \quad (2.23)$$

де $\sigma = \frac{l}{\rho}$ називається питомою електричною провідністю.

Формула (2.23) виражає собою закон Ома в диференціальній формі.

Для неоднорідної ділянки ланцюга, тобто при наявності на ділянці сторонніх сил, закон Ома в диференціальній формі прийме наступний вид:

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{E}^*) , \quad (2.24)$$

де \vec{E}^* – напруженість поля сторонніх сил.

2.1.5 Закони Джоуля – Ленца

При проходженні по провіднику струму, провідник нагрівається. Джоуль і, незалежно від нього, Ленц виявили експериментально, що кількість тепла, що виділяється в провіднику, пропорційно його опору, квадрату сили струму й часу

$$Q = RI^2t. \quad (2.25)$$

Якщо сила струму змінюється з часом, то

$$Q = \int_0^t RI^2 dt. \quad (2.26)$$

Нагрівання провідника відбувається за рахунок роботи, чиненої силами поля над носіями струму.

Скориставшись законом Ома (2.18) для Q можна одержати наступне співвідношення:

$$Q = \int_0^t IU dt = \int_0^t \frac{U^2}{R} dt. \quad (2.27)$$

Потужність струму

$$N = \frac{dQ}{dt} = I^2R = UI = \frac{U^2}{R}. \quad (5.4)$$

2.1.6 Послідовне та паралельне з'єднання опорів

Послідовним з'єднанням опорів називається таке з'єднання, при якому кінець першого опору з'єднується з початком другого, кінець другого - з початком третього і т.д (рис. 2.7).

Загальний опір послідовно з'єднаних опорів дорівнює сумі їх опорів:

$$R_{\text{заг}} = R_1 + R_2 + R_3 ;$$
$$R_{\text{заг}} = 50\text{Ом} + 100\text{Ом} + 250\text{Ом} = 400\text{Ом}.$$

Тому що в даному ланцюзі відсутнє відгалуження струму, то очевидно, що кількість електрики, що протікає через поперечний переріз провідника за одиницю часу в будь-якій крапці ланцюга буде однаковою.

Отже, у всіх крапках послідовного ланцюга величина струму однакова.

Чотири амперметри, зображені на рисунку 2.8, покажуть однакові величини струму. Тому при послідовному з'єднанні для виміру струму досить включати один амперметр на будь-якій ділянці ланцюга.

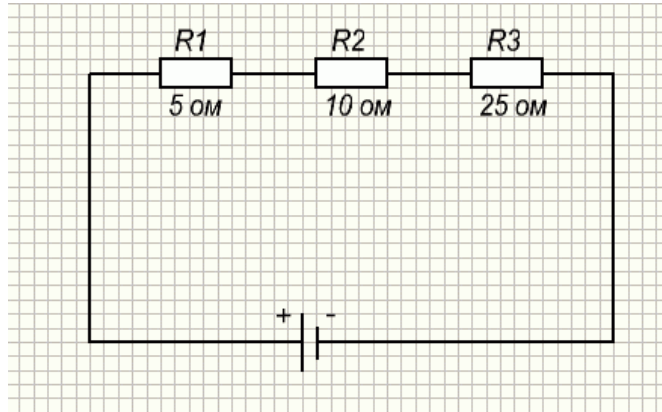


Рис. 2.7 – Послідовне з'єднання опорів

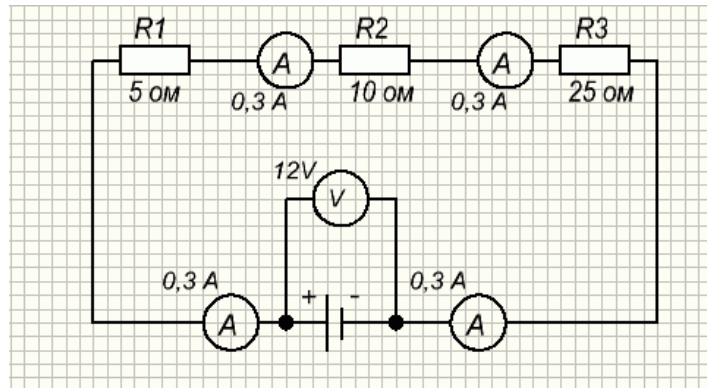


Рис. 2.8 – Вимір струму при послідовному з'єднанні опорів

Напруга джерела струму прикладена до зовнішньої ділянки ланцюга розподіляється по ділянках ланцюга прямо пропорційно опорам цих ділянок. Напруга, прикладена до кожного із цих резисторів визначається по формулі (рис 2.9):

$$U = I \cdot R$$

Тому що струм у послідовному ланцюзі скрізь однаковий значить дійсна напруга на її ділянках залежить від опору. Чим більше опір, тим більше напруга прикладена до даної ділянки.

Сума напруг на ділянках послідовного ланцюга дорівнює напрузі джерела струму

$$U = U_1 + U_2 + U_3;$$

$$12B = 1,5B + 3B + 7,5B.$$

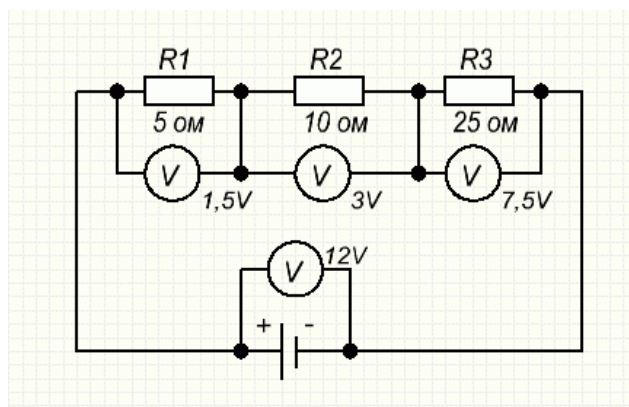


Рис. 2.9 – Розподіл напруги при послідовному з'єднанні опорів

Паралельним з'єднанням опорів називається таке з'єднання, при якому до одного затискачу джерела підключаються початки опорів, а до іншого затискача – кінці (рис. 2.10).

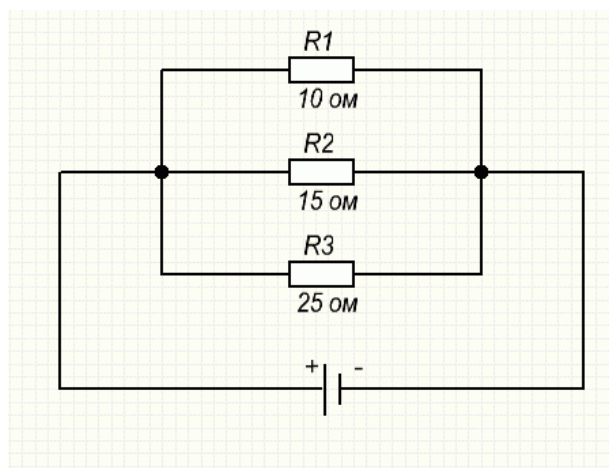


Рис. 2.10 – Паралельне з'єднання опорів

Загальний опір паралельний включених опорів визначається по формулі:

$$\frac{1}{R_{\text{заг}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Загальний опір паралельно включених опорів завжди менше найменшого опору, що входить у дане з'єднання. На рисунку 2.10 ми можемо відразу сказати, що загальний опір буде менше 10 Ом.

Перший окремий випадок: якщо паралельно включено тільки два резистори, то їх загальний опір можна визначити по формулі:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Другий окремий випадок: якщо паралельно включена будь-яка кількість резисторів однакових опорів, то їх загальний опір можна визначити, якщо опір одного резистора розділити на кількість резисторів.

$$R_{\text{заг}} = \frac{R_1}{n}.$$

Розподіл струмів і напруги в паралельних ланцюгах. Тому що початки всіх опорів зведені в одну загальну крапку, а кінці - в іншу, те очевидно, що різниця потенціалів на кінцях кожного з паралельно включених опорів дорівнює різниці потенціалів між загальними крапками (рис. 2.11).

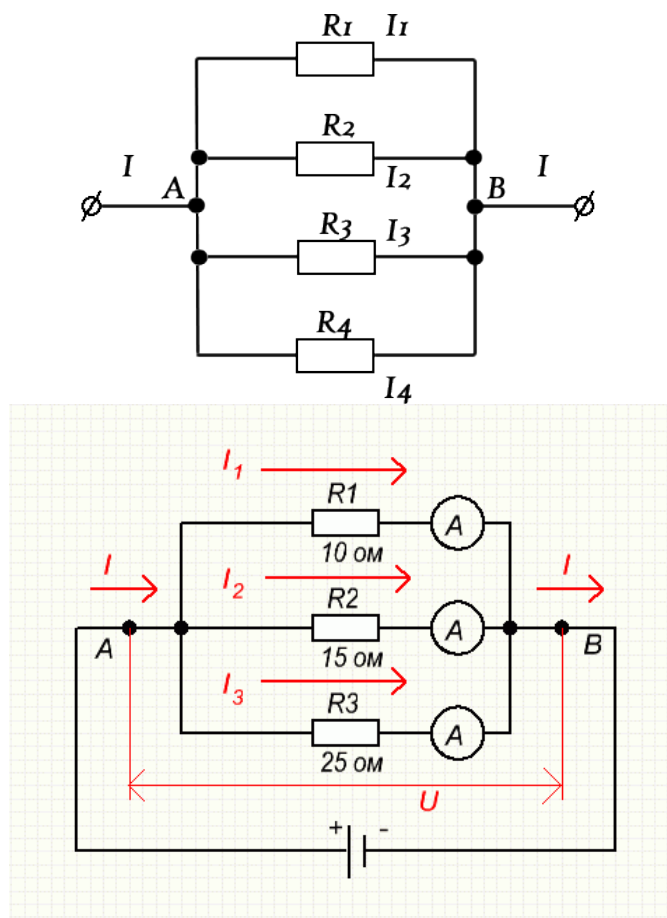


Рис 2.11 – Розподіл струму при паралельному з'єднанні опорів

Отже, при паралельному з'єднанні опорів напруги на них рівні між собою

$$U_1 = U_2 = U_3.$$

Якщо розгалуження підключене безпосередньо до затискачів джерела струму, то напруга на кожному з опорів дорівнює напрузі на затискачах джерела.

Друга властивість ланцюга з паралельним з'єднанням полягає в тому, що електричний струм розподіляється по паралельних гілках пропорційно їх опорам.

Це значить що, чим більше опір, тим менше по ньому піде струм

$$I = \frac{U}{R}.$$

Розглядаючи крапку розгалуження А, зауважуємо, що до неї притікає струм I , а струми I_1 , I_2 , I_3 витікають із неї. Тому що електричні заряди, які рухаються, не накопичуються в крапці, то очевидно, що сумарний заряд, що притікає до крапки розгалуження, дорівнює сумарному заряду, що витікає від неї:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Отже, третя властивість паралельного з'єднання може бути сформульована так: величина струму в нерозгалуженій частині ланцюга дорівнює сумі струмів у паралельних гілках.

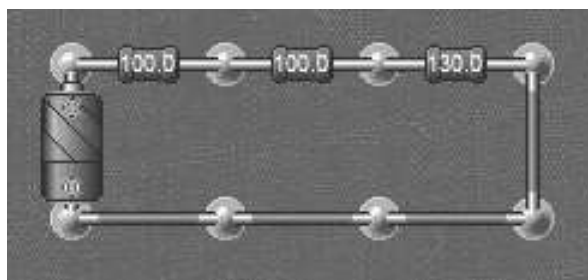
2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Устаткування робочого місця

Роботу виконують на лабораторному столі, де встановлюють плати з резисторами й вимірювальні прилади з інструкцією, складеної відповідно до їхнього технічного опису.

2.2.2 Порядок дій

1. Визначити й вивчити послідовне електричне коло.



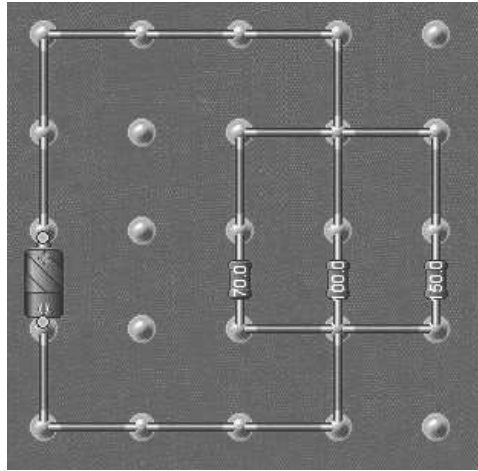
2. Зняти показання мультиметра в режимі виміру опору й записати їх у таблицю 2.1.

3. Здійснити розрахунки величини кожного опору за умови, що величини всіх опорів у ланцюзі однакові. Результати розрахунків занести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати дослідження послідовного з'єднання опорів

$R_{\text{посл}}, \text{ Ом}$	$R_1, R_2, R_3, \text{ Ом}$

4. Визначити й вивчити паралельне електричне коло.



5. Зняти показання мультиметра в режимі виміру опору й записати їх у таблицю 2.2.

6. Здійснити розрахунки величини кожного опору за умови, що величини всіх опорів у ланцюзі однакові. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати дослідження паралельного з'єднання опорів

$R_{\text{пар}}, \text{ Ом}$	$R_1, R_2, R_3, \text{ Ом}$

2.3 Контрольні питання

1. Яке з'єднання резисторів називають послідовним?
2. Як визначити загальний опір резисторів при послідовному з'єднанні?
3. Що називається провідністю, і в яких одиницях вона вимірюється?
4. Чому рівний загальний струм ланцюга й напруга на ділянках при паралельному з'єднанні?
5. Як визначається потужність на ділянках ланцюга й усьому ланцюга при послідовному та паралельному з'єднанні?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ЗМІННИЙ СТРУМ

Мета роботи – вивчення теоретичних основ та отримання практичних навичок проведення розрахунків змінного струму.

3.1 Загальні відомості

3.1.1 Визначення змінного струму

При дії в замкненому контурі змінної електрорушійної сили (ЕРС) у ньому виникає змінний струм. Сила такого змінного струму може бути не постійною в різних перетинах нерозгалуженого провідника. Цей відступ від основної вимоги, якій задовольняє постійний струм, обумовлений кінцевою швидкістю поширення електромагнітних полів. Однак відступ виявиться незначним, якщо сила струму й розподіл зарядів мало міняється за час τ , протягом якого електромагнітні збурювання пробігають відстань, що відокремлює найбільш віддалені частини розглянутої електричної системи. Струми, що підкоряються цій умові, називаються квазістаціонарними. Далі будуть розглядатися тільки такі струми. Для квазістаціонарних струмів у кожний даний момент виконується закон Кирхгофа.

При обертанні рамки в магнітному полі з кутовою швидкістю ω потік магнітної індукції Φ , що пронизує площину, обмежену контуром рамки, міняється з часом t за законом:

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t, \quad (3.1)$$

де Φ_0 - найбільше значення потоку через площину контуру.

Електрорушійна сила, що виникає при цьому в ланцюзі, виявиться рівною:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega\Phi_0 \sin \omega t \equiv \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (3.2)$$

Це буде найпростіший випадок змінної ЕРС, що змінюється з часом за синусоїдальним законом. Величина $\varepsilon_0 = \omega\Phi_0$ називається амплітудою ЕРС і представляє її найбільше значення.

Крім зовнішньої ЕРС ε у контурі буде діяти ЕРС самоіндукції, тому що сила струму в контурі змінюється. Нехай L – коефіцієнт самоіндукції розглянутого ланцюга. Електрорушійна сила самоіндукції, як відомо, дорівнює:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} \quad (3.3)$$

Сума ЕРС $\varepsilon + \varepsilon_{si}$ повинна рівнятися, за законом Кирхгофа, добутку опору контуру на силу струму в ньому

$$IR = \varepsilon + \varepsilon_{si} \quad (3.4)$$

Підставляючи у формулу (3.4) замість ε і ε_{si} їх значення за (3.2) і (3.3), одержимо:

$$RI + L \frac{dI}{dt} = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (3.5)$$

Це співвідношення являє собою диференціальне рівняння, що визначає силу струму I у контурі із заданою ЕРС $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$ і заданим коефіцієнтом самоіндукції L й опором R .

3.1.2 Ланцюг змінного струму

Ланцюг змінного струму, на відміну від ланцюга постійного струму, допускає послідовне включення конденсатора. Якщо обкладку конденсатора приєднати до джерела постійного струму, то в ланцюзі піде струм лише доти, поки на обкладках конденсатора не виникне різниця потенціалів, що компенсує ЕРС джерела. Якщо ж обкладки конденсатора приєднати до джерел змінної ЕРС, то вони безупинно будуть перезаряджатися, і в ланцюзі увесь час буде йти змінний струм.

Нехай до затискачів S (рис. 3.1) прикладена змінна ЕРС $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$. Ланцюг складається з послідовного з'єднання ємності C , самоіндукції L (котушки) і омичного опору R (омічним опором інших проводів зневажаємо).

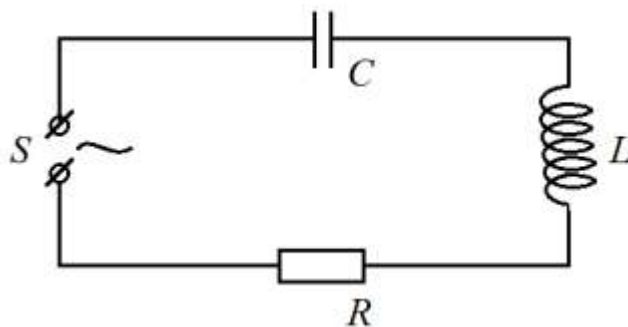


Рис. 3.1 – Приклад ланцюга змінного струму

Застосовуючи закон Кирхгофа до розглянутого ланцюга, за аналогією з (3.3)-(3.5) одержимо:

$$IR + V + L \frac{dI}{dt} = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (3.6)$$

де V - різниця потенціалів на обкладках конденсатора.

Різниця потенціалів на обкладках конденсатора V пов'язана із зарядом Q , зосередженим на обкладці конденсатора ємністю C , співвідношенням

$$Q = V \cdot C \quad (3.7)$$

За час dt заряд збільшиться на $dQ = Idt$, звідки в силу (3.7)

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt},$$

Або

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I \quad (3.8)$$

Диференціюючи рівність (3.6) за часом і враховуючи (3.8), одержимо:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t \quad (3.9)$$

Розв'язок цього диференціального рівняння, якому повинна задовольняти сила струму I , будемо шукати у вигляді періодичної функції від часу того ж періоду, що й період ЕРС:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (3.10)$$

де I_0 й ϕ – постійні, які нам слід визначити. Становлячи першу й другу похідні від I за часом, одержимо:

$$\frac{dI}{dt} = I_0 \omega \cos(\omega t - \phi); \quad \frac{d^2 I}{dt^2} = -I_0 \omega^2 \sin(\omega t - \phi).$$

Підставляючи ці похідні, а також (3.5) у рівняння (3.9), знайдемо:

$$RI_0 \cos(\omega t - \phi) - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0 \sin(\omega t - \phi) = \varepsilon_0 \cos \omega t \quad (3.11)$$

Представляючи $\cos(\omega t - \phi)$ й $\sin(\omega t - \phi)$ через синуси й косинуси від ωt і ϕ , одержимо:

$$RI_0 \cos \omega t \cos \phi + RI_0 \sin \omega t \sin \phi - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0 \sin \omega t \cos \phi + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0 \cos \omega t \sin \phi - \varepsilon_0 \cos \omega t = 0 \quad (3.12)$$

Тому що ця рівність повинна виконуватися для будь-якого моменту часу, то множники при $\sin \omega t$ й $\cos \omega t$ повинні в сумі рівнятися нулю, звідки одержимо два рівняння:

$$R \sin \phi - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \cos \phi = 0; \quad (3.13)$$

$$R \cos \phi + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \sin \phi = \frac{\varepsilon_0}{I_0}. \quad (3.14)$$

З рівняння (3.13) одержуємо:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}. \quad (3.15)$$

Зводячи рівності (3.13) і (3.14) у квадрат і складаючи їх, знайдемо:

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

Звідки

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2}}. \quad (3.16)$$

Рівності (3.10), (3.15) і (3.16) дають нам шуканий розв'язок: у ланцюзі тече струм I того ж періоду, що й прикладена ЕРС; амплітуда цього струму I_0 визначається рівністю (3.16).

Струм I зміщений по фазі відносно ЕРС ε на кут ϕ , обумовлений рівністю (3.15). Величина

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

носить характер повного опору (імпеданс), $L\omega$ – індуктивний опір й $\frac{1}{C\omega}$ – ємнісний опір, він залежить від значень R, L, C і від частоти струму ω . При ω , що задовольняє співвідношенню

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0 \quad (3.17)$$

повний опір досягає мінімуму; при цій частоті амплітуда сили струму досягає максимального значення

$$I_{0\max} = \frac{\varepsilon_0}{R}.$$

Явище походження змінного струму через ланцюг з ємністю й самоіндукцією нагадує явище механічного резонансу: амплітуда сили струму залежить від частоти ω й досягає максимуму при деякому певному значенні $\omega_{\text{рез.}}$, котре називається резонансною частотою, значення якої, за (3.17), дорівнює

$$\omega_{\text{рез.}} = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (3.18)$$

По формулі (3.15) при резонансі різниця фаз $\phi = 0$.

При $\omega \rightarrow 0$ різниця фаз $\phi \rightarrow -\frac{\pi}{2}$, тобто струм випереджає значення ЕРС; при $\omega \rightarrow \infty$ різниця фаз $\phi \rightarrow +\frac{\pi}{2}$; у цьому випадку струм відстає від ЕРС. На рис. 3.2 крива 1 показує зміну сили струму із частотою, що задається ЕРС і постійних L і C ; крива 2 дає залежність ϕ від частоти.

3.1.3 Метод векторних діаграм

Явища в ланцюзі змінного струму з ємністю й самоіндукцією можуть бути представлені за допомогою векторної діаграми.

Для цього перепишемо рівняння (3.11) у вигляді:

$$RI_0 \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) - I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \sin(\omega t - \phi) = \varepsilon_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

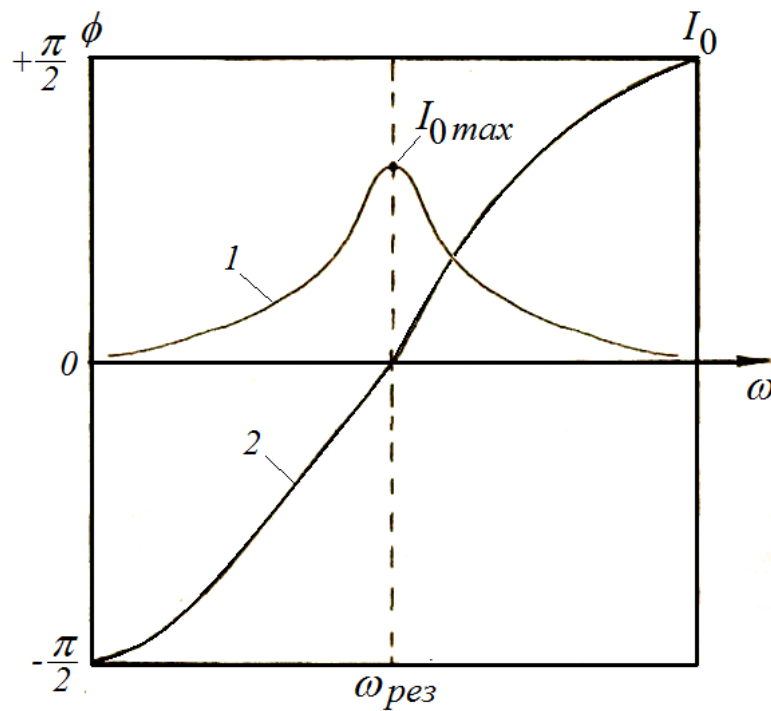


Рис. 3.2 - Залежність сили струму (1) і зрушення фаз (2) від частоти

Тому що істотна лише різниця фаз, а не самі початкові фази, та цю рівність можна замінити рівністю:

$$RI_0 \sin(\omega t - \phi) + I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (3.19)$$

Обидва члени, що стоять у лівій частині цієї рівності, можна представити у вигляді взаємно перпендикулярних векторів амплітуд $\overline{RI_0}$ і $\overline{I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)}$, які складають з віссю ox відповідно кути $\omega t - \phi$ й $\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}$ (рис. 3.3).

Результуюча амплітуда зобразиться вектором $\overline{\varepsilon_0}$, довжина, якого визначиться рівністю:

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

звідки випливає формула (3.16). Як легко бачити, вектор $\overline{\varepsilon_0}$ становить із вектором $I_0 R$ кут ϕ . Очевидно, що рівність (3.19) виходить шляхом проектування векторної суми $\overline{\varepsilon_0} = \overline{I_0 R} + \overline{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0}$ на вісь oy , що й обґрунтовує зручність методу векторних діаграм при аналізі ланцюгів змінного струму.

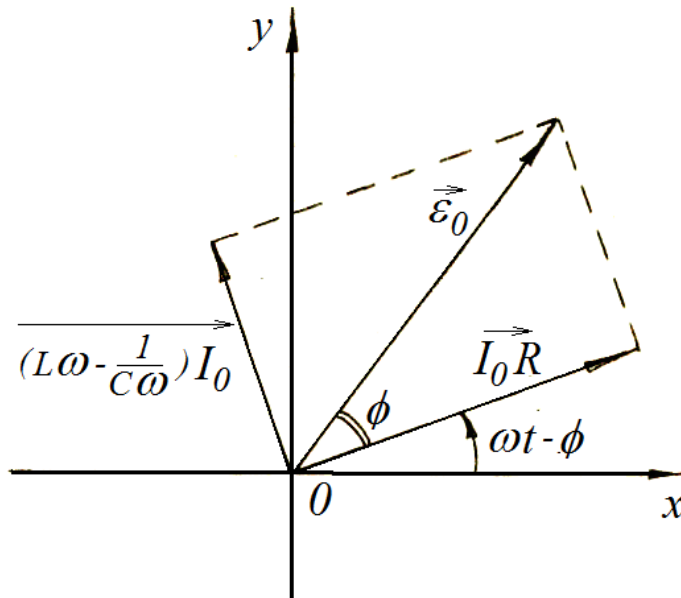


Рис. 3.3 - Векторна діаграма для ланцюга змінного струму із самоіндукцією і ємністю

Розглянемо тепер питання про потужність, що виділяється в ланцюзі змінного струму. Миттєве значення потужності ми одержимо, якщо оберемо добуток миттєвого значення сили струму на миттєве значення ЕРС:

$$\varepsilon I = W = \varepsilon_0 \sin \omega t \sin (\omega t - \phi) \cdot I_0 . \quad (3.20)$$

У різні моменти часу це миттєве значення потужності має різну величину, зокрема, воно дорівнює нулю в ті моменти, коли дорівнює нулю I або ε . Тому нас буде цікавити не миттєве значення потужності, а середнє значення потужності за період. Щоб підрахувати це середнє значення, перетворимо вираження (3.20) для W в такий спосіб:

$$W = \varepsilon_0 I_0 \sin \omega t \sin (\omega t - \phi) = \frac{\varepsilon_0 I_0}{2} [\cos \phi - \cos (2\omega t - \phi)] .$$

Таким чином, середнє значення W за період представляється сумою середніх значень членів

$$\frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \cos \phi \text{ і } -\frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \cos (2\omega t - \phi) .$$

Перший член від часу не залежить; отже, його середнє значення дорівнює йому самому; другий член міняється з часом внаслідок зміни $\cos (2\omega t - \phi)$. Середнє значення $\cos (2\omega t - \phi)$ за період, мабуть, дорівнює нулю, тому що за період $\cos (2\omega t - \phi)$ отримує так само часто позитивні значення, як і рівні їм

негативні. У результаті середнє за період значення потужності, що виділяється в ланцюзі, буде дорівнювати:

$$\vec{W} = \frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \cos \phi. \quad (3.21)$$

Уведемо позначення:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}; I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (3.22)$$

Величини ε_{ef} й I_{ef} називаються ефективною ЕРС і ефективною силою струму; підставляючи їх у (3.21), одержимо для середнього за період значення потужності:

$$\vec{W} = \varepsilon_{ef} I_{ef} \cos \phi \quad (3.23)$$

Якщо зрушення фаз між струмом і ЕРС дорівнює нулю, то середня потужність буде виражатися добутком ефективної сили струму на ефективну ЕРС. Таким чином, ефективні значення сили струму й ЕРС відіграють ту ж роль, що сила струму й ЕРС у випадку постійного струму.

Потужність, що розсіюється струмом, виділяється у вигляді тепла. Тому повна кількість тепла, що виділяється у всьому ланцюзі за час t , дорівнює

$$Q = \varepsilon_{ef} I_{ef} \cos \phi t \quad (3.24)$$

Використовуючи (3.22), а також (3.15)-(3.16), одержуємо, що

$$Q = I_{ef}^2 R t. \quad (3.25)$$

Звідки випливає, що кількість тепла, що виділяється в ланцюзі змінного струму з даним омичним опором R , виражається звичайною формулою Джоуля-Ленца, якщо тільки під силою струму мати на увазі ефективну силу струму.

3.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися із приладами й пристосуваннями для вивчення змінного струму.
2. Зібрати ланцюг для виміру омичного опору R індуктивного опору $L\omega$, ємнісного опору $\frac{1}{C\omega}$ й повного опору Z (імпедансу).
3. Побудувати відповідні векторні діаграми.

4. Досліджувати частотну залежність імпедансу $Z(\omega)$ в ланцюзі змінного струму.
5. Одержати резонанс у ланцюзі змінного струму і знайти резонансну частоту $\omega_{рез.}$.
6. Побудувати графік отриманої залежності.
7. Оцінити похибку вимірів.

3.3 Контрольні питання

1. Квазістаціонарність змінного струму.
2. Метод векторних діаграм.
3. Потужність у ланцюзі змінного струму.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

Мета роботи – дослідити зовнішні характеристики й визначити основні параметри однофазних випрямлячів. Зняти осцилограми струмів і напруг випрямляча, визначити ступінь відмінності їх від теоретичних.

4.1 Загальні відомості

Для живлення електронних пристроїв потрібна енергія постійного струму. Перетворення змінного струму в постійний здійснюється у випрямлячі. При аналізі роботи випрямних схем вентиля (діоди) і трансформатори вважаються ідеальними, тобто вважають що опір вентиля в прямому напрямку дорівнює нулю, а у зворотному нескінченно велике, втрати енергії в обмотках трансформатора не відбувається.

4.1.1 Однополуперіодна схема випрямляча

Однополуперіодна схема зображена на рис. 4.1, а, тимчасові діаграми, що пояснюють її роботу на активне навантаження - на рис. 4.1, б. Струм і напруга в навантаженні $i_o(\omega t)$ і $u_o(\omega t)$ мають пульсуючий характер. Основні електричні параметри однополуперіодної схеми випрямлення:

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \quad \text{- середнє значення випрямленої напруги;}$$

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_2 = \frac{I_2}{1,57} \quad \text{- середнє значення випрямленого струму;}$$

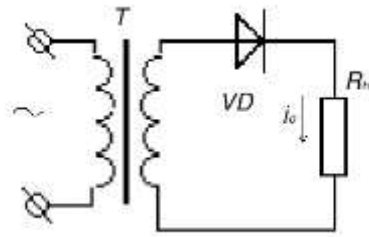
$$I_{амкс} = \pi I_0 \quad \text{- максимальний прямиий струм вентиля;}$$

$$U_{обрмакс} = \sqrt{2} U_2 = \pi U_0 \quad \text{- максимальна зворотна напруга на вентилі;}$$

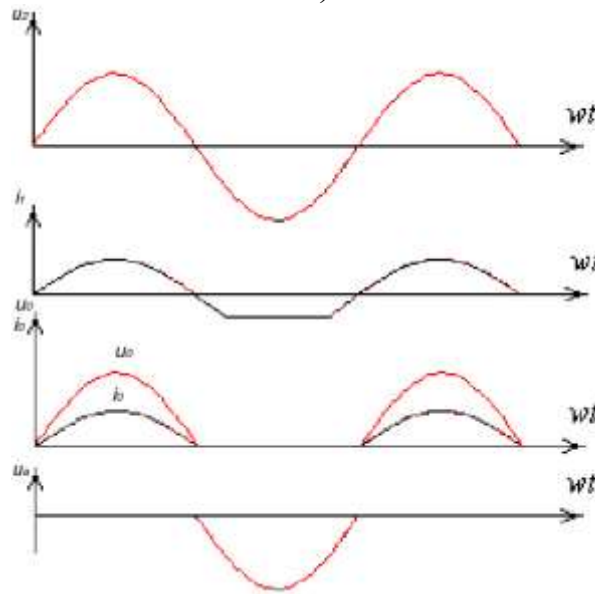
$$K_n = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

$$P_T \approx 3,1P_0$$

- коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги;
- типова потужність трансформатора.



а)



б)

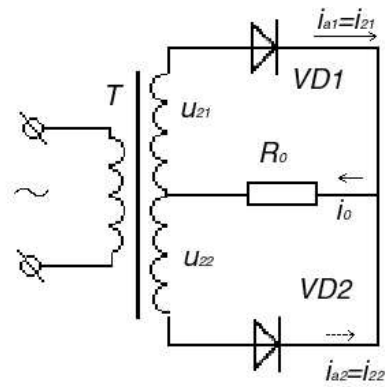
Рис. 4.1 - Однополуперіодна схема випрямлення (а) і часові діаграми при активному навантаженні (б)

Більші пульсації, низька частота основної гармоніки випрямленої напруги (рівна частоті мережі), більші розміри трансформатора, викликані неефективним використанням його обмоток і змушеним намагнічуванням сердечника постійною складовою випрямленого струму, а також велика зворотна напруга на вентилі є істотними недоліками цієї схеми, що обмежують її використання.

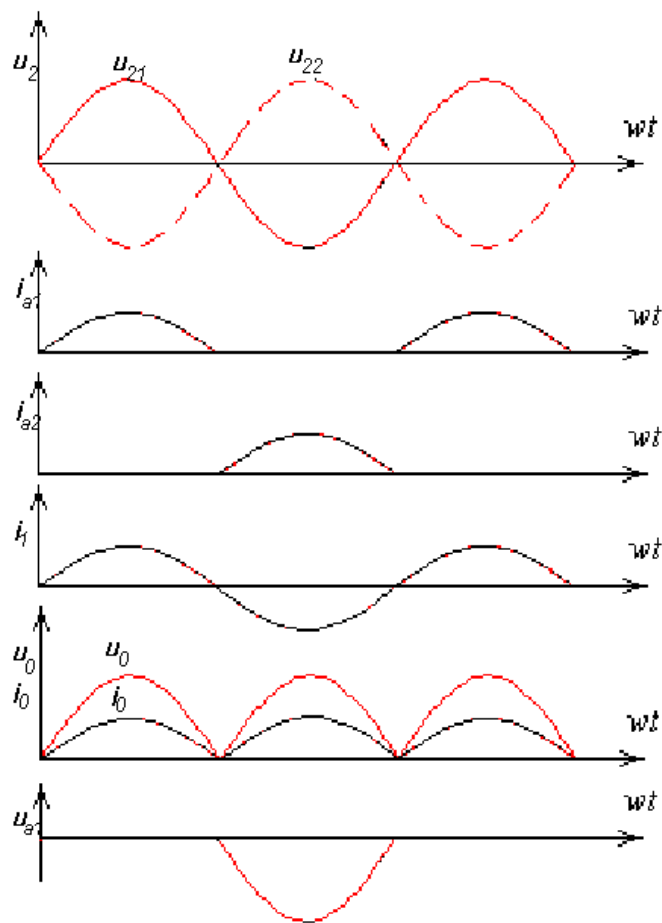
4.1.2 Двухполуперіодна схема випрямлення з нульовим виводом

Більш широке застосування одержали двухполуперіодні випрямлячі (див. рис. 4.2, а, б), схема яких є комбінацією двох однополуперіодних схем, що працюють на загальне навантаження. Вентилі відкриваються поперемінно на половину періоду, тому крива напруги на навантаженні по величині й формі

повторює позитивні півхвилі напруг u_{21} і u_{22} вторинних напівобмоток трансформатора.



а)



б)

Рис. 4.2 - Двухполуперіодні випрямлячі (а) і часові діаграми при активному навантаженні (б)

Основні електричні параметри схеми:

$$U_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9U_2;$$

$$I_0 = \frac{4}{\pi} I_2 ;$$

$$I_{\text{амак}} = \frac{\pi}{2} I_0 ;$$

$$U_{\text{обрмак}} = 2\sqrt{2}U_2 = \pi U_0 ;$$

$$K_{\text{н}} = 0,67 ;$$

$$P_T = 1,48P_0 .$$

Зниження типової потужності й краще використання трансформатора пояснюється відсутністю змушеного намагнічування сердечника постійною складовою струму вторинної обмотки.

Середнє значення випрямленого струму й напруги у два рази більше, а пульсації значно менше, ніж у однополуперіодних випрямлячів.

Недолік двухполуперіодної схеми полягає в труднощах виготовлення трансформатора із двома симетричними напівобмотками.

Цього недоліку позбавлена мостова схема випрямлення (рис. 4.3, а).

4.1.3 Мостова схема випрямлення

Протягом першого півперіоду напруги u_2 вентиля VD1 і VD3 відкриті й у навантажувальному резисторі виникає струм i_0 . У цей час вентиля VD2 і VD4 закриті. В інший півперіод напруги вентиля VD1 і VD3 закриваються, а VD2 і VD4 відкриваються.

Струм по навантаженню протікає в тому ж напрямку, що й у перший півперіод.

Часові діаграми роботи мостового випрямляча мають той же вид, що й діаграми роботи двухполуперіодного випрямляча з нульовим виводом. Виключення становить залежність $u_a(\omega t)$, оскільки між анодом і катодом вентиля в неспровідному напрямку прикладена напруга вторинної обмотки трансформатора, тобто $U_{\text{обрмак}}$ зменшується у два рази:

$$U_{\text{звормак}} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2}U_0 .$$

Типова потужність трансформатора в мостовій схемі менше, ніж в інших схемах:

$$P_T = P_1 = P_2 = 1,23P_0 .$$

Величини випрямлених напруги і струму, а також коефіцієнта пульсацій мають ті ж значення, що й у двухполуперіодній схемі з нульовим виводом.

Через те, що коефіцієнт пульсацій напруги, що живить електронні пристрої, не повинен перевищувати $10^{-4} - 10^{-7}$, отриману безпосередньо з випрямляча напругу використовувати не можна. Для зменшення пульсацій напруги

застосовують фільтри, що згладжують, які складаються із конденсаторів і котушок індуктивності.

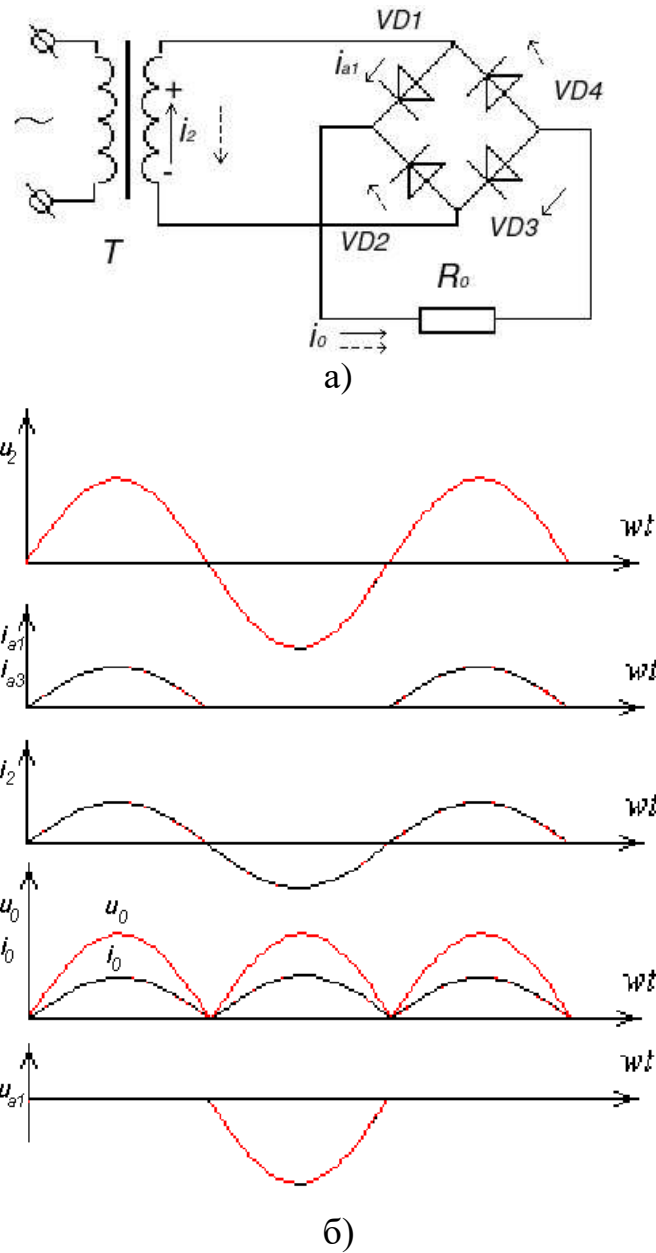


Рис. 4.3 - Мостова схема (а) і часові діаграми при ємнісному характері навантаження (б)

Часові діаграми, що пояснюють роботу мостового випрямляча на активно-ємнісне навантаження, наведені на рис. 4.3, б. Струм у вентилях $VD1$ і $VD3$ протікає в інтервалі часу t_1-t_2 , у результаті чого конденсатор заряджається до напруги, близької до U_{2m} . Протягом часу t_2-t_3 напруга $u_c > u_2$, усі вентиля закриті, а конденсатор розряджається через R_n з постійної часу $\tau_p = CR_n$. У момент часу t_3 напруга u_c стає менше u_2 , вентиля $VD2$ і $VD4$ відкриваються, конденсатор C починає заряджатися й процеси повторюються.

Середнє значення випрямленої напруги збільшується, але також зростає зворотна напруга на вентилях до величини

$$U_{обрmax} \approx 2U_{2m} .$$

Розрахунки випрямляча, що працює на активно-ємнісне навантаження, є досить складним завданням. Однак у багатьох випадках його можна розв'язати шляхом прийняття ряду допущень. Основним допущенням, що спрощує, прийнятим при аналізі цих схем, є припущення нескінченно великої ємності конденсатора, включеного паралельно навантаженню, і як наслідок цього - незмінність у часі випрямленої напруги.

4.1.4 Схема подвоєння напруги

Схема подвоєння напруги наведена на рис. 4.4. Вона полягає як би із двох однополуперіодних випрямлячів, з'єднаних між собою послідовно й працюючих на загальне навантаження.

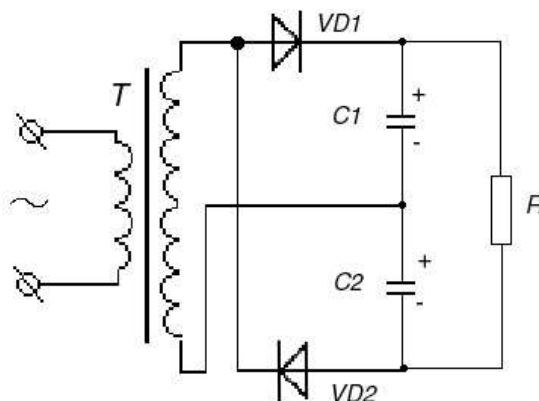


Рис. 4.4 - Схема подвоєння

Перший випрямляч складається з вентиля VD1 і конденсатора C1, другий - з вентиля VD2 і конденсатора C2. Протягом позитивного півперіоду C1 заряджається через вентиль VD1 до напруги U_{2m} . Тому що конденсатори C1 і C2 з'єднані послідовно, та напруги на них підсумуються й загальна напруга на виході випрямляча становитиме

$$U_0 = U_{c1} + U_{c2} = 2U_{2m} .$$

Зворотна напруга на кожному з вентилів дорівнює сумі амплітудного значення напруги й напруги на конденсаторі:

$$U_{обрmax} = U_{2m} + U_{c1} \approx 2U_{2m} .$$

Тому що напруги на конденсаторах зрушені по фазі на половину періоду, то сумарна напруга змінюється з подвоєною частотою, тобто частота основної гармоніки випрямленої напруги дорівнює подвоєній частоті мережі. Конденсатори С1 і С2 - елементи схеми випрямлення, тому випрямляч завжди працює на ємнісне навантаження. Часові діаграми струмів i_a , i_2 , напруг u_0 і u_a такі ж, як у мостовій схемі з RC навантаженням.

Основною перевагою схеми подвоєння перед іншими схемами однополуперіодного випрямлення є можливість одержання більшого випрямлення напруги, ніж у схемі з нульовим виводом при тому самому значенні напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора.

До недоліків схеми подвоєння слід віднести великий внутрішній опір, обумовлений тим, що два вхідні в схему випрямлячі з'єднані послідовно.

4.2 Порядок виконання роботи

1. Накресліть схеми випрямлячів, згідно завдання в таблиці 4.1. Покажіть включення приладів для виміру напруги на вторинній обмотці трансформатора U_2 , випрямлених напруги U_0 і струму I_0 .

2. Накресліть часові діаграми роботи цих схем. Характер навантаження й види часових діаграм, зазначені в таблиці 4.1. Індокси означають:

2 - вторинна обмотка трансформатора;

0 - навантаження;

а - вентиль.

Номер варіанта виберіть за вказівкою викладача.

Таблиця 4.1 - Завдання для виконання роботи

Номер варіанта	Схема випрямлення			
	однополуперіодна	двохполуперіодна с нульовим виводом	мостова	подвоєна
1	RC(i_a, u_0)	RL(i_2, u_a)		
2	RL(i_a, u_0)	RC(i_a, u_a)		
3		RL(i_a, u_0)		RC(i_2, u_a)
4		RC(i_a, u_a)		RL(i_2, u_0)
5	RC(i_a, u_0)		RL(i_2, u_a)	
6	RL(i_a, u_a)		RC(i_2, u_a)	
7			RL(i_a, u_a)	RC(i_2, u_a)
8			RC(i_a, u_0)	RL(i_2, u_a)
9		RL(i_a, u_a)	RC(i_2, u_0)	
10		RC(i_2, u_a)	RL(i_a, u_0)	

3. Заповніть таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати проведених розрахунків

Схема (навантаження активне)	U_0/U_2	I_0/I_2	$I_{a\ max}/I_0$	$U_{обрmax}/U_0$	P_T/P_0	K_n
однополуперіодна						
двухполуперіодна						
мостова						

Розрахуйте випрямляч, що створює на навантаженні постійну напругу 20 В при струмі 0,2 А. Напруга мережі дорівнює 220 В, частота 50 Гц. Конденсатори, що входять у схему випрямляча й фільтра, мають загальну ємність 200 мкФ. Виберіть ту схему випрямлення характер навантаження якої активно-ємнісної. Необхідно вибрати діоди, а також визначити типову потужність і коефіцієнт трансформації трансформатора.

Приведіть рівняння зовнішньої характеристики випрямляча.

4.3 Контрольні запитання

1. Які відмінності між вхідним і вихідним сигналами однополуперіодного випрямляча?
2. Чи однакові частоти вхідного й вихідного сигналів у схемах однополуперіодного й двухполуперіодного випрямлячів?
3. Навіщо необхідні трансформатори в схемах випрямлячів?
4. Які відмінності між сигналом на вході й на виході при двухполуперіодному випрямленні?
5. По осцилограмам вихідної напруги, визначте, чи здійснює випрямний міст однополуперіодне або двухполуперіодне випрямлення?
6. Чому відрізняються вихідні напруги в схемах з випрямним мостом і двухполуперіодним випрямлячем з відводом від середньої точки трансформатора?
7. У якому діапазоні напруг може змінюватися середнє значення вихідної напруги випрямляча з ємнісним фільтром на виході?
8. Які фактори впливають на величину коефіцієнта пульсації випрямляча з ємнісним фільтром на виході?
9. Чи буде відрізнятися середнє значення вихідної напруги однополуперіодної і двухполуперіодної схем випрямлення з ємнісним фільтром, якщо опір навантаження буде дорівнює нескінченності?
10. Чи буде впливати частота вхідної напруги випрямляча на середнє значення вихідної напруги й на коефіцієнт пульсації при фіксованих значеннях ємності фільтра й опору навантаження?

ЛІТЕРАТУРА

1. Лівшиць, Н. С., Радіотехнічні виміри. Підручник для профес.-технич. Учеб. Закладів / Н. С. Лівшиць, Б. Е. Телешевский. - М. : "Вища школа", 1972. - 208 с.
2. Меерсон, А. М. Радіовимірювальна техніка. - 3- е изд., перераб. і доп. / А. М. Меерсон. - Л. : Енергія, 1978. - 408 с.
3. Зайчик, І. Ю. Практикум по электрорадиоизмерениям: Учеб. посібник для учнів радиотехн. технікумів. - 2- е изд., перераб. і дополн. / І. Ю. Зайчик, Б. І. Зайчик. - М. : Высш. шк., 1985. - 239с.
4. Фриш С. Є., Тиморева А. В. Курс загальної фізики. Т. П. М., 1962.
5. Сивухин Д. В. Загальний курс фізики. Т. Ш: Електрика. М., 1977.
6. Трофімова Т.І. Курс фізики М., 1990
7. Електротехнічний справочник. под. ред. І.Н. Орлова й ін. Т.3 Кн.2 Розділ 60 Джерела вторинного електроживлення - М.: Энергоатомиздат, 1988. - с. 490-533.
8. Гельфанд Я.С. Випрямні блоки живлення й зарядні пристрої в схемах релейного захисту. - М.: Енергія, 1971.
9. Напівпровідникові прилади (Довідник) под. редакцією Н.Н. Горюнова – М.: Энергоиздат, 1982.
10. Негасила А.В. Довідкова допомога з електротехніки й основам електроніки - М.: Вища школа, 1986.
11. Алексєєв О.В. і ін. Електротехнічні пристрої. - М.: Энергоиздат, 1981. - 336 с.
12. Бакалов В.П. и др. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1989. - 528 с.
13. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники: Уч. пособие для вузов:- М.: Высш. школа, 1988. - 464 с.
14. Добротворский И.Н. Теория электрических цепей. Учебник для техникумов.- М.: Радио и связь, 1989. - 465 с.
15. Веселовский О.Н., Браславский Л.М. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры. Учеб. пособие для вузов. М., Высш. школа, 1977. - 312 с.
16. Добротворский И.Н. Теория электрических цепей. Задачник: Учеб. пособие для техникумов.- М.: Радио и связь, 1994. - 360 с.
17. Ерофеев Ю.Н. Импульсные устройства. Уч. пособие для вузов.- 3 изд., М.: Высш. школа, 1989.
18. Попов В.П. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.
19. Яцкевич В.В. Теория линейных электрических цепей. Справочное пособие. М.: Высш. школа, 1990. - 264 с.
20. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Издание 2-е, переработ.и доп., Л., «Энергия», 1972. - 816 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Правила внутрішнього розпорядку і техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт.....	4
Загальні методичні рекомендації щодо виконання лабораторних робіт.....	5
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 1	
Стрілочні й цифрові вимірювальні прилади.....	8
1.1. Загальні відомості.....	8
1.1.1. Вимірювальні механізми.....	8
1.1.2. Умовні графічні позначення на шкалі.....	12
1.2. Порядок виконання роботи.....	13
1.2.1. Устаткування робочого місця.....	13
1.2.2. Порядок дій.....	13
1.3. Контрольні питання.....	13
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 2	
Електричний струм. Послідовне та паралельне з'єднання опорів.....	14
2.1. Загальні відомості.....	14
2.1.1. Електричний струм.....	14
2.1.2. Електрорушійна сила.....	17
2.1.3. Закон Ома в інтегральній формі.....	19
2.1.4. Закон Ома у диференціальній формі.....	20
2.1.5. Закони Джоуля – Ленца.....	22
2.1.6. Послідовне та паралельне з'єднання опорів.....	22
2.2. Порядок виконання роботи.....	26
2.2.1. Устаткування робочого місця.....	26
2.2.2. Порядок дій.....	26
2.3. Контрольні питання.....	27
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 3	
Змінний струм.....	28
3.1. Загальні відомості.....	28
3.1.1. Визначення змінного струму.....	28
3.1.2. Ланцюг змінного струму.....	29
3.1.3. Метод векторних діаграм.....	32
3.2. Порядок виконання роботи.....	35
3.3. Контрольні питання.....	36
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 4	
Дослідження однофазних випрямлячів.....	36
4.1. Загальні відомості.....	36
4.1.1. Однополуперіодна схема випрямляча.....	36
4.1.2. Двухполуперіодна схема випрямлення з нульовим виводом.....	37
4.1.3. Мостова схема випрямлення.....	39
4.1.4. Схема подвоєння напруги.....	41
4.2. Порядок виконання роботи.....	42
4.3. Контрольні запитання.....	43
ЛІТЕРАТУРА.....	44

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Теорія електричних кіл»
для студентів прискореної форми навчання
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
Частина 1

Укладачі: ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
ДРОЗДОВА Ганна Анатоліївна
КУДІЙ Дмитро Анатолійович

Відповідальний за випуск Р.В. Зайцев

План 2019 р.

Підписано до друку 18.02.19. Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 3,5.
Обл.-вид. 2,8. Тираж 50 прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Кирипичева, 2.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Надруковано у типографії ТОВ «Цифра Принт»
на цифровому комплексі Херох DocuTech 6135.
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 3.08.2009 г.