

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Збірник методичних вказівок
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

“ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОРАДІОКІЛ”

Одеса 2014

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Збірник методичних вказівок
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

“ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОРАДІОКІЛ”

для студентів 3 курсу гідрометеорологічного інституту

«Затверджено»
методичною комісією факультету КН
протокол № ____ від _____ 2014р.

Одеса 2014

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Збірник методичних вказівок
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

“ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОРАДІО КІЛ”

для студентів 3 курсу

Напрямок підготовки - «Гідрометеорологія»

"Затверджено"
на засіданні методичної комісії
факультету КН
протокол №__ від ____ 2014р.
Голова комісії
_____ Коваленко Л.Б.

"Узгоджено"
Декан гідрометеорологічного
інституту
_____ Овчарук В.А.

"Затверджено"
на засіданні кафедри АСМНС
протокол №__ від ____ 2014р.
Зав. каф. АСМНС
_____ Перелигін Б.В. .

Одеса 2014

Збірник методичних вказівок до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електрорадіокілі» для студентів 3 курсу навчання за напрямом підготовки «Гідрометеорологія».

Укладач: Лавріненко Ю.В., к.т.н., доц., Бучинська І.В., асист. ОДЕКУ, 2014 р., стр. 57.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	4
1 Лабораторна робота № 1 “Вивчення законів Кірхгофа”	5
2 Лабораторна робота № 2 “Дослідження властивостей реактивних елементів у колах змінного струму”	11
3 Лабораторна робота № 3 “Дослідження частотних властивостей електричних кіл змінного струму з активним і реактивним опорами”.	18
4 Лабораторна робота № 4 “Дослідження властивостей феромагнітних матеріалів”	25
5 Лабораторна робота № 5 “Дослідження перехідних процесів в електричних колах ”	37
6 Лабораторна робота № 6 “Вивчення енергетичних спектрів найпростіших сигналів”	49
Перелік посилань	57

ВСТУП

Найефективнішим засобом підготовки студентів до лабораторних робіт є їх самостійна робота безпосередньо в лабораторії. Вона повинна включати: вивчення лабораторного устаткування та методики вимірювань під час виконання лабораторної роботи; вивчення особливих вимог техніки безпеки при роботі на даному устаткуванні.

В результаті виконання лабораторних робіт студенти повинні:

знати фізичні основи роботи електричних кіл.

Після проходження курсу лабораторних робіт студенти повинні:

вміти проводити вимірювання основних параметрів електротехнічних схем за допомогою електровимірювальних приладів.

Контрольні запитання, що наведені в кожній роботі, призначені для самостійного контролю під час підготовки до занять. Вони ж використовуються викладачем під час контролю підготовленості студентів до початку занять.

Після виконання роботи студент повинен представити індивідуальний звіт про виконання лабораторної роботи. Оформлення звіту повинно здійснюватись, як правило, впродовж виконання роботи. Звіти по лабораторних роботах захищаються по циклах, кожен цикл включає дві роботи.

Згідно з робочою програмою лабораторні роботи розбиті на 3 цикли, кожен цикл оцінюється як практичний модуль.

ВИМОГИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ З ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯМ

1. Для роботи з електрообладнанням і електровимірювальними приладами допускаються особи, які вивчили пристрій і порядок його використання, знають правила техніки безпеки і порядок надання першої допомоги потерпілим від ураження електричним струмом.

2. Перед кожною лабораторною роботою студенти повинні проходити інструктаж під підпис в журналі з техніки безпеки.

3. Об'єм та порядок проведення робіт з устаткуванням, приладами, електрообладнанням устанавлюється викладачем.

4. Усі з'єднальні проводи повинні мати наконечник. Корпуси всієї апаратури і обладнання повинні бути заземлені.

5. Вмикання та вимикання на щитах керування проводиться викладачем або інженером лабораторії.

6. Усі особи, що працюють з електроприладами, повинні ретельно керуватися завданням.

Лабораторна робота №1

«Вивчення законів Кірхгофа»

1.1 Паралельне з'єднання приймачів електричної енергії, перший закон Кірхгофа

Мета роботи. Здійснити паралельне з'єднання приймачів електроенергії. Визначити електричні струми в окремих приймачах і загальний струм; переконатися в правильності першого закону Кірхгофа.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи. В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

знати:

- основні поняття топології електричного кола: вузол, гілка, контур, шлях;
- основні характеристики змінного електричного струму;
- перший і другий закони Кірхгофа;
- принцип дії вольтметра і амперметра;
- правила підключення вольтметра і амперметра до вимірюваного кола;
- порядок визначення споживаної потужності;
- правила безпеки при роботі в лабораторії;

вміти:

- збирати електричні кола постійного та змінного струму;
- проводити електричні вимірювання напруги та струму;
- обчислювати значення параметрів електричного кола за результатами вимірювань;
- обчислювати величину потужності, що розсіюється.

Пояснення. З'єднання, при якому всі провідники підключені своїми початками до затиснення \hat{A} (рис. 1.1), а кінцями до затиснення \hat{A}' , називається паралельним [1, 2].

Якщо до загального затиснення \hat{A} або \hat{A}' приєднано більше двох приймачів, то цей зажим називається вузлом.

Перший закон Кірхгофа говорить, що сума всіх струмів у вузлах дорівнює:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

де I_k – струм у k – ой гілці; n – кількість гілок, приєднаних до даного вузла.

Іншими словами сума струмів, які протікають до даного вузла, дорівнює сумі струмів, що впливають з нього. Таким чином, для схеми,

представленої на рис. 1.1 рівняння першого закону Кірхгофа буде мати вигляд:

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

Напруга на всіх прийमाках однакова, тому що їхні кінці приєднані до того самого джерела напруги:

$$U_1 + U_2 + U_3 = U.$$

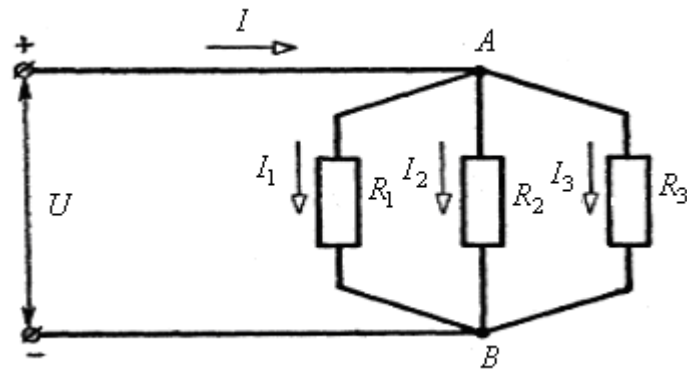


Рисунок 1.1 – Схема для вивчення Першого закону Кірхгофа

Струми в окремих гілках визначаються за законом Ома наступним чином:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Величина, зворотна опорі, називається провідністю:

$$\frac{1}{R} = g, \quad \frac{1}{R_1} = g_1, \quad \frac{1}{R_2} = g_2, \quad \frac{1}{R_3} = g_3.$$

Згідно з першим законом Кірхгофа загальний струм:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Розділивши обидві частини рівняння на U , отримаємо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

або

$$g = g_1 + g_2 + g_3.$$

Таким чином, загальна провідність кола паралельно включених приймачів дорівнює сумі провідностей окремих приймачів.

Електрична потужність, споживана елементами кіл визначається як добуток величин струму та напруги. Таким чином, потужність споживана кожною гілкою схеми буде дорівнювати:

$$P_i = UI_i,$$

а сумарна споживана потужність знаходиться як сума потужностей споживаних кожною гілкою схеми:

$$\sum_{i=1}^n P_i.$$

Устаткування й апаратура

Вольтметр 0 – 30 В, амперметр 0 – 1 А, набір резисторів, комплект сполучних проводів.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою вимірювання і приладами.
2. Зібрати схему вимірювання (рис. 1.2) і перевірити правильність включення всіх приладів.

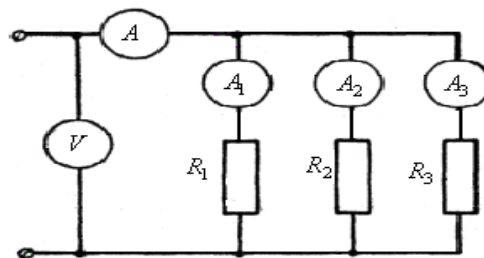


Рисунок 1.2 – Схема для вивчення паралельного з'єднання приймачів електричної енергії

3. Підключити схему до джерела живлення, зняти показники вольтметра та всіх амперметрів.

4. Переконалися в правильності Першого закону Кірхгофа.

5. Обчислити опір і провідність кожного приймача та всього кола. Записати результати в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Перший закон Кірхгофа

Результати експериментів	Номер елемента		
	1	2	3
Струм у колі елемента – I , А			
Струм у загальному колі – I , А			
Напруга живлення – U , В			
Опір i -го елемента – R_i , Ом			
Проводимість i -го елемента – g_i , Сім			
Спожив. потуж. i -м елементом – P_i , Вт			
Сумарна спожив. потужність. – P , Вт			

6. Повторити пункти пп.2 – пп.5 при живленні схеми змінним струмом, переконалися в інваріантності закону Кірхгофа до виду струму.

7. Скласти звіт про виконану роботу та зробити висновки.

1.2 Другий закон Кірхгофа

Мета роботи. Здійснити послідовне з'єднання приймачів і джерел електроенергії. Визначити падіння напруги на окремих приймачах і загальний струм у колі; переконалися в правильності Другого закону Кірхгофа.

Пояснення. З'єднання, при якому частина приймачів електричної енергії включені послідовно, а частина паралельно називається змішаним. У цьому випадку можуть бути виділені контури, що представляють замкнуту послідовність приймачів і джерел (рис. 1.3). Згідно Другому закону Кірхгофа, *алгебраїчна сума падінь напруг на елементах контуру дорівнює алгебраїчній сумі електро-рухаючих сил (е. р. с.) джерел діючих в контурі при будь-якому напрямку обходу контуру* [1, 2].

Іншими словами, алгебраїчна сума падінь напруг на елементах контуру й е. р. с. діючих в контурі джерел дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n U_i + \sum_{k=1}^m E_k = 0,$$

де U_i – падіння напруги на i -ому елементі контура; E_k – електрорушійна сила k -го джерела в контурі; n і m – кількість споживачів та джерел в контурі, відповідно.

Перевірку дії Другого закону Кірхгофа розглянемо на схемі, представлений на рис. 1.3. Схема містить чотири резистори (споживачі енергії) і два джерела е. р. с. (джерела енергії), які утворюють три контури. Перший контур включає в себе: $R_1 - R_2 - E_2 - R_3$. Другий контур включає в себе: $R_3 - E_1 - R_4$. Третій контур включає в себе: $R_1 - R_2 - E_2 - R_4 - E_1$.

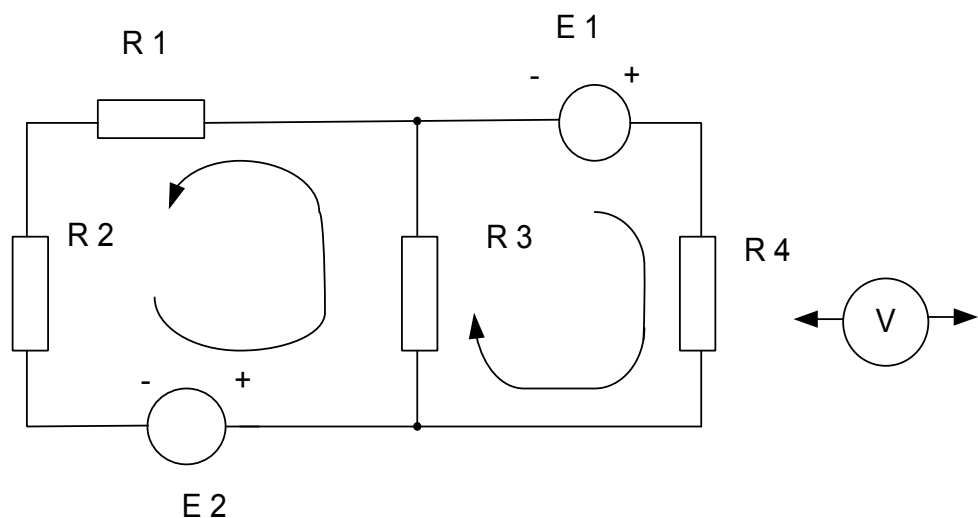


Рисунок 1.3 – Схема для вивчення дії другого закону Кірхгофа

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою вимірювання та приладами
2. Зібрати схему вимірювання (рис. 1.3) та перевірити правильність включення всіх приладів.
3. Включити в схему джерела е. р. с. постійного струму, за допомогою вольтметра виміряти з урахуванням знака падіння напруги на кожному елементі контуру і на кожному джерелі е. р. с., результат занести в табл. 1.2.
4. Просумувати отримані величини і переконатися в правильності Другого закону Кірхгофа.
5. Скласти звіт про виконану роботу.

Зміст звіту

1. Найменування виконаного завдання.
2. Перелік електровимірювальних приладів та обладнання, необхідних для проведення даної лабораторної роботи.
3. Електричні схеми вимірювань.

4. Табл. 1.1 та табл. 1.2 з виміряними та обчисленими величинами.
5. Формула для визначення опору паралельно з'єднаних приймачів.
6. Формула для визначення провідності окремого приймача та паралельного з'єднання приймачів.
7. Формула для визначення потужності споживаної приймачами електричної енергії.

Таблиця 1.2 – Другий закон Кіргофа

Номер елемента	Спадання напруги на i – тому елементі, В					
	Ел. №1	Ел. №2	Ел. №3	Ел. №4	Ел. №5	Ел. №6
Виміряна напруга – U_i , В						
Сумарна напруга першого контуру, В						
Сумарна напруга другого контуру, В						
Сумарна напруга третього контуру, В						

Відповісти усно на наступні питання

1. Що таке провідність приймача струму, в яких одиницях вона вимірюється?
2. Чому дорівнює провідність паралельного з'єднання приймачів, якщо опір кожного з них дорівнює R ? Чому дорівнює опір такого кола?
3. Як розподіляється струм по опорах, сполучених паралельно, якщо загальний струм в колі I , число опорів n , величина кожного опору R ?
4. Як формулюється Перший закон Кірхгофа?
5. Як формулюється Другий закон Кірхгофа?
6. Чому дорівнює струм в окремій гілці кола, якщо падіння напруг на ній дорівнює U , а опір дорівнює R ?
7. Як зв'язати закони Кірхгофа з законом збереження енергії?
8. Чому дорівнює струм у паралельному колі, якщо відомі струми в окремих його гілках?
9. Чому дорівнює споживана потужність паралельного кола, якщо відомі потужності, споживані елементами в кожній гілці?

Лабораторна робота № 2

«Дослідження властивостей реактивних елементів у колах змінного струму»

2.1 Дослідження електричного кола змінного струму з активним і індуктивним опорами

Мета роботи. Ознайомитися з найпростішими колами змінного струму, що мають активний і реактивний (індуктивний або ємкісний) опори, виміряти величини струмів і напруг на окремих ділянках кола і порівняти їх фазу.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи. В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

знати

- основні характеристики змінного електричного струму;
- фазові співвідношення між струмом і напругою в колах які містять активні й реактивні опори;

- принцип дії вольтметра і амперметра змінного струму;

- порядок визначення споживаної потужності;

- правила безпеки при роботі в лабораторії;

вміти:

- збирати електричні кола змінного струму;

- виробляти електричні вимірювання напруги і струму;

- обчислювати значення параметрів електричного кола за результатами вимірювання;

- обчислювати величину розсіюваної потужності.

Пояснення. Струм, який періодично змінюється за величиною і напрямом, називають змінним. Синусоїдальним змінним струмом називається струм, величина якого в часі змінюється за законом синуса:

$$i(t) = I_m \sin 2\pi ft,$$

де $i(t)$ – миттєве значення змінного струму, А; I_m – амплітуда змінного струму (максимальне значення), А; f – частота змінного струму, Гц; t – поточний час, сек.

Зазвичай в техніці мають справу з синусоїдальним змінним струмом, тому такий струм часто називають просто змінним. Змінний струм, проходячи через котушку індуктивності, утворює навколо неї змінне магнітне поле, яке перетинаючи витки котушки наводить у ній е. р. с. самоіндукції, зрушену по фазі на 180° стосовно прикладеній напруги. Таким чином, індуктивність кіл змінного струму впливає на силу струму як опір. Відповідна розрахункова величина носить назву індуктивного опору; вона позначається X_L і вимірюється так само як активний опір, в Омах і визначається за формулою:

$$X_L = 2\pi fL,$$

де L – індуктивність котушки, Гн.

Як видно з формули, чим вище частота змінного струму, тим більше її індуктивний опір X_L .

Оскільки е. р. с. самоіндукції виникає тільки при зміні струму, то і максимальні значення е. р. с. настає при максимальній швидкості зміни струму в котушці, тобто при проходженні струму через нуль від позитивного значення до негативного і навпаки – від негативного до позитивного. Тому е. р. с. самоіндукції за часом відстає від струму на чверть періоду або по фазі на $\frac{\pi}{2}$ електричних радіан (90°). Напряга на котушці, будучи протилежною е. р. с., навпаки, випереджає струм за часом на чверть періоду або на $\frac{\pi}{2}$ радіан (90°). Якщо по котушці проходить синусоїдальний струм, то напряга, що діє на ній буде також змінюватися за синусоїдальним законом:

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \frac{\pi}{2}) = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де $u(t)$ – миттєве значення напряги, що діє на котушці;
 $U_m = X_L I_m = 2\pi f L I_m$ – амплітуда напряги, В; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота змінного струму яка вимірюється в радіанах в секунду; $\varphi = \frac{\pi}{2}$ – початкова фаза.

При проходженні змінного струму по колу, що складається з послідовно включених активного та індуктивного опорів (рис. 2.1), між вхід ними затискачами кожного з цих елементів діє змінна синусоїдальна напряга, при цьому для послідовного кола виконується умова – сума миттєвих значень напруг, діючих на елементах дорівнює миттєвому значенню вхідної напруги, підведеної до всього кола:

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) = R I_m \sin \omega t + X_L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = Z I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де $Z = R + X_L$ – повний опір послідовного кола; $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ – результуючий зсув фази між напрягою і струмом.

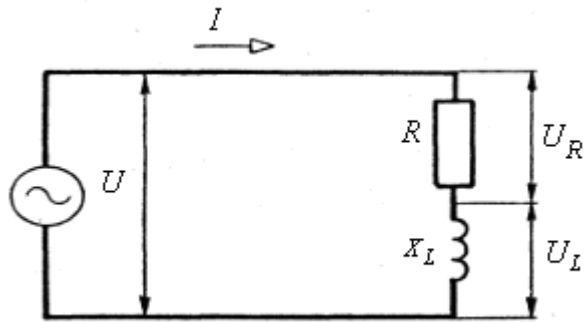


Рисунок 2.1 – Послідовне з'єднання активного та індуктивного елементів

Напруга на затискачах активного опору, коли через нього проходить змінний синусоїдальний струм, збігається по фазі з цим струмом, тобто струм одночасно з напругою досягає максимального значення і проходить нульові значення (рис. 2.2) [1, 2].

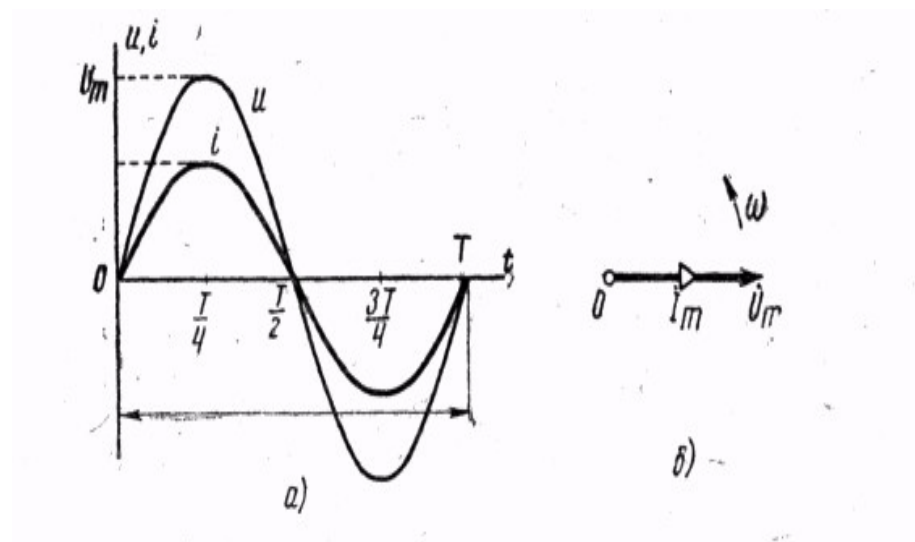


Рисунок 2.2 – Епюри напруги і струму на чисто активному опорі:
а) синусоїдальні криві миттєвих значень; б) векторна діаграма

Коли ж змінний синусоїдальний струм проходить по чисто індуктивному опорі, то на затискачах цього опору випереджає по фазі цей струм на $\frac{\pi}{2}$ радіана, тобто коли напруга, змінюючись синусоїдально, досягає максимуму, струм в цей миттєвий час дорівнює нулю (рис. 2.3).

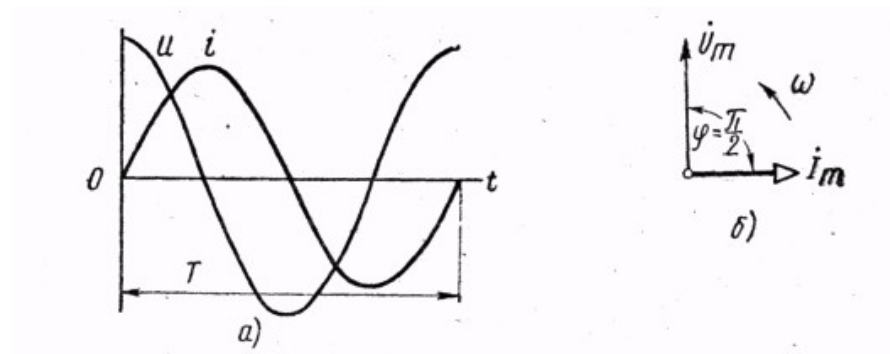


Рисунок 2.3 – Співвідношення напруги і струму на чисто індуктивному опорі
а) синусоїдальні криві миттєвих значень; б) векторна діаграма.

З урахуванням вище сказаного, повний опір кола Z можна розглядати як гіпотенузу прямокутного трикутника (рис. 2.4) катетами якого є R і X_L .

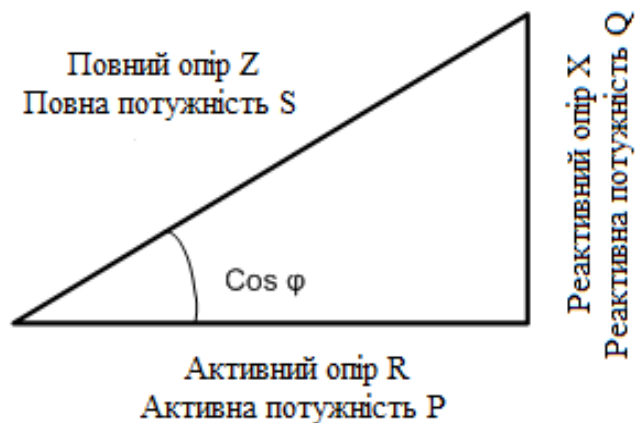


Рисунок 2.4 – Представлення повного опору послідовного кола

Як видно з рис. 2.4, збільшення реактивного індуктивного опору X_L по відношенню до активного опору R призводить до зростання φ – кута зсуву фаз між напругою і струмом. У граничному випадку, коли коло має чисто індуктивний характер $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$.

Електричне коло, по якому проходить змінний струм споживає з мережі активну, реактивну і повну потужності. Повна потужність, яка вимірюється в вольт-амперах (ВА), дорівнює добутку струму I на напругу U :

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Активна потужність P , яка вимірюється у ватах, дорівнює добутку напруги U на струм I і на коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ або добутку квадрата струму на активний опір:

$$P = UI \cos\varphi = I^2 R.$$

Реактивна потужність Q , вимірюється в вольт-амперах реактивних (вар), дорівнює добутку напруги U на струм I і на синус кута зсуву фаз між прикладеною напругою і струмом $\sin\varphi$, або добутку квадрата струму на реактивний опір:

$$Q = UI \sin\varphi = I^2 X_L.$$

Співвідношення цих потужностей між собою можуть бути представлені в вигляді прямокутного трикутника потужностей подібного трикутнику опорів, зображеному на рис. 2.4. Активна потужність P пропорційна активному опору – R , реактивна потужність Q пропорційна реактивному опору X_L і повна потужність S – повному опору Z .

При проведенні лабораторних робіт слід мати на увазі, що індуктивний опір являє собою котушку намотану з провідника, а всякий провідник має активний опір і тому індуктивний опір в чистому вигляді виконати дуже важко.

Реальна індуктивна котушка завжди володіє і якимось активним опором; таким чином, повний опір котушки завжди визначається за формулою:

$$Z = \sqrt{r_{ai}^2 + X_L^2},$$

де – внутрішній опір самої котушки.

Устаткування й апаратура

Двохпроменевий осцилограф, вольтметр змінного струму 0 – 30 В, амперметр змінного струму 0 – 1 А, котушка індуктивності, комплект з'єднуючих проводів.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 2.5).

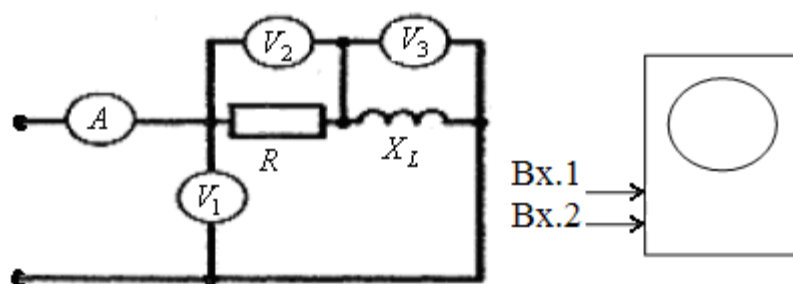


Рисунок 2.5 – Схема електричних вимірювань активно-індуктивного кола

2. Подати живлення на схему від генератора змінного струму частотою 300-600 Гц і виміряти входні напруги та напруги на активному і індуктивному опорі. Результати замірів записати в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. – Електричні параметри кола

	Активний опір – R	Індуктивний опір – X_L	Вхідні клеми
Напруга на елементі – U , В			
Струм у колі – I , А			
Величина опору – R , Ом			
Споживана потужність – P , Q , S .			

3. Обчислити за результатами вимірювань сили струму та напруг опору і потужності.

4. За результатами обчислень побудувати трикутники опорів і потужностей.

5. Обчислити значення коефіцієнта потужності.

6. За допомогою двопроменевого осцилографа зняти епюри напруг на активному та реактивному опорі та визначити різницю їх початкових фаз.

2.2 Дослідження електричного кола змінного струму з активним і ємнісним опорами

Пояснення. Ємність у колі змінного струму періодично заряджається і розряджається. Цей процес не може відбуватися миттєво, так як при цьому була потрібна нескінченно велика потужність джерела. Реально, час який витрачається на перезаряд не дорівнює нулю, що призводить до появи реактивного ємнісного опору величина якого визначається виразом:

$$X_C = - \frac{1}{2\pi fC},$$

де C – величина ємності, Ф.

На протидію індуктивності, струм через ємність випереджає напругу на ній в ідеальному випадку на $\frac{\pi}{2}$, тому реактивний опір місткості прийнято вважати негативним. Епюри струму та напруги (рис. 2.3.а) і векторна діаграма (рис. 2.3.б) мають такий же вигляд як показано, якщо тільки позначення струму та напруги поміняти місцями. Всі інші співвідношення для визначення: повного опору, активної, реактивної та повної потужності мають такий же вигляд як і у випадку індуктивного реактивного опору.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему, наведену на рис. 2.5, встановивши замість котушки індуктивності конденсатор.
2. Повторити всі вимірювання та розрахунки по пп.2 – пп.6 попереднього підрозділу 2.1 для випадку, коли замість котушки індуктивності в схему на рис. 2.5 включена ємність.
3. Порівняти отримані результати.

Зміст звіту

1. Назва лабораторної роботи.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів і устаткування, які необхідні для виконання даної лабораторної роботи.
3. Електрична схема вимірювання.
4. Таблиці з виміряними й обчисленими величинами.
5. Формули для розрахунку повного опору кола, повної потужності, активної і реактивної потужності, коефіцієнта потужності.
6. Трикутники напруг, опорів і потужностей.
7. Порівняльна оцінка зсуву фази між струмом і напругою для реактивного опору різного виду (індуктивне і ємнісне).

8. Висновки по роботі

Усно відповісти на наступні запитання

1. Який струм називається синусоїдальним змінним струмом?
2. Чому дорівнює індуктивний реактивний опір?
3. Чому дорівнює миттєва напруга на індуктивності (ємності) і на активному опорі, якщо по них протікає змінний струм?
4. Чому дорівнює кутова частота? У яких одиницях вона вимірюється?
5. Чому дорівнює ємкісний реактивний опір?
6. Що таке активна та реактивна потужності змінного струму?
7. Чому дорівнює повна потужність змінного струму?
8. Що таке коефіцієнт потужності?
9. Чому дорівнює активна потужність кола змінного струму, якщо коефіцієнт потужності дорівнює одиниці?

Лабораторна робота № 3

«Дослідження частотних властивостей електричних кіл змінного струму з активним і реактивним опорами»

Мета роботи. Ознайомитися з найпростішими колами змінного струму, що складаються з ємнісних й індуктивних елементів, що утворюють частотні фільтри й резонансні контури; виміряти величини струмів і напруг на окремих ділянках кола при різних значеннях частоти живлячої напруги.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи. В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

знати:

- види електричних фільтрів та їх основні характеристики;
- фізичну сутність процесу виникнення резонансу в електричних колах;
- вплив параметрів окремих елементів на величину частоти резонансу контуру й ширину смуги пропущення фільтра.

вміти:

- розраховувати й практично визначати смугу пропущення фільтра;
- будувати амплітудно-частотну характеристику фільтра по крапках за допомогою вольтметра й осцилографа;
- розраховувати й практично визначати резонансну частоту й смугу пропускання коливального контуру;

3.1 Дослідження фільтрів нижніх і верхніх частот

Пояснення. У практиці електротехніки часто виникає необхідність додати колам частотно-селективні властивості. Тобто коливання, наприклад нижніх частот, повинні проходити з мінімальними втратами, а коливання верхніх частот – з більшим ослабленням. Таке коло називається частотним фільтром нижніх частот. Існують і використовуються також частотні фільтри верхніх частот – проникними є тільки верхні частоти, смугові – *проникні* частоти від i до будь-якої величини й режекторні – *не проникні* частоти від i до будь-якої величини [1, 2].

На рис. 3.1 показаний приклад схеми найпростішого LC – *фільтра* нижніх частот (ФНЧ). При подачі сигналу певної частоти на вхід фільтра (ліворуч), напруга на виході фільтра (праворуч) визначається відношенням реактивних опорів котушки індуктивності ($X_L = \omega L$) і конденсатора ($X_C = \frac{1}{\omega C}$).

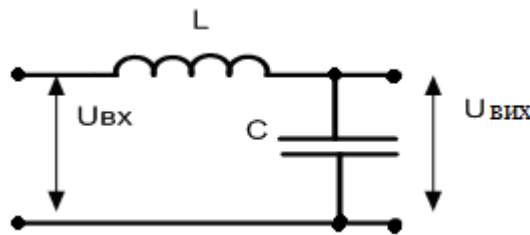


Рисунок 3.1 – Ланка фільтру нижніх частот

Коефіцієнт передачі ФНЧ можна обчислити, розглядаючи дільник напруги, утворений частотнозалежними опорами реактивності L і C . Комплексне (з урахуванням зрушення фаз між напругою й струмом) опір котушки індуктивності:

$$Z_L = j\omega L = jX_L,$$

і конденсатора:

$$Z_C = \frac{1}{(j\omega C)} = -jX_C,$$

де $j = \sqrt{-1}$ – уявне число; $\omega = 2\pi F$ – кутова поточна частота.

Для *ненавантаженого* LC – *фільтра* коефіцієнт передачі буде:

$$K = \frac{Z_C}{Z_L + Z_C}.$$

Підставляючи значення комплексних опорів, одержимо для частотно - залежного коефіцієнта передачі:

$$K(\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} = \frac{1}{1 - (\omega / \omega_0)^2}.$$

Залежності модуля комплексного коефіцієнта передачі фільтра від частоти називають *амплітудно-частотною характеристикою* (АЧХ). Як видно, коефіцієнт передачі ненавантаженого ідеального ФНЧ необмежено зростає з наближенням до частоти $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, і потім зменшується. На дуже низьких частотах коефіцієнт передачі ФНЧ близький до одиниці, на дуже високих – до нуля.

У реальних схемах до виходу фільтра підключається активне навантаження, що знижує добротність фільтра й запобігає резонансу АЧХ поблизу частоти ω_0 . Величина цього опору визначається по формулі: $p = \sqrt{\frac{L}{C}}$ і називається *характеристичним опором фільтра*. ФНЧ, навантажений на опір, рівний характеристичному, має нерезонансну (рівномірну) АЧХ, приблизно постійну для частот $\omega < \omega_0$, і спадну як $\frac{1}{\omega^2}$ на частотах вище ω_0 . Тому, частоту ω_0 називають *частотою зрізу* і вона визначає смугу пропускання фільтра. На рис. 3.2 представлена ідеалізована АЧХ навантаженого фільтра нижніх частот. Для зручності порівняння по вертикальній осі відкладається не абсолютне значення коефіцієнта передачі, а нормоване до максимального, тобто

$$K_0 = K / K_{\max}.$$

На практиці прийнято відраховувати смугу пропускання при зменшенні відносного коефіцієнта передачі до рівня 0,707.

Аналогічним образом будується й *LC – фільтр* верхніх частот. У схемі ФВЧ міняються місцями котушка індуктивності й конденсатор. Для ненавантаженого ФВЧ виходить наступний коефіцієнт передачі:

$$K(\omega) = - \frac{(\omega / \omega_0)^2}{1 - (\omega / \omega_0)^2}.$$

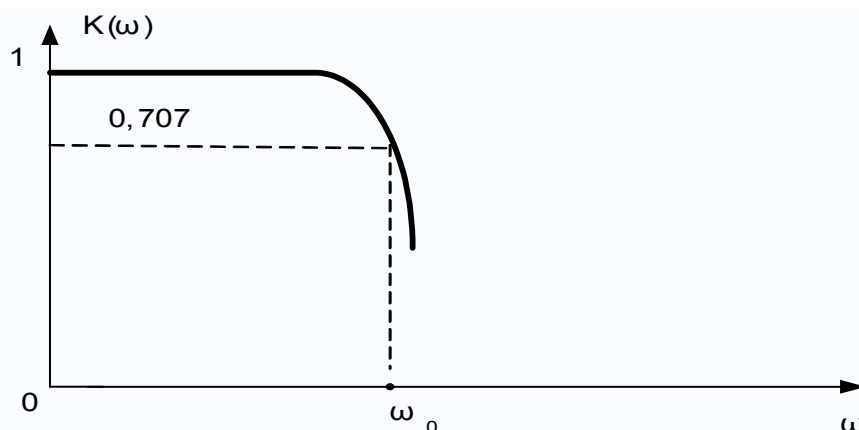


Рисунок 3.2 – Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ

На дуже низьких частотах модуль коефіцієнта передачі ФВЧ близький до нуля. На дуже високих – до одиниці. Характеристичний опір визначається за тією ж формулою. Ідеалізована амплітудно-частотна характеристика ФВЧ представлена рис. 3.3.

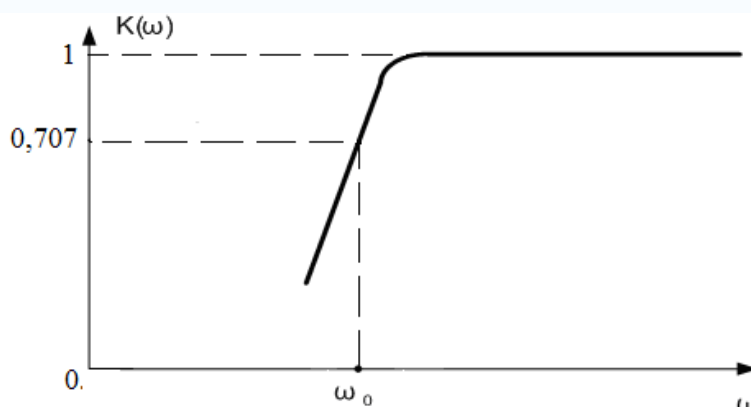


Рисунок 3.3 – Амплітудно-частотна характеристика ФВЧ

Устаткування й апаратура

Вольтметр змінного струму 0 - 30 В, амперметр змінного струму 0 - 1 А, генератор синусоїдальних коливань, двопроменевий осцилограф, набір котушок індуктивності, конденсаторів, резисторів і комплект з'єднуючих проводів.

Порядок виконання роботи

1. Для конденсатора й котушки індуктивності, виданих викладачем, розрахувати величину частоти зрізу ω_0 і величину характеристичного опору P .

2. Зібрати схему ФНЧ, навантаженого на характеристичний опір, наведений на рис. 3.4.

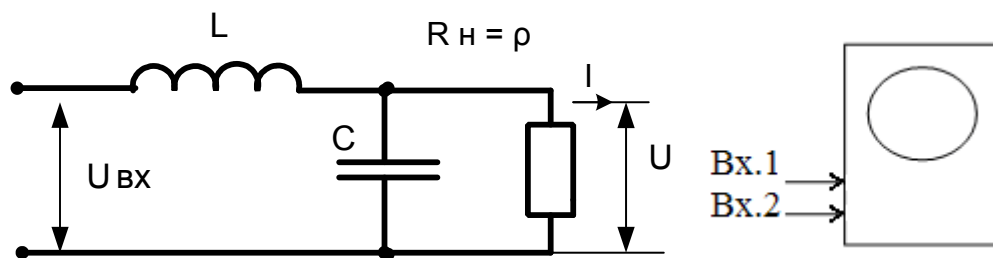


Рисунок 3.4 – Схема електричних вимірів ФНЧ

3. Підключити генератор синусоїдальних коливань до входу фільтра, установити й підтримувати протягом всіх вимірів амплітуду вихідної напруги генератора постійною, наприклад 1 В; величину вхідної напруги фільтра можна контролювати за допомогою вольтметра змінного струму, але найточніше, шляхом подачі його на один із входів осцилографа.

4. Підключити другий вхід осцилографа паралельно характеристичному опору й по екрані виміряти амплітуду вихідної напруги; змінюючи частоту генератора від мінімуму до максимуму, фіксувати амплітуду вихідної напруги, дані занести в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Залежність вихідної напруги фільтра від частоти

Частота генератора - F , Гц	F_1	$F_1 + \Delta F$	$F_1 + 2\Delta F$...	$F_1 + i\Delta F$...	$F_1 + (n-1)\Delta F$	$F_1 + n\Delta F$
Вхідна напруга - U , В								
Вихідна напруга - U , В								
Відносний коеф. перед. K_0								

Примітка. У таблиці прийняті наступні позначення: F_1 – початкова частота діапазону дослідження; ΔF – «крок» зміни частоти генератора; n – кількість кроків зміни частоти генератора.

5. За даними табл. 3.1 розрахувати величину відносного коефіцієнта передачі ФНЧ, побудувати графік залежності $K_0(\omega)$, визначити за графіком смугу пропускання ФНЧ.

6. Поміняти місцями конденсатор і котушку індуктивності, тим самим перейти від ФНЧ до ФВЧ і повторити пп. 2 – 5.

7. Зробити висновки.

3.2 Дослідження резонансного контуру

Пояснення. У практиці електротехніки часто використовується явище резонансу в коливальному контурі, що складається з ємності конденсатора й котушки індуктивності. В електронних пристроях резонанс виникає на певній частоті, коли індуктивна і ємнісна складові реакції системи врівноважені, що дозволяє енергії циркулювати між магнітним полем індуктивного елемента й електричним полем конденсатора [1, 2].

Механізм резонансу полягає в тому, що магнітне поле індуктивності генерує електричний струм, що заряджає конденсатор, а розрядка конденсатора створює магнітне поле в індуктивності – процес, що повторюється багаторазово, за аналогією з механічним маятником.

Електричний пристрій, що складається з ємності й індуктивності, називається коливальним контуром. Елементи коливального контуру можуть бути включені як послідовно, так і паралельно. При досягненні резонансу, імпеданс послідовно з'єднаних індуктивності і ємності мінімальний, а при паралельному включенні – максимальний.

Частота, на якій відбувається резонанс, визначається величинами елементів які при цьому використовуються. У той самий час, резонанс може бути й шкідливий, якщо він виникає в несподіваному місці через ушкодження, недостатньо якісного проектування або виробництва електронного пристрою. Такий резонанс може викликати паразитний шум, перекручування сигналу, і навіть ушкодження компонентів.

Прийнявши, що в момент резонансу індуктивна і ємнісна складові імпедансу рівні, резонансну частоту можна знайти з виразу:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C},$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота, а f – резонансна частота, Гц; L – індуктивність контуру, Гн; C – ємність контуру, Ф.

Важливо, що в реальних системах поняття резонансної частоти нерозривно пов'язане зі *смугою пропускання*, тобто діапазоном частот, у якому реакція системи мало відрізняється від реакції на резонансній частоті. На рис. 3.4 показаний вид типової резонансної кривої коливального контуру. Звичайно вона має колоколоподібну форму.

Ширину смуги пропускання прийнято, як і для фільтрів, визначати за рівнем 0,707 від відносного значення коефіцієнта передачі $K_0 = 1$.

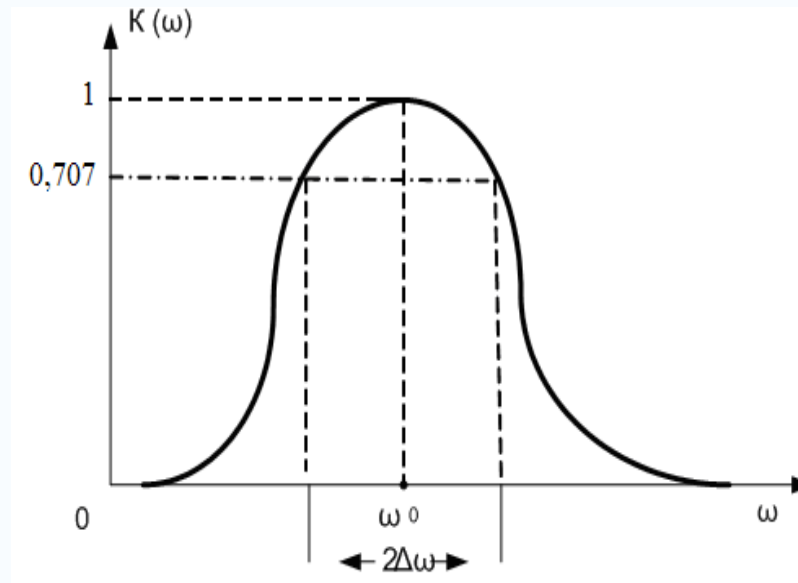


Рисунок 3.4 – Типова резонансна крива коливального контуру

Ширина смуги пропускання $2\Delta\omega$ визначається добротністю коливального контуру. Чим добротність вище, тим вужче смуга пропускання і скати резонансної кривої крутіші.

Порядок виконання роботи

1. Для конденсатора й котушки індуктивності, виданих викладачем, розрахувати частоту резонансу ω_0 .
2. Зібрати схему коливального контуру, наведену на рис. 3.5.
3. Підключити генератор синусоїдальних коливань до коливального контуру, установити й підтримувати в плинні всіх вимірів амплітуду вихідної напруги генератора постійної, наприклад 1 В; величину вхідної напруги фільтра можна контролювати за допомогою вольтметра змінного струму, але найточніше, шляхом подачі його на один із входів осцилографа.
4. Підключити інший вхід осцилографа паралельно резистору в контурі й по екрані виміряти амплітуду вихідної напруги, змінюючи частоту генератора від мінімуму до максимуму, фіксувати амплітуду вихідної напруги, дані занести в таблицю виду табл. 3.1.
5. За даними табл. 3.1 розрахувати величину відносного коефіцієнта передачі контуру, побудувати графік залежності $\hat{E}_0(\omega)$, визначити за графіком смугу пропускання коливального контуру.

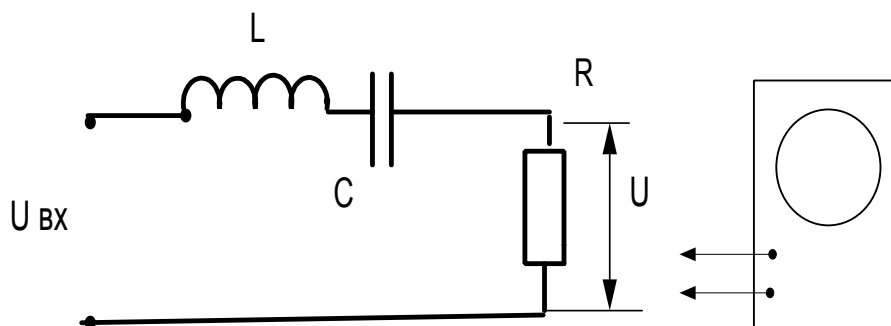


Рисунок 3.5 – Схема електричних вимірів коливального контуру

Зміст звіту

1. Назва лабораторної роботи.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів й устаткування, необхідних для виконання даної лабораторної роботи.
3. Електричні схеми вимірів.
4. Таблиці з обмірюваними й обчисленими величинами.
5. Графіки АЧХ фільтрів і резонансних кривих контурів.
6. Висновки по роботі.

Відповісти усно на наступні питання

1. Для чого призначені частотні фільтри?
2. Які бувають частотні фільтри?
3. Чим обумовлені властивості частотних фільтрів?
4. Що таке частота зрізу фільтра?
5. Як визначається характеристичний опір фільтра?
6. Що таке смуга пропускання фільтра?
7. Що таке коливальний контур?
8. Де застосовуються коливальний контур?
9. Як визначається смуга пропускання контуру?
10. Як впливає добротність на смугу пропускання контуру?
11. Який характер має імпеданс контуру на резонансній частоті?

Лабораторна робота № 4

«Дослідження властивостей феромагнітних матеріалів»

Мета роботи. Ознайомитися з методом виміру характеристик феромагнітних матеріалів, досліджувати залежності індукції магнітного поля й гістерезисних втрат у зразку магнітного матеріалу від величини

напруженості магнітного поля; побудувати основну криву намагнічування зразка й петлю гістерезису, що відповідає максимальному магнітному полю в зразку.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи. В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

знати:

- основні властивості феромагнітних матеріалів;
- основні характеристики феромагнітних матеріалів;
- фізичний зміст петлі гістерезису;
- види втрат і порядок визначення потужності втрат у феромагнітних матеріалах;
- правила безпеки при роботі в лабораторії;

вміти:

- підготовляти до роботи й робити виміри тесломіром;
- збирати й набудовувати експериментальну установку для одержання петлі гістерезису;
- робити обчислення потужності втрат.

Пояснення.

Загальні відомості про феромагнетизм. До феромагнетиків відносять залізо, нікель, кобальт, їхні сполуки й сплави, а також деякі сплави марганцю, срібла, алюмінію та інше. Всі феромагнетики характеризуються:

- кристалічною будовою;
- більшим значенням магнітної проникності, а також істотною й нелінійною її залежністю від напруженості поля й температури;
- гістерезисом – залежністю магнітних властивостей від попереднього магнітного стану («магнітної передісторії»);
- крапкою Кюрі, тобто температурою, вище якої матеріал губить феромагнітні властивості [1, 2].

Криві намагнічування. Магнітні властивості феромагнетиків характеризуються залежностями магнітної індукції B від напруженості поля H і втрат на перемагнічування P від індукції й частоти.

Залежності виду $B = f(H)$ називають кривими намагнічування. Магнітні властивості матеріалу залежать не тільки від напруженості поля, температури, наявності або відсутності механічних напруг і так далі, але й від попереднього магнітного стану.

Основна крива намагнічування являє собою геометричне місце вершин симетричних петель гістерезису, що виходять при циклічному перемагнічуванні (крива 1 на рис. 4.15).

Петля гістерезису. При циклічному перемагнічуванні крива намагнічування утворить петлю гістерезису (криві 2 й 3 на рис. 4.1). Форма петлі для даного матеріалу залежить від значення поля H_{\max} . Для слабких

полів вона має вигляд еліпсів (крива 2), зі збільшенням поля у неї починають витягатися «носики», що відповідають крапкам A_1 та A_2 (крива 3).

Петлю гістерезису, отриману за умови насичення, називають граничною. У довідниках звичайно приводяться симетричні граничні петлі гістерезису.

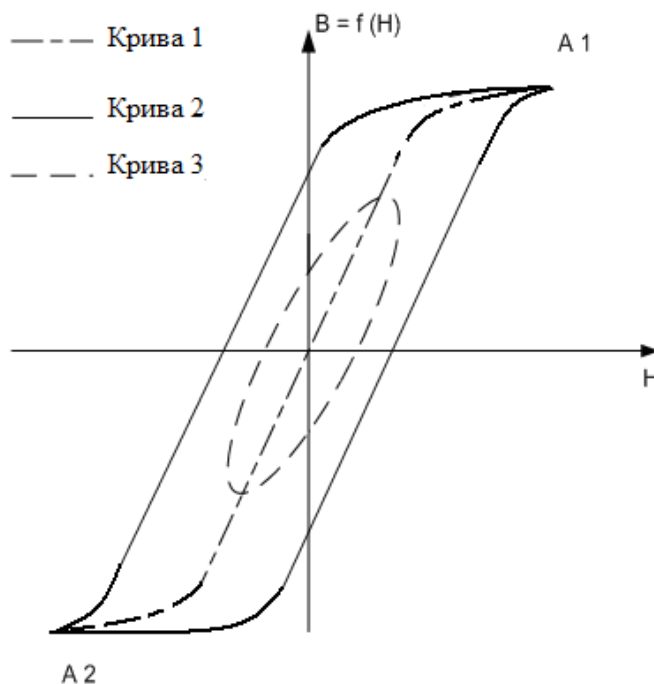


Рисунок 4.1 – Основна крива намагнічування й петля гістерезису

Основними характеристиками петлі гістерезису є залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c і площа петлі, що характеризує втрати на гістерезис w_a , за один цикл перемагнічування. Залишковою індукцією B_r називають індукцію, що залишається в попередньо намагніченому зразку після зняття зовнішнього магнітного поля.

Коерцитивна сила H_c – це поле, що розмагнічує, воно повинно бути прикладене до попередньо намагніченого зразка, для того щоб індукція в ньому дорівнювала нулю.

Енергія втрат на гістерезис, віднесена до одиниці об'єму речовини за один цикл перемагнічування чисельно рівна площі під кривою петлі гістерезису, визначається формулою:

$$w_a = \oint H dB, [\text{Дж/м}^3]. \quad (4.1)$$

При перемагнічуванні матеріалу із частотою f питомі втрати на

гістерезис дорівнюють:

$$p_{\bar{a}} = f w_{\bar{a}} / \rho, [\text{Вт/кг}] \quad (4.2)$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м^3 .

Магнітні матеріали. Магнітним називають матеріал, який застосовують у техніці з обліком його магнітних властивостей. Загальноприйняте виділення двох основних груп магнітних матеріалів – *магнітом'які* й *магнітотверді*.

Характерними властивостями магнітом'яких матеріалів є їхня здатність намагнічуватися до насичення навіть у слабких полях (висока магнітна проникність) і малі втрати на перемагнічування.

Магнітотверді матеріали (матеріали для постійних магнітів) мають велику питому енергію. Ця енергія тим більша, чим більша залишкова індукція B_r і коерцитивна сила H_C матеріалу.

Порівнюючи петлі гістерезису, характерні для обох груп матеріалів, можна відзначити, що форма петлі, індукція насичення й залишкова індукція приблизно однакові, а різниця в коерцитивній силі досягає дуже великого значення. Для промислових магнітом'яких матеріалів найменша $H_C \sim 0,4 \text{ А/м}$, а для магнітотвердих найбільша $H_C \sim 800\,000 \text{ А/м}$, тобто вона відрізняється в $2 \cdot 10^6$ разів. Отже, магнітом'які матеріали мають вузьку петлю гістерезису з невеликою коерцитивною силою, а магнітотверді – широку петлю з великою коерцитивною силою.

Магнітом'які матеріали прийнято класифікувати по їх основному хімічному складу, що у значній мірі визначає технологію виробництва, властивості й області застосування матеріалу. Відповідно до цього магнітом'які матеріали підрозділяють на різні групи.

Технічно чисте залізо (низьковуглецева електротехнічна сталь) – це залізо, що містить обмежену кількість домішок, насамперед вуглецю, отримане методами прямого відновлення чистих руд. Технічно чисте залізо є *дешевим і технологічним матеріалом*, добре штампується й обробляється на всіх металорізальних верстатах, має *високі магнітні властивості в постійних полях*.

Основний недолік заліза складається в *малому значенні питомого електричного опору*, що обмежує область його застосування як магнітного матеріалу постійними магнітними полями. У змінних полях залізо застосовувати недоцільно через більші втрати на вихрові струми.

Електротехнічні (кременисті) сталі являють собою твердий розчин кремнію у залізі. До переваг електротехнічних сталей ставляться *більші значення питомого електричного опору й високі магнітні властивості*. Основними недоліками цих сталей є *підвищена твердість і крихкість*, а також *знижені значення індукції насичення* (у порівнянні із залізом).

Електротехнічні сталі в порівнянні з іншими магнітними матеріалами найбільше широко застосовуються для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів, дроселів та інших пристроїв,

розрахованих на роботу при частоті до 400–500 Гц в області малих, середніх і сильних полів, іноді в постійних полях і при підвищених частотах (до 10 кГц).

Властивості сталей, призначених для роботи в середніх і сильних магнітних полях при частоті 50 Гц. Ця група сталей є найбільшою по кількості марок й об'єму застосування. Її використовують головним чином для виробництва енергетичного устаткування – генераторів, двигунів, силових трансформаторів.

Основними електромагнітними характеристиками цієї групи сталей є крива первинного намагнічування (рис. 4.2), питомі втрати при частоті 50 Гц (рис. 4.3) і різних амплітудах магнітної індукції.

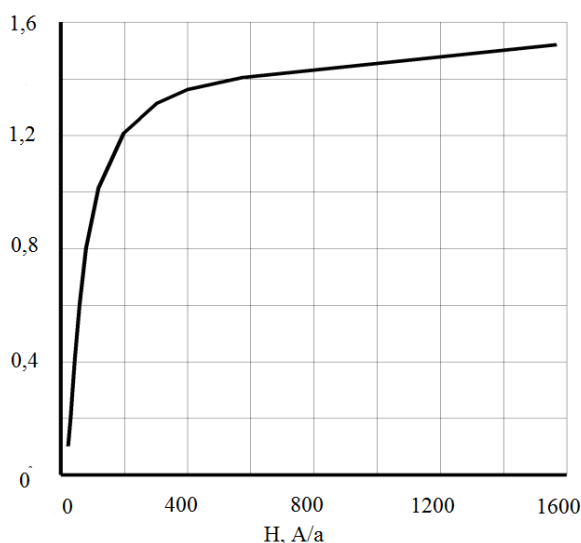


Рисунок 4.2 – Криві первинного намагнічування електротехнічних сталей

На рис. 4.2 показані криві намагнічування, обмірювані в широкому діапазоні напруженості поля для трьох найбільш характерних марок сталі розглянутої групи. Рисунок характеризує залежність магнітних властивостей від ступеня легерування й наявності текстури.

Залежність питомих втрат від магнітної індукції для різних марок сталей має приблизно однаковий характер. На рис. 4.3 показана така залежність для анізотропних сталей.

Властивості сталей, призначених для роботи в середніх полях при підвищеній частоті. Ця група сталей з'явилася у зв'язку із широким використанням у техніку підвищеної частоти (400 – 20 000 Гц). З ростом частоти збільшується вплив вихрових струмів на процеси перемагнічування. Щоб вихрові струми були менші, застосовують спеціальні високолеговані електротехнічні сталі ($S_i = 3 - 3,5\%$) у вигляді тонких аркушів і стрічок, що володіють більшим питомим опором.

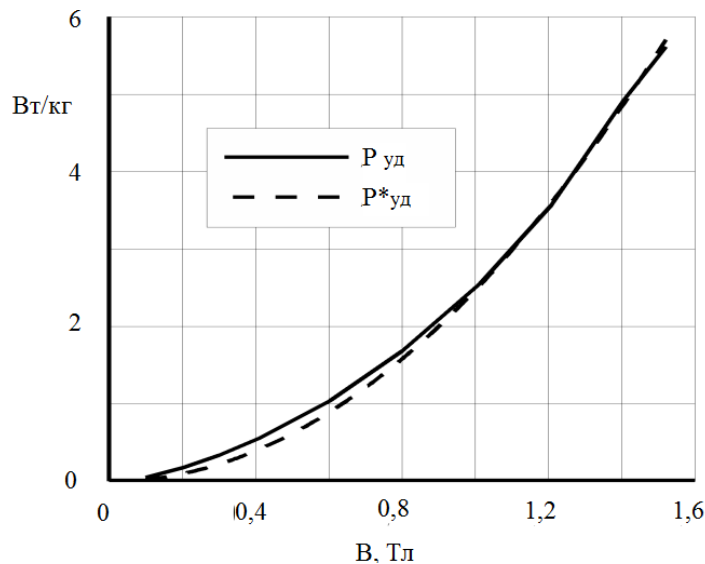


Рисунок 4.3 – Залежність питомих втрат від магнітної індукції для електротехнічних сталей

Товщину прокату вибирають залежно від значення робочої частоти. Для частоти 400 Гц рекомендується застосовувати стрічки товщиною близько 0,15 мм. При частотах 400 – 1000 Гц вибирають більше тонкі стрічки (0,08 мм), при 1000 – 3000 Гц застосовують стрічки товщиною 0,05 мм. Дуже тонкі стрічки 0,03; 0,02 й 0,01 мм доцільно використати при частотах понад 3000 Гц.

Основні методи виміру втрат на перенамагніченні.

Осцилографічний метод. Ідея осцилографічного методу полягає в наступному. На магнітний зразок (рис. 4.4) накладають обмотку, що намагнічує, w_l й обмотку для виміру індукції w . На вертикальні пластини електронного осцилографа (з електростатичним керуванням) подають напругу, пропорційну намагніченому току, наприклад з резистора R_θ , включеного в коло послідовно. При цьому миттєве значення напруги на вертикальних пластинах пропорційно миттєвому значенню намагніченого поля.

На горизонтальні пластини подають напругу фазоздвигуючого конденсатора \tilde{N} , включеного послідовно з вимірювальною обмоткою w і навантажувальним резистором R . При дотриманні умов $R \gg X$ напруга на горизонтальних пластинах буде:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{w S dB}{R dt} dt = \frac{w S}{C R} B_t,$$

де C – величина фазоздвигуючої ємності; R – величина опору навантажувального резистора; w – кількість витків у вимірювальній обмотці; S – площа поперечного перерізу магнітопроводу; B – магнітна

індукція в магнітопроводі.

Таким чином, миттєве значення напруги на вертикально відхиляючих пластинах, пропорційно миттєвому значенню індукції в магнітопроводі. В результаті додавання відхилень по горизонталі й вертикалі електронний промінь описує криву, що зображує в деяких масштабах (вони можуть бути підраховані) динамічну петлю гістерезису.

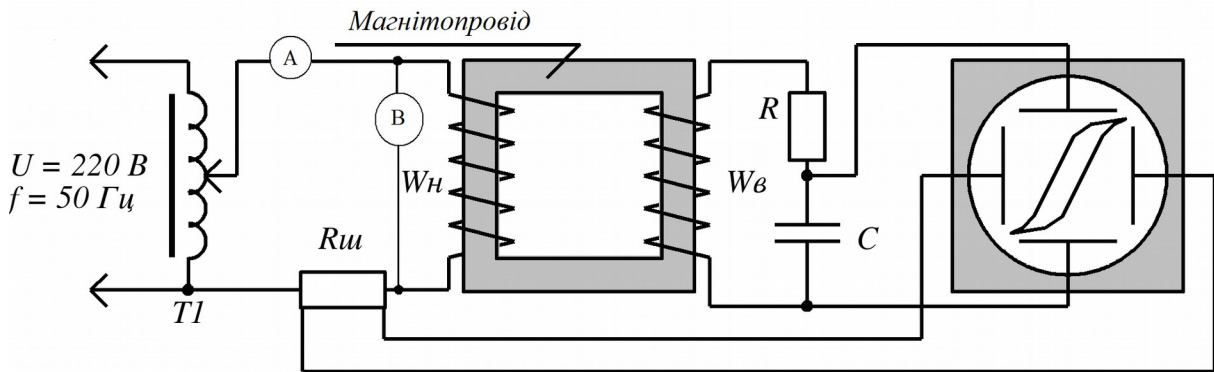


Рисунок 4.4 – Схема стенда для зняття осцилограм петлі гістерезису

Осцилографічний метод має виняткову наочність і може бути використаний у широкому частотному діапазоні. Однак більшим недоліком методу є його мала точність. Похибка вимірів H та B для цього методу порядку 7–10%.

Існує також *ватметрів метод*, що заснований на вимірі ватметром повної потужності, затрачуваної в колі котушки з магнітним зразком. Втрати на перемагнічування в зразку підраховують як різницю між показаннями ватметра й втратами у вимірювальних приладах та намагнічуючій обмотці. Ватметрів метод у багатьох країнах стандартизований для випробування електротехнічних сталей. Про значення індукції судять побічно, за показниками вольтметра, за допомогою якого вимірюють діюче значення напруги на вимірювальній обмотці w_a .

Ватметрів метод дозволяє вимірювати втрати тільки на низьких частотах, що пояснює в основному труднощі створення точних високочастотних ватметрів. Межі вимірюваних таким методом потужностей становлять від декількох одиниць до декількох десятків ват. Відносна похибка виміру втрат у зразку становить 1%.

При випробуваннях найбільш зручні *зразки кільцевої форми*. Для кільцевого зразка із середнім діаметром D_{cp} , числом витків намагнічуючої обмотки, w_i і струмом у ній I напруженість поля підраховують за формулою:

$$H = \frac{w_i I}{\pi D_{cp}}, [\text{А/м}]. \quad (4.3)$$

Оскільки для конкретного зразка магнітопроводу величини w_i й D_{cp} є постійними, то можна записати:

$$H = KI,$$

де $K = w_i / \pi D_{cp}$ – постійний для даного магнітопроводу коефіцієнт.

Перевагою кільцевих зразків, крім простоти визначення напруженості поля, є високий ступінь однорідності намагнічування. Однак кільцеві зразки не завжди можна виготовити, на них важко намотувати обмотки й вони не дозволяють створювати сильні поля, що намагнічують.

Методика виміру магнітних властивостей електротехнічної сталі.

У даній лабораторній роботі використалася методика виміру магнітних властивостей електротехнічної сталі, заснована на комбінації осцилографічного й ватметрового методів. Випробування проводилися шляхом виміру миттєвих значень напруги і струму котушки за один період частоти.

Дослідження магнітних властивостей електротехнічної сталі на змінному струмі частотою 50 Гц у проводиться на зразку, що має кільцевий магнітопровід зі сталі марки 2412, на сердечнику намотані дві тероїдальні обмотки – намагнічуюча w_i і вимірювальна w_a . Параметри зразка досліджуваного магнітопроводу наведені в табл. 4.1 .

Таблиця 4.1 – Параметри досліджуваного магнітопроводу

№	Найменування характеристики	Величина
1	Число витків намагнічуючої котушки – w_i , вит	143
2	Число витків вимірювальної котушки – w_a , вит	72
3	Площа поперечного перерізу сердечника – S , м ²	0,00023
4	Середня довжина магнітної силової лінії – l_{cp} , м	0,124
5	Щільність матеріалу сердечника – ρ , кг/м ³	7950
6	Об'єм сердечника – $V = S l_{cp}$, м ³	$2,85 \cdot 10^{-5}$
7	Маса сердечника – $m = V \cdot \rho$, кг	0,23
8	Коефіцієнт заповнення сердечника сталлю – k_s	0,9
9	Опір намагнічуючої обмотки $R_{i \rightarrow i}$, Ом	0,117

Електрична схема установки представлена на рис. 4.3. Живлення намагнічуючої котушки, w_i здійснюється від мережі 220 В, 50 Гц через регулюючий автотрансформатор T_1 . Миттєві значення напруги на основній котушці w_i й ЕРС на вимірювальній котушці w_a знімається з конденсатора. Сигнал, пропорційний току котушки, знімається із шунта R_θ .

Повна активна потужність втрат P випробовуваного зразка містить у собі втрати на гістерезис у магнітопроводі $P_{\tilde{a}\tilde{n}\tilde{o}}$ і втрати в міді намагнічуючої обмотки P_i .

$$P = P_{\tilde{a}\tilde{n}\tilde{o}} + P_i.$$

Повна активна потужність P обчислюється як середнє значення миттєвої потужності за період частоти мережі T за допомогою чисельного інтегрування обмірюваних величин:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt,$$

де $p(t)$ – миттєва потужність; $u(t)$ і $i(t)$ – миттєві значення напруги й струму; T – період синусоїдального коливання.

Втрати в міді намагнічуючої котушки P_i визначаються як:

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T Ri^2(t) dt,$$

де R – активний опір намагнічуючої котушки.

Гістерезисні втрати на перемагнічування магнітопроводу $P_{\tilde{a}\tilde{n}\tilde{o}}$ обчислюються як:

$$P_{\tilde{a}\tilde{n}\tilde{o}} = w_a V f,$$

де V – об'єм магнітопроводу; f – частота мережі; w_a – енергія втрат на перемагнічування сталі за один період частоти мережі, чисельно рівні площі під петлею гістерезису, може бути визначена за формулою (4.1).

Варто врахувати, що використовувані прилади (вольтметри й амперметри) вимірюють діючі значення змінних синусоїдальних величин, які пов'язані з миттєвими значеннями виразів:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} ,$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} .$$

При цьому повна потужність визначається як $S = UI$.

Устаткування й апаратура

Вольтметр змінного струму 0-30 В, амперметр змінного струму 0 - 1 А, осцилограф, стенд для виміру напруженості магнітного поля в магнітопроводі, стенд для одержання петлі гістерезису й комплект з'єднальних проводів.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з методикою виміру магнітних властивостей феромагнітних матеріалів, електричними схемами стендів, зображених на рис. 4.4 і рис. 4.5.
2. Побудувати по крапках первинну криву намагнічування, для чого:
 - підготувати тесламер до роботи (установити «нуль» і відкалібрувати);
 - установити щуп приладу в проріз магнітопроводу й закріпити його;
 - зібрати схему відповідно до рис. 4.5;

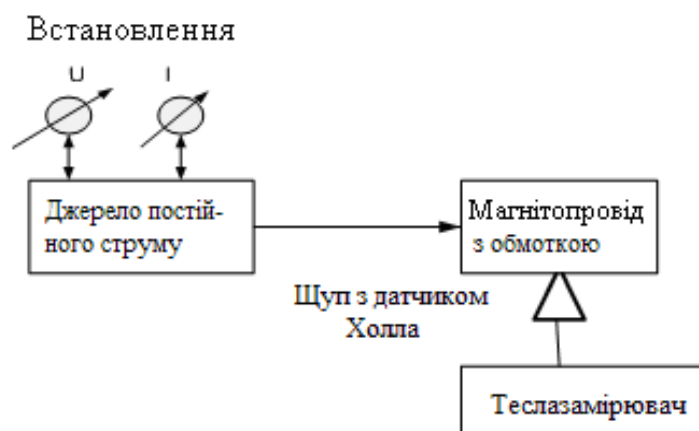


Рисунок 4.5 – Схема стенда для побудови первинної кривої намагнічування

– включити джерело постійного струму й збільшуючи величину струму від 0 до 10 амперів кроком 1А виміряти значення магнітної індукції в зазорі В, а потім зменшуючи від 10 А до нуля повторити виміри, дані занести в табл. 4.2;

– змінити полярність живильного струму й повторити виміри в порядку викладеному в попередньому пункті, дані занести в табл. 4.2;

– використовуючи формулу (4.2) і дані табл. 4.1 розрахувати й заповнити останній рядок табл. 4.2;

– за отриманими даними побудувати криві первинного намагнічування $B = f(H)$.

Таблиця 4.2 – Параметри первинної кривої намагнічування

№ п/п	1	2	...	i-1	i	i+1	...	n-1	n
Напруга U , В									
Струм I , А									
Індукція B , Тл									
Напруження магнітного поля \dot{I} , А/м									

4. Провести вимір втрат при різних значеннях магнітної індукції B у зразку, для чого:

– підключити вольтметр змінного струму паралельно до намагнічуючої обмотки, а амперметр змінного струму послідовно;

– змінюючи за допомогою вхідного автотрансформатора напругу, що подається на намагнічуючу котушку, записувати її величину й величину струму в колі (струм намагнічуючої котушки не повинен перевищувати 5 А), дані занести в табл. 4.3, вважаючи, що вся енергія витрачається на втрати, розрахувати величини повних втрат за формулою (результат занести в табл. 4.3):

$$P = S = UI, [\text{ВА}];$$

– використовуючи конструкційні характеристики досліджуваного магнітопроводу (табл. 4.1) розрахувати втрати опору намагнічуючої котушки за формулою (результат занести в табл. 4.3):

$$P_i = R_{i\dot{a}i} I^2, [\text{Вт}];$$

– вважаючи, що $S = P$ і знаючи втрати в міді обмотки, P_i знайти величину втрат на гістерезис $P_{\dot{a}\ddot{n}\dot{o}}$ як їх різницю (результат занести в табл. 4.3):

$$P_{\dot{a}\ddot{n}\dot{o}} = P - P_i ;$$

– використовуючи конструкційні характеристики досліджуваного магнітопроводу (табл. 4.1) розрахувати питомі втрати на гістерезис за формулою (результат занести в табл. 4.3):

$$p_{\dot{o}\ddot{a}} = P_{\dot{a}\ddot{n}\dot{o}} / V \rho .$$

Таблиця 4.3 – Втрати в сердечнику

№ п/п	1	2	...	i-1	i	i+1	...	n-1	n
Напруга U , В									
Струм I , А									
Магн.індукція B , Тл									
Площа перетину S , ВА									
Втрати в обмотці P_i , Вт									
Повні втрати P , Вт									
Втрати на гістерезис $P_{\dot{a}\ddot{n}\dot{o}}$, Вт									
Питомі втрати $p_{\dot{o}\ddot{a}}$, Вт									

5. Побудувати графік залежності питомих втрат $P_{\text{дв}} = f(B)$ (аналогічний показаному на рис. 4.3).

6. Зняти осцилограми петлі гістерезису з екрана осцилографа для різних значень напруженості магнітного поля (величини струму у вхідній обмотці), починаючи від малих значень і закінчуючи максимальним.

Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів й устаткування, необхідних для виконання даної лабораторної роботи.
3. Електричні схеми вимірів.
4. Таблиці з обмірюваними й обчисленими величинами.
5. Графіки первісного намагнічування й питомих втрат досліджуваного сердечника.
6. Осцилограми петлі гістерезису для різних значень струму в котушці, що намагнічує.
6. Висновки.

Відповісти усно на наступні питання

1. Які матеріали називаються магнітними?
2. Які матеріали називаються магнітом'якими?
3. Які матеріали називаються магнітотвердими?
4. Що таке крива первинного намагнічування?
5. Що таке петля гістерезису й що вона характеризує?
6. Як зміниться величина питомих втрат при збільшенні частоти струму, що намагнічує?
7. Як зміниться величина питомих втрат при збільшенні товщини аркушів електротехнічної сталі?
8. Як зміниться величина питомих втрат при зменшенні питомого опору сталі?

Лабораторна робота №5

«Дослідження перехідних процесів в електричних колах»

Мета роботи. Вивчення перехідних процесів, що протікають в електричних колах, складених з опорів, індуктивностей та ємностей (у так званих $R\tilde{N}$ - і RL - колах).

Завдання на підготовку до лабораторної роботи. У результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

знати:

- загальні поняття й закони перехідних процесів в електричних колах;
- фізичні процеси, що відбуваються в електричних колах під час перехідних процесів;
- види електричних $R\tilde{N}$ - і RL - кіл і їхні принципові схеми;
- правила безпеки при роботі в лабораторії;

вміти:

- збирати експериментальні установки для виміру параметрів перехідних процесів;
- робити розрахунки постійної години $R\tilde{N}$ - і RL - кіл.

Пояснення. Перехідними процесами в електричних колах називаються процеси, що виникають при переході від одного сталого режиму до іншого в результаті зміни напруги джерела, частоти, форми сигналу й т.д. Зміна параметрів джерел й елементів кіл називається комутацією. Важливими елементами в таких колах є так називані $R\tilde{N}$ - і RL - кола. $R\tilde{N}$ - і RL - кола, які широко застосовуються в обчислювальній й імпульсній техніці [1, 2].

З їхньою допомогою можна інтегрувати або диференціювати електричні сигнали. Використовуючи властивості цих кіл можна формувати робочу смугу частот електронних пристроїв.

Застосування таких кіл можна проілюструвати на прикладі інтегруючого $R\tilde{N}$ - кола. У фізичних приладах воно часто вбудовується в кінцевому каскаді підсилювача. За допомогою цього кола домагаються згладжування або, іноді говорять, інтегрування сигналу. При цьому шумова доріжка сигналу стає меншою за рахунок «електронного» усереднення сусідніх значень реєструючого сигналу, тобто вони стають скорельованими. Характеристикою, що описує цю кореляцію, є постійна часу. При виборі оптимальних розумів вимірів в експерименті, таких як швидкість і точність вимірів, постійна часу відіграє важливу роль.

Іншим прикладом може служити типова проблема пробою при включенні й виключенні електричних кіл утримуючих реактивні елементи (котушки індуктивності й конденсатори). У таких колах перехід до нового установленого режиму пов'язаний зі збільшенням або зменшенням електричної та магнітної енергії W в реактивних елементах. Як відомо, потужність P пов'язана з енергією W таким виразом:

$$P = \frac{dW}{dt} = UI,$$

де U – діюче значення напруги; I – діюче значення струму.

При миттєвій зміні енергії ($dt \rightarrow 0$) потужність P нескінченно велика, що може бути тільки при нескінченно великих струмах і напругах

у колі. У більшості випадках це і є причиною виходу з ладу електронної апаратури.

5.1 Електричний імпульс, який проходить через $R\tilde{N}$ - коло

Розглянемо електричне коло, зображене на рис. 5.1. Нехай у початковий момент часу ($t=0$) конденсатор не заряджений. Перекинемо ключ K у положення a на годину τ , потім знову повернемо його в положення \dot{a} . Така схема еквівалентна генератору прямокутного імпульсу з нульовим внутрішнім опором, напруга на виході якого:

$$U_{a\dot{a}} = \begin{cases} 0, & \text{ї } \delta \text{è } t < 0, \\ \dot{a}, & \text{ї } \delta \text{è } 0 \leq t \leq \tau, \\ 0, & \text{ї } \delta \text{è } t > \tau. \end{cases}$$

Якщо до такого генератора (рис. 5.1) підключити резистор і конденсатор ($R\tilde{N}$ - коло), а на виході знімати напругу U_C з обкладок конденсатора, $R\tilde{N}$ - коло називається інтегруючим; якщо знімати U_R на резисторі, $R\tilde{N}$ - коло називається диференціальним. Зміст цих назв буде пояснюватися нижче. Зараз відмітимо, що при $0 < t < \tau$ відбувається зарядження конденсатора, а при $t > \tau$ – його розрядження.

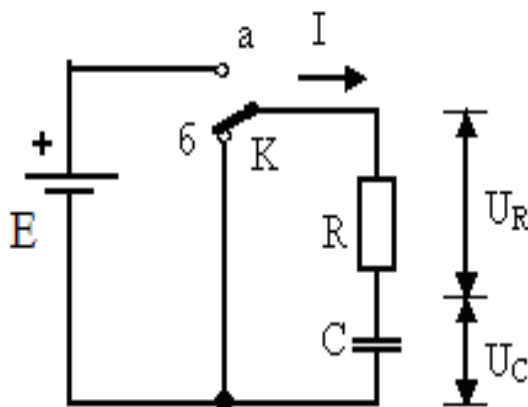


Рисунок 5.1 – Еквівалентна схема генератора імпульсної напруги прямокутної форми, навантаженого на $R\tilde{N}$ - коло

Заряд конденсатора. При замиканні кола (ключ у положенні a , рис. 5.2) конденсатор почне заряджатися. Заряди, що з'являються на пластинках, почнуть зменшувати струм у колі. Цей процес описується рівнянням. Величина струму I в послідовному колі з конденсатором

визначається зміною заряду q у часі, де $q = CU_C$ – заряд на пластинах конденсатора ємністю C при напруженні U_C .

Спадання напруги на резисторі R визначається за законом Ома:

$$RI = E - U_C,$$

де U_C – напруга на конденсаторі; E – е. р. с. джерела.

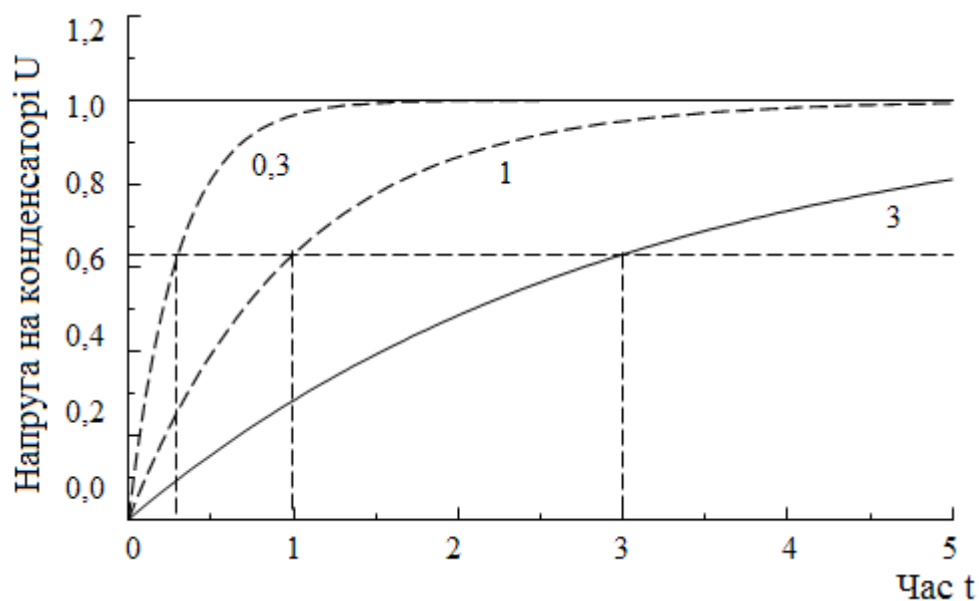


Рисунок 5.2 – Залежність напруги від часу при заряді конденсатора

Перетворивши цей вираз, виключивши I й U з формули, одержимо лінійне диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{E}{R}.$$

Рішенням цього рівняння є вираз:

$$q = A \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + CE.$$

Виходячи з початкових умов заряду конденсатору (при $t=0$, $q=0$), можливо визначити значення постійної інтегрування:

$$A = -CE.$$

У цьому випадку рішення диференційного рівняння має вид:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad q = CE \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right].$$

де $\tau = RC$ – постійна часу $R\tilde{N}$ - кола (характерна година заряду або інакше година релаксації).

Закон зміни напруги на конденсаторі під час заряду можна одержати з цього рівняння, поділивши ліву і праву частини рівняння на C :

$$U_C = \frac{q}{C} E \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right].$$

Величину напруги на резисторі U_R знайдемо із закону Ома:

$$U_R = IR = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Розрядка конденсатора відбувається, якщо перемкнути ключ K у положення \tilde{b} (рис. 5.1). Для вивчення розрядки конденсатора запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} q = CU_C; \\ I = U_R / R. \end{cases}$$

При $t = 0$ у початковий момент напругу на конденсаторі приймемо $U_C = E$ і напруга на конденсаторі почне зменшуватися за експонентним законом:

$$U_C = E e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Струм у колі поміняє напрямок і буде визначатися вираом:

$$I = - \left(\frac{E}{R} \right) \exp\left\{ -\frac{t}{\tau} \right\}.$$

І, відповідно, напруга на резисторі буде змінюватися за законом:

$$U_R = IR = E \exp\left\{ -\frac{t}{\tau} \right\}.$$

Таким чином, у розглянутих колах напруга й струм під час перехідного процесу змінюються за експонентним законом. Постійна часу τ характеризує швидкість перехідного процесу. За час $t = \tau$ спадає по експоненті величина зменшується в e разів (тобто приблизно в 2,7 разів) і досягає 0,37 свого первісного рівня, а наростаюча, 0,63 сталого значення. На рис. 5.2 показано, як наростаюча величина U_C при $t = \tau$ досягає значення 0,63 сталого значення рівного 1. За час $t = 5\tau$ та $t = 3\tau$ вона досягне, відповідно, 0,95 та 0,99. Практично перехідний процес можна вважати закінченим за час $t = (3 - 5)\tau$.

Аналогічно спадає величина за час $t = 3\tau$ і $t = 5\tau$ досягає, відповідно, 0,05 та 0,01 свого первісного значення. При заряді конденсатора U_C напруга на пластинах конденсатора збільшується до максимальної величини за експонентним законом. На рис. 5.2 показані залежності від часу для трьох постійних часу, τ – постійна часу RC – кола, що визначає швидкість перехідного процесу.

Розглянемо на рис. 5.3 різні граничні ситуації, за якими можна розрізняти $R\tilde{N}$ - кола (аналогічно й RL - кола). Вводячи по визначенню падіння напруг на опорі R й ємності C , і з огляду на зв'язок між ними одержимо два граничних випадки. Якщо виконується умова $U_R \ll U_C$, то $U_{\ddot{a}\ddot{o}} \approx U_C$ і напруга на виході, знімаєма з резистора буде:

$$U_R = \tau \left(\frac{dU_{\ddot{a}\ddot{o}}}{dt} \right),$$

тобто пропорційна похідній від вхідного сигналу, саме коло буде називатися «диференційованим».

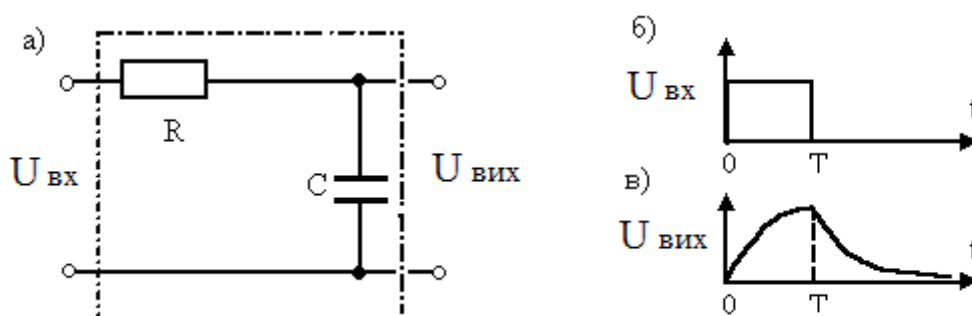


Рисунок 5.3. – Інтегруюче $R\tilde{N}$ - коло
а) принципова схема, б) форма вхідного імпульсу
в) форма вихідного імпульсу

Якщо виконується умова: $U_R \gg U_C$, то $U_{\ddot{a}\ddot{o}} \approx U_R$ і напруга на виході,

яку знімає конденсатор, буде:

$$U_C = \left(\frac{1}{\tau} \right) (\int U_{\text{вх}} dt),$$

тобто пропорційна інтегралу від вхідного сигналу, саме коло буде називатися «інтегруючим».

Таким чином, можливо два варіанти схем $R\tilde{N}$ - кіл: інтегруюче (рис. 5.3 а) і диференціююче (рис. 5.4 а). На цих же рисунках наведені епюри, що показують перетворення вхідного прямокутного імпульсу (рис. 5.3 б) і рис. 5.4 б при проходженні через ці кола (рис. 5.3 в) і рис. 5.4 в, відповідно.

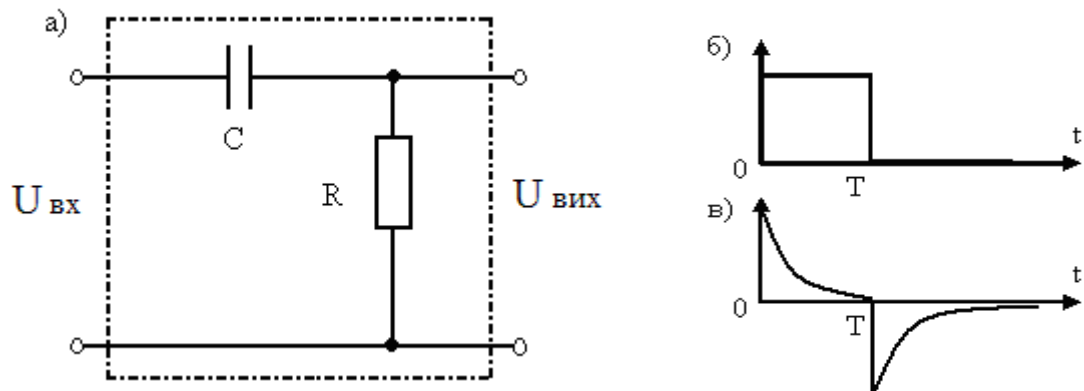


Рисунок 5.4 – Диференціююче коло
а) принципова схема, б) форма імпульсу на вході,
в) форма імпульсу на виході кола

Сильний вплив на форму вихідного імпульсу робить співвідношення тривалості імпульсу T і постійного часу кола $\tau = RC$. Зокрема, для інтегруючого кола повинна виконуватися умова $T < \tau$. Для кола, що диференціює, повинне бути $T > \tau$.

При співвідношенні $T \approx \tau$ коло, що диференціює, перетворюється на перехідне, котре передає вхідний сигнал на вихід, практично не змінюючи його форму. Перехідні кола використовуються як елементи зв'язку між окремими каскадами, оскільки вони пропускають змінну складову (сигнал) і не пропускають постійну складову (живлення). Цим виключається взаємний вплив каскадів один на одного при постійному струмі.

Інтегруючі й диференціюючі кола можна побудувати й на основі RL елементів. Їхня принципова схеми й вид вхідних і вихідних імпульсів наведені на рис. 5.5 й рис. 5.6, відповідно.

У випадку RL – кола постійна часу визначається як відношення індуктивності котушки до опору резистора $\tau = L / R$.

На практиці більше застосовуються RC – кола, як більш прості у виготовленні й маючі менші розміри.

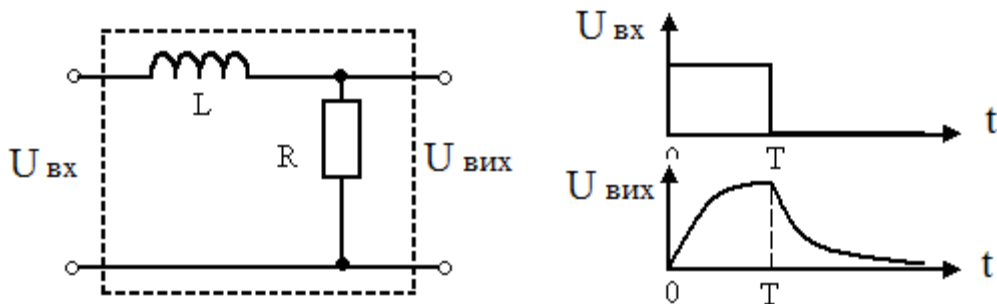


Рисунок 5.5. – Інтегруюче RL – коло

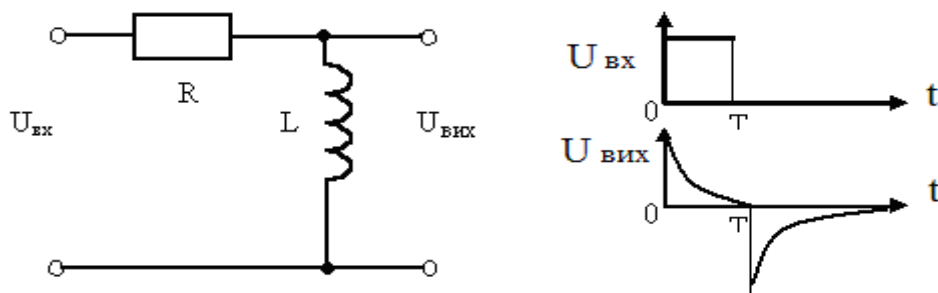


Рисунок 5.6 – Диференціююче RL – коло

Устаткування й апаратура

В експериментальну установку входить: генератор імпульсів прямокутної форми Г5-54, електронний вольтметр В7-34А, двопроменевий осцилограф, джерело постійного струму, магазин опорів, ємностей й індуктивностей зі стенда УІЛС.

Порядок виконання роботи

5.1. Зняття залежності величини напруги на конденсаторі при заряді й розряді

- зібрати схему наведену на рис. 5.1, використати номінали елементів за вказівкою викладача;
- установити вихідну напругу блоку живлення 10 В;
- приєднати вхід вольтметра до гнізд « U_C » лабораторної

установки;

г) поставити ключ у положення «Заряд», нажати й утримувати кнопку «Скидання»;

д) виміряти вольтметром напругу на конденсаторі, відпустити кнопку «Скидання» і далі робити відлік значення напруги на конденсаторі через кожні десять секунд, поки воно не прийде до сталого значення, отримані дані занести в табл. 5.1;

е) повторити пункт д) три-п'ять разів, після чого зробити усереднення отриманих результатів для кожного моменту часу реєстрації напруги й занести в нижній рядок табл. 5.1;

Таблиця 5.1 – Напруга на конденсаторі при заряді й розряді ємності

	U_C при $t=0$	U_C при $t=1 \cdot 10$	U_C при $t=2 \cdot 10$...	U_C при $t=n \cdot 10$
Перший цикл					
Другий цикл					
...					
Усереднення по циклах					

ж) поставити ключ у положення «Розряд» і повторити пункти д) і е), результати занести в табл. 5.1 (не натискаючи кнопку «Скидання»);

з) побудувати графіки отриманих залежностей $U_C = F(t)$ при заряді й розряді конденсатора, зрівняти з розрахунковими для даної постійної часу.

5.2. Зняття залежності струму через конденсатор при заряді й розряді

а) зібрати схему наведену на рис. 5.1, використати номінали елементів за вказівкою викладача;

б) установити вихідну напругу блоку живлення 10 В;

в) приєднати вхід вольтметра до гнізд « U_R » лабораторної установки;

г) поставити ключ у положення «Заряд», нажати й утримувати кнопку «Скидання»;

д) виміряти вольтметром напругу на резисторі, відпустити кнопку «Скидання» і далі робити відлік значення напруги на резисторі через кожні десять секунд, поки воно не прийде до сталого значення, отримані дані занести в табл. 5.2;

е) повторити пункт д) три – п'ять разів, після чого зробити

усереднення отриманих результатів для кожного моменту часу реєстрації напруги, результат занести в передостанній рядок табл. 5.2;

ж) поставити ключ у положення «Розряд» і не натискаючи кнопку «Скидання», повторити пункти д) і е), результати занести в табл. 5.2;

з) перерахувати значення отриманої напруги в струм для відомого R , використовуючи закон Ома;

і) побудувати графіки отриманих залежностей $I_{\text{зар}} = f(t)$ і $I_{\text{роз}} = f(t)$, зрівняти з розрахунковими для даної постійної часу.

Таблиця 5.2 – Напруга на резисторі при заряді й розряді ємності

	U_R при $t = 0$	U_R при $t = 1 \cdot 10$	U_R при $t = 2 \cdot 10$...	U_R при $t = n \cdot 10$
Перший цикл					
Другий цикл					
...					
Усереднене U_R по циклах					
Значення струму для кожного t					

5.3. Дослідження інтегруючого кола

Електрична схема для дослідження інтегруючого $R\tilde{N}$ - кола представлена на рис. 5.7

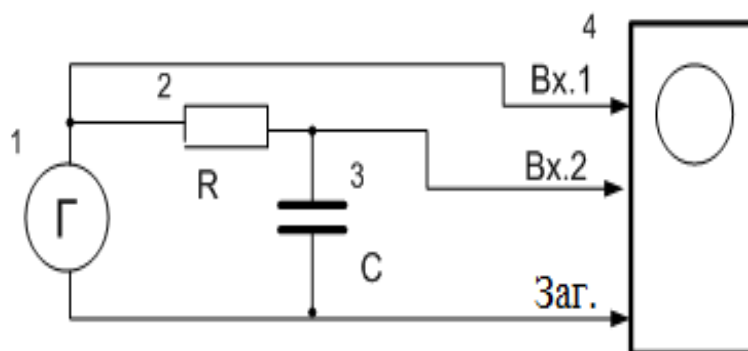


Рисунок 5.7 – Електрична схема для дослідження інтегруючого кола: 1 – генератор імпульсів; 2 – магазин опорів; 3 – магазин ємностей; 4 – осцилограф

а) задати період повторення імпульсів T сигналу генератора й

тривалість імпульсів τ_i такий щоб вийшла послідовність типу «меандр», тобто $T \approx 2\tau_i$ й амплітуду імпульсів (3 – 5) В. Вимірявши амплітуду й тимчасові параметри послідовності імпульсів на екрані осцилографа в сантиметрах, перевести їх у звичайні одиниці виміру цих величин (вольти, мікросекунди), скориставшись перехідними коефіцієнтами, зазначеними на перемикачах осцилографа.

б) розрахувати величини ємності C і опору R при якому постійна часу буде більше тривалості імпульсу $\tau > \tau_i$ та зібрати схему експерименту, наведену на рис. 5.7;

в) подати на вхід схеми сигнал від генератора імпульсів, отримати його стійке зображення на екрані осцилографа й замалювати епюри вхідних і вихідних імпульсів;

г) повторити пп. в) два рази, збільшивши й зменшивши постійну часу кола в 5 разів (шляхом збільшення й зменшення номіналів C і R).

5.4. Дослідження диференціюючого кола

Електрична схема для дослідження $R\tilde{N}$ - диференціюючого кола представлена на рис. 5.8.

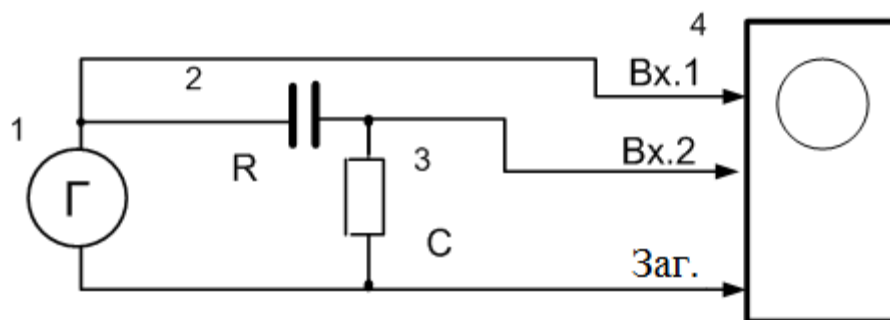


Рисунок 5.8 – Електрична схема для дослідження диференціюючого кола: 1 – генератор; 2 – магазин ємностей; 3 – магазин опорів; 4 – осцилограф

а) задати період повторення імпульсів T сигналу генератора й тривалість імпульсів τ_i такий, щоб вийшла послідовність типу «меандр», тобто $T \approx 2\tau_i$ й амплітуду імпульсів (3 – 5) В. Вимірявши амплітуду й часові параметри послідовності імпульсів на екрані осцилографа в сантиметрах, перевести їх у звичайні одиниці вимірювання цих величин (вольти, мікросекунди), скориставшись перехідними коефіцієнтами, зазначеними на перемикачах осцилографа;

б) розрахувати величини ємності C і опору R при якій постійна

часу буде значно менше тривалості імпульсу $\tau \ll \tau_i$ й зібрати схему експерименту, наведену на рис. 5.8;

в) подати на вхід схеми сигнал від генератора імпульсів, одержати його стійке зображення на екрані осцилографа й замалювати епюри вхідних і вихідних імпульсів;

г) повторити пп. в) два рази, збільшивши й зменшивши постійну часу кола в 10 разів (шляхом збільшення й зменшення номіналів C і R);

д) установити постійну часу кола рівну тривалості часу $\tau = \tau_i$, перетворивши в такий спосіб диференціююче коло, у перехідне й повторити пп. в).

Зміст звіту

1. Найменування звіту про лабораторну роботу.
2. Технічні дані електровимірювальних приладів й устаткування, необхідних для виконання даної лабораторної роботи.
3. Електричні схеми вимірів.
4. Таблиці з обмірюваними й обчисленими величинами.
5. Графіки зміни напруги на конденсаторі й струму в колах при заряді й розряді ємності (4 кривих).
6. Осцилограми вхідних і вихідних імпульсів інтегруючого, диференціюючого й перехідного кіл при різних значеннях їхніх постійних часу (7 осцилограм).
6. Висновки.

Відповісти усно на наступні питання

1. Що називається перехідним процесом в електричному колах?
2. Накреслите схеми основних типів RL – і $R\tilde{N}$ – кіл.
3. Чому дорівнює постійна часу для RL – і RC – кіл?
4. Яка розмірність постійної часу кола?
5. Як залежить форма сигналу від величини вхідних в RC - і RL - кола елементів?
6. Як залежить форма сигналу від схеми RC – і RL – кіл?
7. За яким законом зростає напруга на конденсаторі при його заряді?
8. За яким законом убиває напруга на конденсаторі при його розряді?
9. За яким законом змінюється струм у колі при заряді конденсатора?
10. За яким законом змінюється струм у колі при розряді конденсатора?

11. Чим відрізняється перехідне коло від інтегруючого?
12. Чим відрізняється перехідне коло від диференціюючого?

Лабораторна робота №6

«Вивчення енергетичних спектрів найпростіших сигналів»

Мета роботи. Розглянути й вивчити амплітудні спектри найпростіших сигналів – не модульованого гармонійного коливання, амплітудно-модульованого гармонійного коливання, послідовності відеоімпульсів.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи. В результаті вивчення теоретичного матеріалу студент повинен

знати:

- порядок розкладання періодичних функцій у ряд Фур'є;
- фізичний зміст амплітудного й фазового спектрів;
- вид спектрів найпростіших сигналів: гармонійного не модульованого й амплітудно-модульованого коливання, послідовності відеоімпульсів;
- правила безпеки при роботі в лабораторії;

вміти:

- збирати експериментальну установку;
- підготовляти до роботи генератор гармонійних коливань Г4-154 та генератор імпульсів Г5-15;
- підготовляти до роботи й проводити виміри за допомогою двопроменевого осцилографа С1-93 й аналізатора спектра СК4-59.

Пояснення. Перетворення Фур'є по системі тригонометричних функцій є основою гармонійного або *чисельного аналізу сигналів*. Такий аналіз дає можливість виявити розподіл енергії сигналу по частотах, що перебувають у складі сигналу [1, 2].

Періодичні сигнали в загальному виді можуть бути представлені наступною залежністю, тобто у вигляді суми *гармонійних функцій*:

$$S(t) = S(t + nT), \quad S(t) = A \cos(\omega t + \varphi),$$

де A – амплітуда, ω – колова частота, $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – період коливань.

Для того щоб таке розкладання існувало, фрагмент сигналу тривалістю в один період повинен задовольняти *умови Дирихле*:

– не повинно бути розривів другого роду (з гілками функцій, які йдуть у нескінченність);

– число розривів першого роду повинне бути кінцевим;

– число екстремумів повинне бути кінцевим (як приклад такої функції – $\sin\left(\frac{1}{x}\right)$ в районі нуля).

Існує кілька форм запису ряду Фур'є.

Синусно-косинусная форма.

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)),$$

де $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $k\omega$ – кратна частота, що називається *гармонікою*.

Коефіцієнти ряду a_0 , a_k і b_k розраховуються за формулами:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \cos(k\omega t) dt,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \sin(k\omega t) dt,$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) dt.$$

Якщо $S(t)$ – парна функція, $b_k = 0$, $S(t)$ – непарна – $a_k = 0$.

Речовинна форма.

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \phi_k).$$

Для парної функції $S(t)$ $\phi_k = 0$ й π , для непарної – $\pm \frac{\pi}{2}$.

Комплексна форма є найбільш уживаною. Її одержують із речовинного подання косинуса у вигляді напівсуми комплексних експонент (з формули Ейлера):

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x \rightarrow \cos x = \frac{1}{2}(e^{jx} + e^{-jx}).$$

Застосувавши дане перетворення до речовинної форми ряду Фур'є, отримаємо суми комплексних експонент із позитивними й негативними показниками. Експоненти зі знаком « $-$ » у показнику – члени ряду з негативними номерами; постійні доданки $-\frac{a_0}{2}$ – члени ряду з нульовими номерами. Отримуємо комплексну форму запису ряду Фур'є:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{-jk\omega t}.$$

Комплексні коефіцієнти ряду пов'язані з речовинними наступними показниками:

$$C_k = \frac{1}{2} A_k e^{j\phi_k}, \quad A_k = 2|C_k|, \quad \phi_k = \arg|C_k|.$$

Зв'язок із синусно-косинусною формою:

$$C_k = \frac{a_k}{2} - j \frac{b_k}{2}, \quad a_k = 2 \operatorname{Re}(C_k), \quad b_k = -2 \operatorname{Im}(C_k).$$

Розрахунок коефіцієнтів C_k ряду Фур'є в комплексній формі:

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \exp(-jk\omega_1 t) dt.$$

Якщо функція $S(t)$ – парна, то C_k – речові, якщо непарна – мніма.

Сукупність амплітуд гармонік ряду Фур'є називається *амплітудним спектром*, а сукупність їх фаз – *фазовим спектром*.

Якщо аналізований сигнал $S(t)$ є речовими, то його амплітудний і фазовий спектри мають *симетрію*:

$$A_{-k} = A_k, \quad \phi_{-k} = -\phi_k, \quad C_{-k} = C_k^*.$$

Розглянемо приклади розкладання в ряд Фур'є найпростіших сигналів:

а) монохроматичний гармонійний сигнал.

По визначенню, монохроматичний сигнал записується у вигляді

$$u(t) = U \cos(\omega t + \varphi),$$

де U , ω та φ – амплітуда, частота й початкова фаза несучого коливання, відповідно.

Таким чином, спектр даного сигналу містить одну єдину гармоніку на частоті ω , на якій сконцентрована вся енергія цього сигналу.

б) монохроматичний амплітудно-модульований гармонійний сигнал.

В якості модульованого коливання використаємо:

$$u_{\Omega}(t) = A \cos(\Omega t + \Psi),$$

де A , Ω та Ψ – амплітуда, частота й початкова фаза модулюючого коливання відповідно, причому завжди повинна виконуватися умова:

$$\omega \gg \Omega.$$

Прийнемо початкові фази несучого й модулюючого коливання, рівні нулю $\varphi = \Psi = 0$. Тоді шукане амплітудно-модульоване коливання запишемо як:

$$u(t) = [U + A \cos \Omega t] \cos \omega t,$$

де U та A – амплітуди несучого й модулюючого коливань, відповідно; ω і Ω – частоти несучого й модулюючого коливань, відповідно.

Виконавши множення й застосувавши формулу для добутку косинусів остаточно отримаємо:

$$u(t) = U \cos \omega t + (A/2) [\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t],$$

тобто сумарне коливання містить три гармоніки: основну на несучій частоті ω з амплітудою U і дві «бічних» на частотах $(\omega \pm \Omega)$ з амплітудою $A = U / m$, де $0 < m < 1$ називається індекс модуляції.

в) послідовність прямокутних імпульсів (рис. 6.1).

Даний сигнал є парною функцією й для його подання зручно використати синусно-косинусну форму ряду Фур'є:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} A \cos\left(\frac{2\pi k}{T} \cdot t\right) dt = \frac{2A}{\pi k} \sin\left(\frac{\pi k \tau}{T}\right).$$

Тривалість імпульсів і період їхнього проходження входять в отриману формулу у вигляді відносини, що називається *шпаруватістю послідовності імпульсів*: $q = \frac{T}{\tau}$.

$$a_k = \frac{2A}{\pi k} \sin\left(\frac{\pi k}{q}\right) = \frac{2A}{q} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi k}{q}\right)}{\frac{\pi k}{q}}.$$

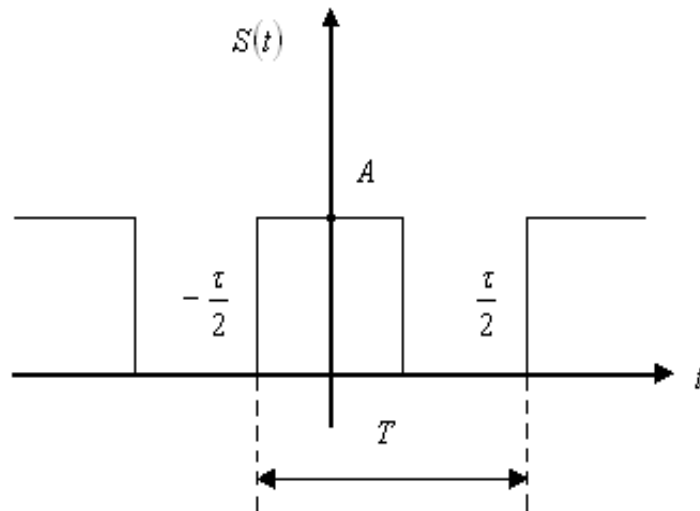


Рисунок 6.1 – Послідовність прямокутних імпульсів

Значення постійного доданку ряду, з урахуванням $\delta \rightarrow 0, \frac{\sin x}{x} \rightarrow 1$ відповідає:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{A}{q} = \frac{A\tau}{T}.$$

Саме подання послідовності прямокутних імпульсів у вигляді ряду Фур'є:

$$S(t) = \frac{A}{q} + \sum_{k=1}^n \frac{2A}{\pi k} \sin\left(\frac{\pi k}{q}\right) \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right).$$

Графік функції $\frac{\sin x}{x}$ носить пелюстковий характер (рис. 6.2). Горизонтальну вісь градуюють у номерах гармонік або в частотах.

Ширина пелюстків, вимірювальна в кількості гармонік дорівнює шпаруватості (при $k = nq$, маючи $\sin \frac{\pi k}{q} = 0$, якщо $n \neq 0$). Звідси можна зробити висновок, що важливою властивістю спектру послідовності прямокутних імпульсів – у ньому *відсутні гармоніки з номерами кратними шпаруватості*. Відстань по частоті між сусідніми гармоніками дорівнює частоті проходження імпульсів – $\frac{2\pi}{T}$. Ширина пелюстків, яка вимірюється в одиницях частоти дорівнює $\frac{2\pi}{\tau}$, тобто обернено пропорційна тривалості сигналу. Таким чином, можна зробити висновок: *чим коротше імпульс, тим ширше спектр*.

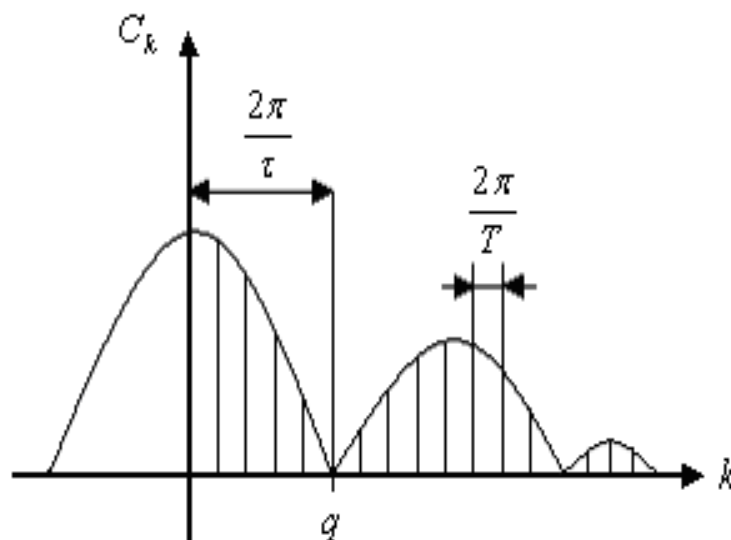


Рисунок 6.2 – Подання послідовності прямокутних імпульсів у вигляді ряду Фур'є

Устаткування й апаратура

Робота виконується на лабораторній установці яка складається з:

- генератора гармонійних коливань Г4-154;
- генератора імпульсів Г5-15;
- осцилографа 31-93;
- аналізатора спектра СК4-59.

Загальний вид установки представлений на фото (рис. 6.3), а структурна схема на рис. 6.4.

Порядок виконання роботи

1. Підготовка апаратури:

- зібрати лабораторну установку відповідно до схеми, наведеної на рис. 6.3, підключивши як джерело сигналу генератор гармонійних коливань Г4-154 (Положення 1 комутатора);



Рисунок 6.3 – Загальний вид лабораторної установи

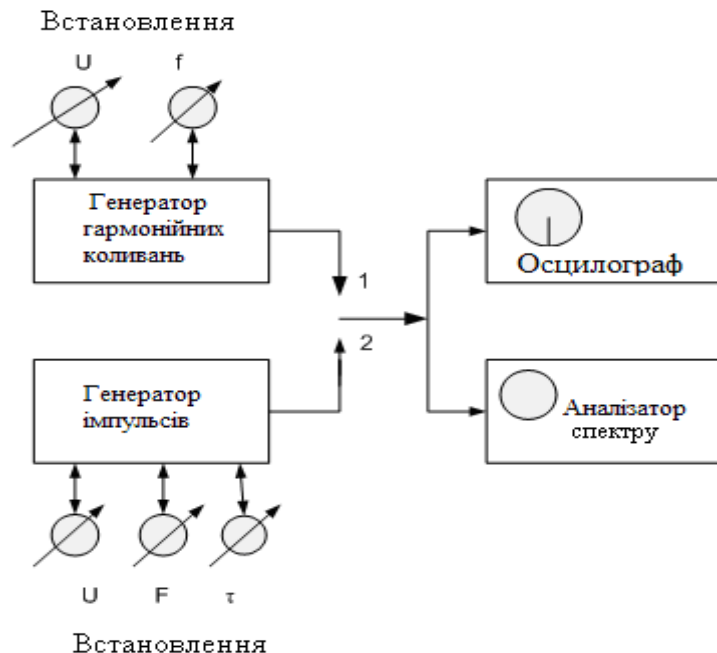


Рисунок 6.4 – Структурна схема лабораторної установи

- включити осцилограф, генератор й аналізатор спектра на прогрів (не менш 15 хвилин).

2. Отримання й дослідження спектра безперервного не модульованого гармонійного коливання:

- установити на генераторі Г4-154 частоту f й амплітуду U генеруючи коливання зазначені викладачем, режим генерації безперервний не модульований;

- за допомогою осцилографа отримати епюру досліджуваного гармонійного коливання, замалювати її й визначити основні параметри (амплітуду й частоту);

- виходячи з теоретичних положень визначити вид амплітудного спектру й розрахувати його параметри (кількість основних гармонік й їхньої частоти);

- маніпулюючи ручками управління аналізатора спектра СК4-59 отримати зображення спектра досліджуваного гармонійного коливання, визначити параметри (амплітуду, кількість гармонік й їхньої частоти) і замалювати його;

- змінюючи частоту генеруючих коливань f у межах $\pm 5 \%$

спостерігати як міняється спектр коливання;

- зробити висновки.

3. Отримання й дослідження спектра безперервного амплітудно-модульованого гармонійного коливання:

- установити на генераторі Г4-154 частоту f , амплітуду U і глибину модуляції генеруючих коливань зазначені викладачем, режим генерації безперервний амплітудно-модульований;

- за допомогою осцилографа отримати епюру досліджуваного гармонійного коливання, замалювати її й визначити основні параметри (амплітуду, частоту й глибину модуляції);

- виходячи з теоретичних положень визначити вид амплітудного спектра й розрахувати його параметри (кількість основних гармонік й їхньої частоти);

- маніпулюючи ручками управління аналізатора спектра отримати зображення спектра досліджуваного гармонійного коливання, визначити параметри (амплітуду, кількість гармонік й їхньої частоти) й замалювати його;

- змінюючи частоту генеруючих коливань f у межах $\pm 5 \%$

спостерігати як міняється спектр коливання;

- зробити висновки.

4. Отримання й дослідження спектра безперервної послідовності відеоімпульсів:

- подати сигнал від генератора імпульсів Г5-15 для чого перемкнути комутатор з положення 1 у положення 2;

- установити на генераторі імпульсів Г5-15 тривалість τ , частоту повторення f й амплітуду U генеруючих відеоімпульсів зазначені викладачем;

- за допомогою осцилографа отримати епюру досліджуваного імпульсного сигналу, замалювати її й визначити основні параметри (амплітуду, тривалість і період повторення імпульсів);

- виходячи з теоретичних положень визначити вид амплітудного спектра й розрахувати його параметри (кількість основних гармонік й їхньої частоти);

- маніпулюючи ручками управління аналізатора спектра отримати зображення спектра досліджуваної послідовності відеоімпульсів, визначити параметри (амплітуду, кількість гармонік і їхньої частоти) і замалювати його;

- змінюючи тривалість і частоту повторення генеруючих імпульсів спостерігати як міняється спектр коливання;

- зробити висновки.

Зміст звіту

1. Назва звіту, тема й мета лабораторної роботи.
2. Структурна схема лабораторної установки.
3. Розрахунки очікуваних параметрів спектрів досліджуваних сигналів.
4. Зарисовані осцилограми (3 види) і спектри (3 види) по кожному пункту роботи.
5. Висновки по роботі.

Відповісти усно на питання

1. Що таке енергетичний спектр й який його фізичний зміст?
2. Яку роль грає розкладання в ряд Фур'є при спектральному аналізі сигналу?
3. Що показують коефіцієнти ряду Фур'є?
4. Що таке гармоніка сигналу?
5. Скільки гармонік в амплітудному спектрі монохроматичного гармонійного не модульованого коливання?
6. Скільки гармонік в амплітудному спектрі монохроматичного гармонійного амплітудно-модульованого коливання?
7. Як називається функція що описує огибаючу амплітудного спектра послідовності відеоімпульсів?
8. Тривалість імпульсу 0,1 мкс, на якій частоті в амплітудному спектрі буде перший нуль?

9. Період повторення послідовності відеоімпульсів 10 мс, на якій відстані по частоті будуть відстояти гармоніки в амплітудному спектрі?

Перелік посилань

1. Лавріненко Ю.В. Теорія електрорадіоланцюгів: Конспект лекцій. – Одеса: Екологія, 2008. – 69 с.

2. Прокофьев В.Н. Электрические цепи. Учебное пособие. Л., изд. ЛГМИ, 1991. – 101 с.

Збірник методичних вказівок до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електрорадіокіл» для студентів 3 курсу навчання за напрямом підготовки «Гідрометеорологія».

Укладач: Лавріненко Ю.В., к.т.н., доц., Бучинська І.В., асист. ОДЕКУ, 2014 р., стр. 57.

Умовн. друк. арк.

Тираж

Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет
85016, Одеса, Львівська, 15