

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт

**з дисциплін: «Теорія електричних кіл», «Теорія електричних кіл та
сигналів», «Теорія електричних та електромагнітних кіл»,
«Електротехніка та електроніка»,
«Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка»
для студентів денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей**

ПОКРОВСЬК (КРАСНОАРМІЙСЬК) – 2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін: «Теорія електричних кіл», «Теорія електричних кіл та сигналів», «Теорія електричних та електромагнітних кіл», «Електротехніка та електроніка», «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» (для студентів денної та заочної форм навчання всіх спеціальностей) / [Укл. В.Ф. Сенько, І.С. Лактіонов, В.П. Тарасюк]. – Покровськ (Красноармійськ): ДонНТУ, 2016. – 44 с.

Методичні вказівки є лабораторним практикумом з дисциплін «Теорія електричних кіл», «Теорія електричних кіл та сигналів», «Теорія електричних та електромагнітних кіл», «Електротехніка та електроніка», «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», у них викладено необхідні положення при підготовці до лабораторних робіт, порядок виконання та завдання до лабораторних робіт, зміст звіту і контрольні запитання.

Укладачі: Сенько В.Ф. – доцент каф. електронної техніки, к.т.н., доцент.
Лактіонов І.С. – асистент каф. електронної техніки, к.т.н.
Тарасюк В.П. – доцент каф. електронної техніки, к.т.н., доцент.

Рецензент Федоров Є.Є. – зав. каф. комп'ютерних наук, д.т.н., доцент.

Відповідальний за випуск: Зорі А.А. – завідувач кафедри електронної техніки, д.т.н., професор.

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 11 від 14.06.2016 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електронної техніки,
протокол № 10 від 06.06.2016 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Лабораторна робота № 1. Дослідження лінійних електричних кіл постійного струму.....	6
2. Лабораторна робота № 2. Дослідження лінійних електричних кіл змінного струму.....	10
3. Лабораторна робота № 3. Дослідження резонансу напруг у колах змінного струму	14
4. Лабораторна робота № 4. Дослідження резонансу струмів у колах змінного струму	18
5. Лабораторна робота № 5. Дослідження фільтрів електричних сигналів	22
6. Лабораторна робота № 6. Дослідження лінійних електричних колах з несинусоїдальними напругами та струмами	26
7. Лабораторна робота № 7. Дослідження перехідних процесів у лінійних електричних колах першого порядку	30
8. Лабораторна робота № 8. Дослідження перехідних процесів у лінійних електричних колах другого порядку.....	36
9. Лабораторна робота № 9. Дослідження нелінійних колах змінного струму	40
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	44

ВСТУП

Лабораторні роботи з електротехніки виконуються на лабораторному стенді, що включає в себе комплект елементів для складання досліджуваних електричних кіл та складальне поле, за допомогою якого провідниками компонується потрібна схема. Виводи кожного елемента пронумеровані, та в подальшому ці номери використовуються на схемах, наведених у методичних вказівках до кожної лабораторної роботи.

При виконанні лабораторних робіт використовуються наступні електронні прилади. Для вимірювання напруг та струмів використовується цифровий електронний вольтметр В 7-22А, що дозволяє вимірювати напругу постійного й змінного струму, постійний струм і опір окремих елементів. Однак, для спрощення процесу вимірювання струмів при виконанні лабораторних робіт процес вимірювання струму в будь-якій гілці замінюється процесом вимірювання напруги на додатковому резисторі, що має опір 1 Ом, який включається послідовно в розрив гілки, в якій необхідно виміряти струм. Показання вольтметра чисельно дорівнюють величині струму в даній гілці в амперах. Це дозволяє спростити процес вимірювання струму й вимірювати не тільки постійний, але й змінний струм.

В якості джерела змінної напруги довільної частоти та спеціальної форми використовується генератор сигналів спеціальної форми ГЗ-127 (128), що забезпечує напругу амплітудою до 10 В на частотах до 1 МГц.

Для спостереження електричних процесів використовується двопроменевий електронний осцилограф С-1-90, що дозволяє одночасно спостерігати на екрані два процеси. За допомогою осцилографа також можна вимірювати фазові співвідношення в колах змінного струму.

З кожної виконаної роботи складається звіт, що включає в себе експериментальні результати й їх обробку при самостійній роботі студентів. Рекомендується при оформленні звіту дотримуватися такої послідовності оформлення. На титульному аркуші вказується дисципліна, тема лабораторної роботи й автор звіту. Далі вказується мета лабораторної роботи. Якщо в роботі досліджується кілька електричних схем, то для кожної схеми складається свій «мікрозвіт», що включає в себе:

- електричну схему;
- дані цієї схеми;
- результати вимірювань;

- обробку результатів вимірювань відповідно до методичних вказівок;
- теоретичну перевірку експериментальних результатів;
- оцінку похибки вимірювань.

Якщо похибка вимірювань не перевищує 10 %, то результати роботи вважаються достовірними, при похибці більше 20 % необхідно з'ясувати джерело похибки та провести додаткові вимірювати. У кінці звіту вказуються основні висновки по роботі.

Лабораторна робота № 1

Дослідження лінійних електричних кіл постійного струму

Мета роботи: експериментально перевірити: виконання законів Ома та Кірхгофа для кіл постійного струму; методи розрахунку розгалужених кіл постійного струму – метод накладення та метод двох вузлів.

Теоретичні відомості. У нерозгалужених колах постійного струму (див. рис. 1.1) струм у колі та падіння напруги на ділянках кола визначаються згідно із законом Ома:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_3};$$
$$U_{30} = I \cdot R_3 = \frac{E \cdot R_3}{R_1 + R_3};$$
$$U_{13} = I \cdot R_1 = \frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_3}.$$

Розгалужене коло з одним джерелом е.р.с. (див. рис. 1.2) шляхом послідовних перетворень приводиться до схеми рис. 1.1.

$$R_{30} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3};$$
$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_{30}}; \quad U_{30} = I_1 \cdot R_{30}; \quad I_2 = \frac{U_{30}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{30}}{R_3}.$$

При визначенні струмів, що розгалужуються в дві паралельні гілки, зручно використовувати формулу "розкиду":

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3};$$
$$I_3 = I_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

У розгалужених колах із декількома е.р.с. (див. рис. 1.3) за будь-яким замкнутим контуром повинен виконуватися другий закон Кірхгофа:

– для зовнішнього контуру:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 ;$$

– для внутрішніх контурів:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 ;$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 .$$

Метод накладання. Суть методу накладання ґрунтується на принципі суперпозиції, що полягає в тому, що струм у окремій гілці лінійного розгалуженого кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів у даній гілці, обумовлених дією кожної з е.р.с. окремо, причому інші джерела напруги закорочуються, а джерела струму розмикаються. Таким чином, метод накладання дозволяє замінити розрахунок складного розгалуженого кола з кількома е.р.с. відповідною кількістю розрахунків кіл з однієї е.р.с.

Метод двох вузлів. Дуже часто зустрічаються електричні кола, що складаються з декількох паралельно з'єднаних гілок, тобто містять два вузла. Різниця потенціалів між двома вузлами U_{30} визначається за формулою:

$$U_{30} = \frac{\sum E_i \cdot \frac{1}{R_i} + \sum I_i}{\sum \frac{1}{R_i}} = \frac{\sum E_i \cdot q_i + \sum I_i}{\sum q_i}.$$

де E_i , I_i беруться зі знаком "+", якщо вони спрямовані від вузла 0 до вузла 1, та зі знаком "-", якщо навпаки.

Струм в кожній гілці визначається за законом Ома для ділянки кола:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{30}}{R_1}.$$

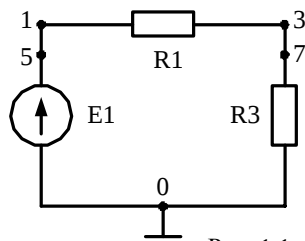


Рис. 1.1

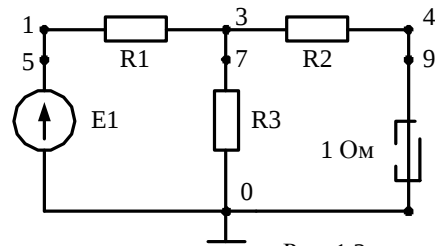


Рис. 1.2

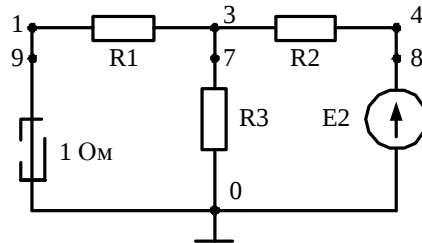


Рис. 1.3

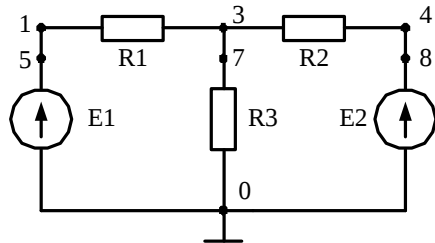


Рис. 1.4

Порядок виконання роботи:

1. Зібрати схему рис. 1.1. Виміряти струм у колі, е.р.с. джерела та падіння напруги на резисторах R_1 і R_3 .
2. Зібрати схему рис. 1.2. Виміряти струми в гілках схеми та падіння напруги на ділянках кола.
3. За схемою рис. 1.4 перевірити метод накладання. Для цього виключити спочатку зі схеми джерело E_2 та виміряти струми в гілках схеми (можна використовувати результати, отримані в п. 2). Потім зі схеми рис. 1.4 виключити джерело E_1 (схема рис. 1.3) та знову виміряти струми в гілках схеми. Для перевірки методу накладання виміряти струми в гілках схеми рис. 1.4, тобто при дії обох е.р.с.
4. У схемі рис. 1.4 виміряти напругу між двома вузлами схеми, а також падіння напруги на резисторах R_1 та R_2 .

Зміст звіту:

1. Для кожного експерименту в звіті надаються: схема, виміряні значення струмів та напруг, перевірка вимірюваних величин за формулами.
2. За результатами п. 1 перевіряється виконання закону Ома для ділянки кола та для повного кола; за результатами п. 2 – виконання законів Кірхгофа.
3. За результатами п. 3 перевіряється справедливність методу накладання шляхом порівняння алгебраїчної суми струмів у кожній гілці при дії кожної е.р.с. окремо з відповідними струмами для схеми з двома е.р.с. Для перевірки результатів, отриманих в п. 3, схема рис. 1.4 розраховується за методом накладання.

4. Необхідно також визначити струми в гілках схеми рис. 1.4, використовуючи значення напруги між двома вузлами, виміряне в п. 4.

5. Крім того, значення струмів у гілках схеми рис. 1.4 необхідно визначити, використовуючи метод контурних струмів.

Контрольні запитання: та завдання:

1. Як визначається струм у нерозгалуженому електричному колі?
2. Як визначається загальний опір при паралельному з'єднанні елементів кола?
3. У чому полягає сутність методу накладання?
4. Складіть систему рівнянь за методом контурних струмів для кола, який наведено на рис. 1.4.

Лабораторна робота № 2

Дослідження лінійних електричних кіл змінного струму

Мета роботи: експериментально перевірити виконання законів Ома та Кірхгофа для кіл змінного струму, визначити фазові співвідношення між напругою та струмами в схемі.

Теоретичні відомості. У колах змінного синусоїдального струму крім активних опорів (резисторів) використовуються реактивні елементи: конденсатори й індуктивності. Відповідно до закону Ома в диференціальній формі для активного опору R , індуктивності L та конденсатора C можна отримати вираз для струму та напруги на кожному виді елементів у колах змінного струму ($i = I_m \sin \omega t$):

– для активного опору R :

$$U_r = i \cdot R = I_m \cdot R \sin \omega t = U_m \cdot \sin \omega t ;$$

– для індуктивності L :

$$U_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d I_m \sin \omega t}{dt} = I_m \omega L \cos \omega t ;$$

– для конденсатора C :

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{C} \int_0^t I_m \sin \omega t dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t ,$$

або, якщо $U_C = U_m \sin \omega t$, то:

$$i_c = C \frac{d U_c}{dt} = C \frac{d U_m \sin \omega t}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t .$$

Звідси випливає, що в активному опорі струм та напруга співпадають за фазою, в індуктивності напруга випереджає струм на 90° , у конденсаторі напруга відстає від струму на 90° .

При послідовному з'єднанні R , L і C , коли через елементи кіл протікає один і той самий струм, падіння напруги на елементах кіл будуть орієнтовані

щодо струму відповідно до зазначеного вище, та тому другий закон Кірхгофа для кіл змінного струму розглядається у векторній формі. При паралельному з'єднанні R , L і C загальною величиною для всіх елементів є напруга, а струми в гілках будуть орієнтуватися щодо напруги, тому перший закон Кірхгофа також виконується у векторній формі.

У змішаних RC та RL колах струм та напруга зміщені один щодо одного на кут менше 90° :

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad \text{або} \quad \varphi = -\arctg \frac{1}{\omega CR}.$$

Для зручності визначення фазових співвідношень у електричних колах змінного струму використовують комплексний метод розрахунку кіл, в якому положення векторів напруги та струму представляється на комплексній площині. Для реалізації отриманих фазових співвідношень між напругою й струмом на елементах схеми опору останніх відображають у комплексній формі:

$$\dot{R} = R; \quad \dot{x}_L = j\omega L; \quad \dot{x}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}.$$

Множення величини на j рівносильне повороту вектора на $+90^\circ$, на $-j$ – на -90° .

При використанні виразів для опорів у комплексній формі для кіл змінного струму справедливі всі методи розрахунку кіл постійного струму. Відмінність полягає лише в тому, що розрахунки ведуться в комплексній формі, та кожен струм або напруга на ділянці кола виражається комплексним числом виду:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I \cdot e^{j\phi} = I \cos \phi + j I \sin \phi, \\ \dot{U} &= U \cdot e^{-j\varphi} = U \cos \varphi - j U \sin \varphi. \end{aligned}$$

Зазвичай при розрахунках кіл змінного струму одну величину (зазвичай напруга джерела живлення) направляють за дійсною віссю, тобто початкова фаза цієї величини приймається рівною нулю, а всі інші отримані в ході

розрахунку величини матимуть певні фази, тобто характеризуватися певним положенням вектора на комплексній площині. Для кожного кола змінного синусоїдального струму можна побудувати векторну діаграму, за якою можна судити за фазовими співвідношеннями між будь-якими співвідношеннями електричного кола.

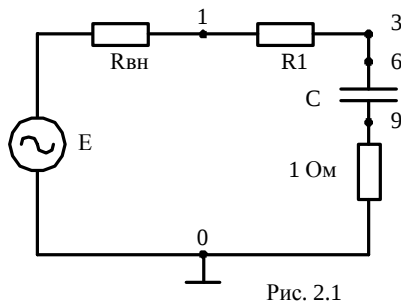


Рис. 2.1

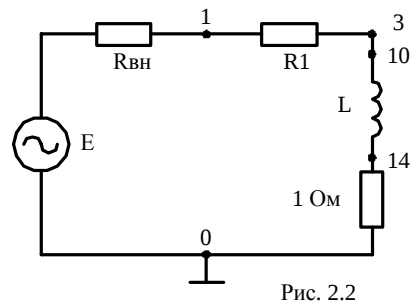


Рис. 2.2

Порядок виконання роботи:

1. Зібрати схему рис. 2.1. На вхід схеми від генератора синусоїдальної напруги подати напругу $U \approx 5$ В. Виміряти падіння напруги на ділянках кола, діюче значення струму на частотах 200, 500, 1000, 2000 та 5000 Гц. Дані занести в таблицю:

f , Гц	U_{10} , В	$U_{31} = U_R$, В	$U_{30} = U_C$, В	$U_{90} = I$, А	$U_{\text{розрах.}}$, В

2. За допомогою осцилографа виміряти фазовий зсув на частоті 1000 Гц.

3. Зібрати схему рис. 2.2. Повторити вимірювання, зазначені в п.1. Дані занести в таблицю:

f , Гц	U_{10} , В	$U_{31} = U_R$, В	$U_{30} = U_L$, В	$U_{140} = I$, А	$U_{\text{розрах.}}$, В

4. За допомогою осцилографа виміряти фазовий зсув на частоті 1000 Гц.

Зміст звіту:

1. Для схем рис. 2.1 та рис. 2.2 перевірити виконання другого закону Кірхгофа для кожного експерименту.

2. Для частоти $f=1000$ Гц побудувати векторні діаграми та перевірити отримані результати комплексним методом.

Контрольні запитання та завдання:

1. Як залежить опір індуктивності та конденсатора від частоти?
2. Які фазові співвідношення між напругою та струмом у колах змінного струму для активного опору, індуктивності та конденсатора?
3. У чому полягає сутність комплексного методу розрахунку кіл змінного струму?

Лабораторна робота № 3

Дослідження резонансу напруг у колах змінного струму

Мета роботи: дослідити резонансні явища при послідовному з'єднанні індуктивності та конденсатора; експериментально визначити резонансну частоту, добротність та смугу пропускання послідовного коливального контуру.

Теоретичні відомості. У колах змінного струму, що містять індуктивності й конденсатори, можливі випадки, коли струм у загальному колі збігається за фазою із вхідною напругою, тобто повний опір кола є активним за характером. У цьому випадку в схемі мають місце резонансні явища.

При послідовному з'єднанні R , L та C (див. рис. 3.1) загальний опір кола (у комплексній формі) дорівнює:

$$\omega = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

На частоті $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ опір мінімальний за величиною ($Z(\omega_0) = R$) та активний за характером. Струм у колі при цьому досягає максимального значення:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z(j\omega_0)} = \frac{\dot{U}}{R},$$

а падіння напруги на індуктивності та конденсаторі рівні за модулем і протилежні за фазою, причому за величиною вони можуть значно перевищувати вхідну напругу:

$$\begin{aligned}\dot{U}_L &= \dot{I} \cdot j\omega_0 L = \frac{\dot{U}}{R} \cdot j\omega_0 L = j\dot{U} \cdot \frac{\omega_0 L}{R}; \\ \dot{U}_C &= \dot{I} \cdot \frac{1}{j\omega_0 C} = \frac{\dot{U}}{R \cdot j\omega_0 C} = -j\dot{U} \cdot \frac{1}{\omega_0 CR}.\end{aligned}$$

Співвідношення $\frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = Q$ називають добротністю послідовного коливального контуру. Добротність показує, у скільки разів напруга на реактивному елементі перевищує вхідну напругу. Це явище називається резонансом напруг. При відхиленні частоти вхідної напруги від резонансної $\omega L \neq \frac{1}{\omega C}$, повний опір кола збільшується:

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

та струм у колі зменшується (рис. 3.2). Така залежність величини струму в колі при зміні частоти називається резонансною кривою. Крім резонансної частоти й значення струму на цій частоті резонансна крива характеризується пропускнуою здатністю. Смуга пропускання – це смуга частот, у межах якої величина струму в колі зменшується не більше ніж в 1,42 рази. Резонансна частота, смуга пропускання та добротність контуру пов'язані між собою співвідношенням:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Pi}.$$

У послідовному коливальному контурі внутрішній опір джерела включається послідовно з активним опором індуктивності та суттєво впливає на величину добротності. Значення добротності без урахування внутрішнього опору джерела називається конструктивної добротністю контуру:

$$Q_k = \frac{\omega_0 L}{R_k} = \frac{1}{\omega_0 C R_k}.$$

Збільшення активного опору кола призводить до зменшення добротності контуру, тому:

$$Q_{\text{еф}} = \frac{\omega_0 L}{R_{\text{вн}} + R_k} \leq Q_k.$$

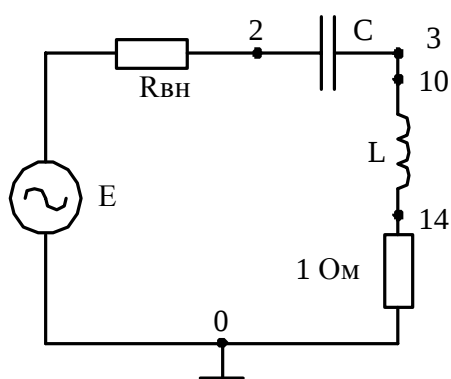


Рис. 3.1

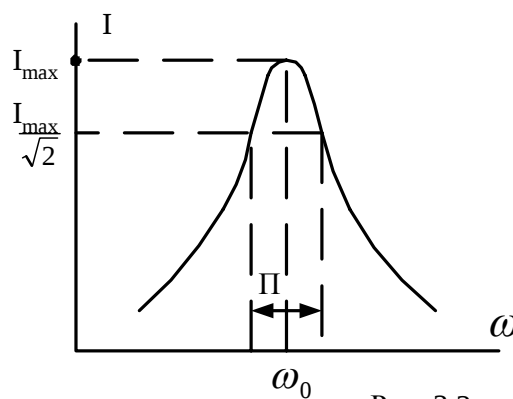


Рис. 3.2

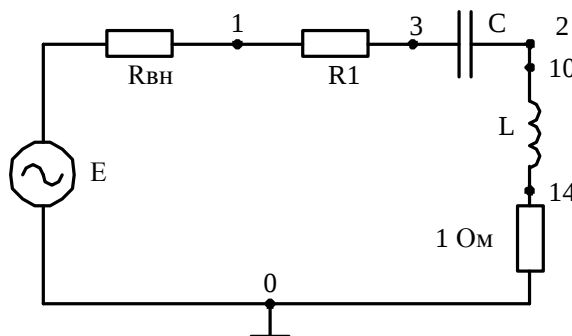


Рис. 3.3

Порядок виконання роботи:

1. За даними лабораторного макета розрахувати резонансну частоту послідовного коливального контуру. Встановити вихідну напругу генератора синусоїдальних сигналів на цій частоті 1 В у режимі холостого ходу.

2. Зібрати схему рис. 3.1. Змінюючи частоту вхідної напруги в межах від 200 Гц до 5 кГц (у районі резонансної частоти значення частоти генератора взяти з інтервалом 100 Гц – 3 значення до та 3 значення після резонансної частоти), заповнити таблицю.

f , Гц	$\lg f$	$U_{20}=U_K$	$U_{30}=U_L$	$U_{32}=U_C$	$U_{140}=I_K$	$Z_K=U_K/I_K$

3. Уточнити значення резонансної частоти за максимальним значенням струму в колі. Ці дані також занести в таблицю.

4. Зібрати схему рис 3.3. Повторити вимірювання, зазначені в п. 2. Дані занести в таблицю.

f , Гц	$\lg f$	$U_{30}=U_K$	$U_{20}=U_L$	$U_{23}=U_C$	$U_{140}=I_K$	$Z_K=U_K/I_K$

Зміст звіту:

1. За результатами вимірювань у п. 2 та п. 4 побудувати в одній системі координат залежності $U_L(f)$, $U_C(f)$, $U_K(f)$ та окремо – залежність $I_K(f)$.
2. За залежністю $I_K(f)$ визначити смугу пропускання та добротність контуру для обох схем.
3. Використовуючи результати вимірювань, розрахувати модуль повного опору послідовного контуру (без урахування внутрішнього опору джерела).
4. Перевірити теоретичним шляхом значення добротності та смуги пропускання контуру.

Контрольні запитання та завдання:

1. Що називається резонансом у колах змінного струму?
2. Як визначається резонансна частота при послідовному з'єднанні індуктивності та конденсатора?
3. Як змінюється струм у послідовному контурі при зміні частоти?
4. Що таке добротність контуру та яким чином вона визначається?

Лабораторна робота № 4

Дослідження резонансу струмів у колах змінного струму

Мета роботи: дослідити резонансні явища в паралельному коливальному контурі, експериментально визначити вплив внутрішнього опору джерела сигналів на параметри паралельного коливального контуру.

Теоретичні відомості. При аналізі паралельно з'єднаних гілок зручно використовувати провідність гілок, а не опір. При резонансі повна провідність кіл також носить активний характер, тобто на резонансній частоті уявна частина повної провідності дорівнює нулю.

У паралельному коливальному контурі (див. рис. 4.1) провідність гілки з конденсатором вважається чисто уявної, оскільки внаслідок великого опору витoku конденсатора перераховане значення послідовно включеного опору практично дорівнює нулю. Тому:

$$Y_C = j\omega C;$$
$$Y_L = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2}.$$

Резонансна частота знаходиться з умови:

$$\omega_o C - \frac{\omega_o L}{R^2 + (\omega_o L)^2} = 0,$$

звідки:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2}.$$

Опір паралельного коливального контуру на резонансній частоті максимальний та дорівнює:

$$Z(\omega_o) = \frac{1}{Y(\omega_o)} = \frac{R^2 + (\omega_o L)^2}{R}.$$

Загальний струм (струм джерела) на резонансній частоті мінімальний за величиною та активний за характером, а реактивні складові струмів у гілках рівні за величиною та протилежні за напрямком, причому за величиною ці струми перевищують загальний струм у $Q_K = \varpi_o L / R$ раз. Таким чином, добротність у паралельному коливальному контурі характеризується відношенням реактивного струму однієї гілки до повного струму.

З урахуванням виразу для добротності контуру вираз для резонансної частоти паралельного коливального контуру може бути записаний у вигляді:

$$\varpi_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}}.$$

Тому при добротності контуру більше десяти другим доданком у підкореневому виразі можна знехтувати та резонансну частоту визначати за формулою:

$$\varpi_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

На практиці зазвичай використовується напруга на паралельному контурі. З урахуванням внутрішнього опору джерела згідно схеми рис. 4.2 ця напруга дорівнює:

$$U_{10}(j\varpi) = \frac{E \cdot Z_K(j\varpi)}{R_{BH} + Z_K(j\varpi)}.$$

Залежність модуля напруги U_{10} від частоти називається амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) та має вигляд резонансної кривої, яка характеризується еквівалентної добротністю та пропускною здатністю. Ці параметри залежать від співвідношення величин опорів R_{BH} та $Z_K(j\omega)$. При $R_{BH}=0$ $U_{10}(j\omega)=E$, тобто АЧХ проходить паралельно осі частот ($Q=0$), при великих значеннях R_{BH} АЧХ за формою повторює залежність $Z_K(j\omega)$, тобто $Q=Q_K$. При проміжних значеннях R_{BH} добротність резонансної кривої $Q_{екв}$ змінюється в межах від нуля до Q_K , тому в реальних схемах еквівалентна добротність завжди менше конструктивної. Аналогічно на добротність впливає будь-який активний

опір, включений паралельно коливальному контуру.

Зменшення добротності контуру викликається збільшенням активного опору контуру, тобто шунтування контуру активним опором призводить до внесення в контур додаткового активного опору. Величина внесеного опору розраховується за формулою:

$$R_{BHEC} = \frac{L}{R_{III}C};$$

$$R_{EKB} = R_K + R_{BHEC};$$

$$Q_{EKB} = \frac{\varpi_o L}{R_{EKB}}.$$

Тому реальна добротність та смуга пропускання в практичних схемах завжди будуть відрізнятися від конструктивних параметрів контуру, що необхідно враховувати при виборі параметрів схеми.

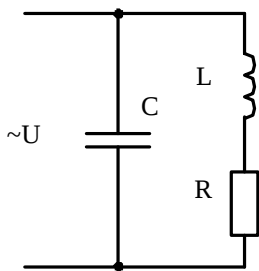


Рис. 4.1

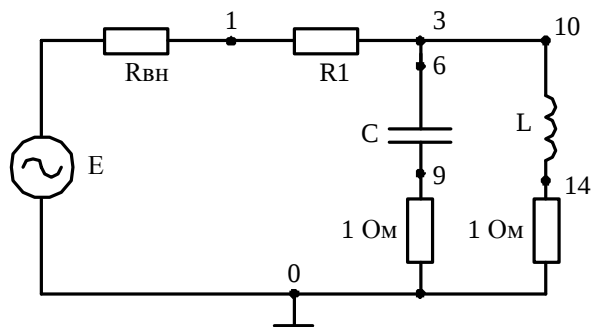


Рис. 4.2

Порядок виконання роботи.

1. За даними лабораторного макета розрахувати резонансну частоту паралельного коливального контуру. Встановити на цій частоті вихідну напругу генератора синусоїдальних сигналів $E=5$ В, $R_{вн}=600$ Ом.

2. Зібрати схему рис. 4.2. Змінюючи частоту напруги в діапазоні від 200 Гц до 5 кГц (у районі резонансної частоти значення частоти встановлювати через 100 Гц), заповнити таблицю (останні дві колонки таблиці заповнюються при обробці результатів вимірювань).

f , Гц	$F \lg f$	$U_{30}=U_K$	U_{31}	$U_{90}=I_C$	$U_{140}=I_L$	$I=U_{31}/R_1$	$Z_K = U_{30}/I$

3. За мінімального значення напруги U_{31} уточнити значення резонансної частоти, дані занести в таблицю.

4. Встановити внутрішній опір генератора $R_{гн}=50$ Ом та повторити вимірювання згідно п. 2. Дані занести в таблицю.

$f, \text{Гц}$	$\lg f$	$U_{30}=U_K$	U_{31}	$U_{90}=I_C$	$U_{140}=I_L$	$I=U_{31}/R_1$	$Z_K = U_{30}/I$

Зміст звіту:

1. Для кожного експерименту розрахувати значення струму джерела та модуль опору контуру на всіх частотах.

2. Побудувати залежності $U_{30}(f)$ та $Z_K(f)$ та за ними визначити еквівалентну й конструктивну добротності контуру й відповідні смуги пропускання.

3. Перевірити значення еквівалентної та конструктивної добротності контуру розрахунковим шляхом за даними лабораторного макета.

Контрольні запитання та завдання:

1. Як визначається загальний струм при паралельному з'єднанні індуктивності й конденсатора?

2. Визначення резонансної частоти паралельного коливального контуру?

3. Як визначається добротність паралельного коливального контуру?

4. Вплив внутрішнього опору джерела на еквівалентну добротність?

Лабораторна робота № 5

Дослідження фільтрів електричних сигналів

Мета роботи: зняти амплітудно-частотні характеристики фільтрів електричних сигналів, експериментально визначити основні параметри фільтрів, скласти вирази для коефіцієнта передачі фільтра за логарифмічними амплітудно-частотних характеристиках.

Теоретичні відомості. Фільтри – це чотиріполюсники, які пропускають електричні сигнали в певній смузі частот та не пропускають за її межами. Залежно від цього фільтри діляться на:

- фільтри нижніх частот – пропускають сигнали в діапазоні частот від 0 до $\omega_{зр}$;
- фільтри верхніх частот – пропускають сигнали в діапазоні частот від $\omega_{зр}$ до нескінченності;
- смугові фільтри – пропускають сигнали в діапазоні частот від $\omega_{зр1}$ до $\omega_{зр2}$;
- загороджувальні фільтри – пропускають сигнали у всьому діапазоні частот, крім смуги від $\omega_{зр1}$ до $\omega_{зр2}$.

Основною характеристикою фільтра є амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – залежність модуля коефіцієнта передачі фільтра від частоти. АЧХ ідеальних фільтрів мають прямокутну форму (див. рис. 5.1,а–г), у реальних фільтрів бічні скати АЧХ мають певний нахил. У смузі пропускання коефіцієнт передачі фільтра постійний, частота зрізу визначається на рівні 0,707 від рівня сигналу в смузі пропускання.

АЧХ фільтрів зручно використовувати в логарифмічній системі координат, де за віссю абсцис відкладається десятковий логарифм частоти, а за віссю ординат – $20\lg K(\omega)$. Така залежність називається логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою (ЛАЧХ). Її особливістю є те, що вона може бути апроксимована відрізками прямих, що проходять з нахилом 0, ± 20 дБ/дек, ± 40 дБ/дек. Перетин відрізків ЛАЧХ визначає частоту зрізу, що є границею між смугою пропускання й смугою загасання фільтра.

За ступенем зміни нахилу гілок ЛАЧХ на частоті зрізу фільтри діляться на:

- фільтри першого порядку, якщо нахил змінюється на 20 дБ/дек;
- фільтри другого порядку, якщо нахил змінюється на 40 дБ/дек;

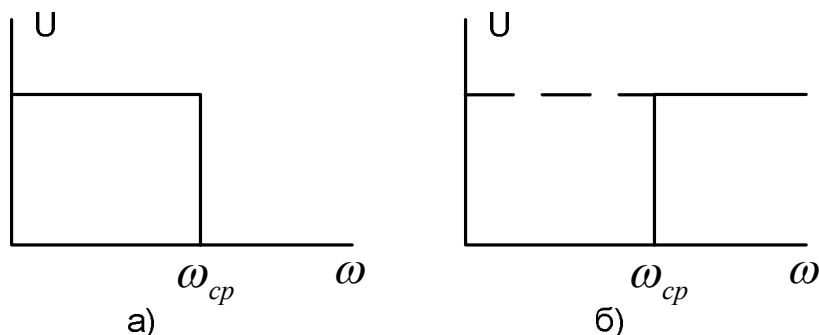
– фільтри більш високих порядків, якщо нахил змінюється на 60 дБ/дек, 80 дБ/дек.

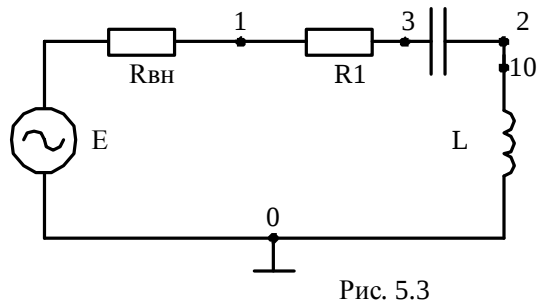
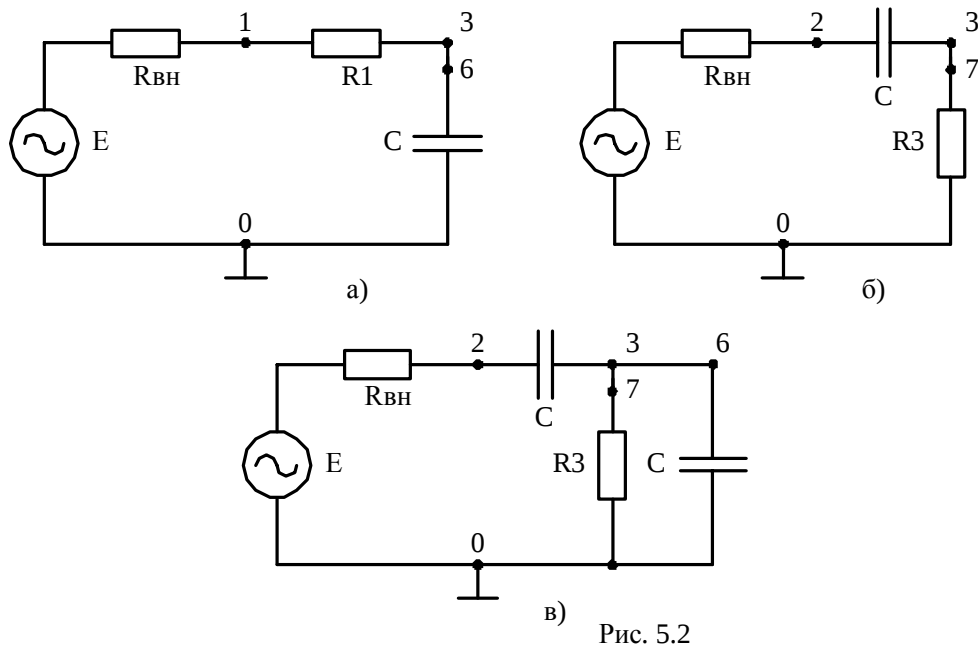
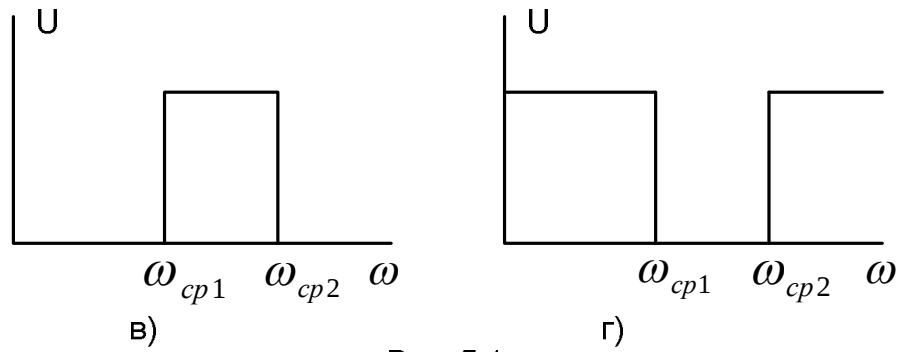
Вираз для коефіцієнта передачі фільтра можна отримати на підставі законів Ома й Кірхгофа, як для звичайного електричного кола. Його ж можна отримати й за експериментально знятою АЧХ. Для цього АЧХ будують у логарифмічній системі координат, потім отриману ЛАЧХ апроксимують відрізками прямих з нахилом 0, 20 дБ/дек, 40 дБ/дек. Точки перетину відрізків визначають частоти зрізу.

Вираз для коефіцієнта передачі складається в такій послідовності. ЛАЧХ розглядається на ділянках частот, починаючи з нуля. Якщо перша ділянка ЛАЧХ проходить горизонтально, тобто паралельно осі частот, то в чисельник виразу $K(j\omega)$ записується постійна величина, яка визначається з умови: $20\lg K(\omega)=A$, де A – значення коефіцієнта передачі в смузі пропускання в децибелах. Якщо перша ділянка ЛАЧХ проходить з нахилом $+n \cdot 20$ дБ/дек ($n=1, 2$), то в чисельник виразу $K(j\omega)$ записується співмножник $\left(j\omega/\omega_0\right)^n$, де ω_0 – точка перетину першої ділянки ЛАЧХ (або його продовження) з віссю частот. Якщо нахил другої ділянки ЛАЧХ змінюється на -20 дБ/дек, то в знаменник виразу $K(j\omega)$ записується співмножник виду $\left(j\omega/\omega_{cp}+1\right)$. При зміні нахилу другої ділянки на -40 дБ/дек у знаменник $K(j\omega)$ записується співмножник у вигляді полінома другого ступеня:

$$\left(j\omega/\omega_{cp}\right)^2 + 2\xi j\omega/\omega_{cp} + 1,$$

де ξ – коефіцієнт, що визначається за нормованими кривими в залежності від величини відхилення реальної ЛАЧХ від апроксимованої на частоті зрізу.





Порядок виконання роботи:

1. Встановити вихідну напругу генератора синусоїдальних сигналів у режимі холостого ходу 5 В на частоті 1000 Гц.
2. Для кожної схеми фільтра – фільтри нижніх частот першого порядку (рис. 5.2,а), фільтри верхніх частот першого порядку (рис. 5.2,б) та смугового фільтра другого порядку (рис. 5.2, в) зняти АЧХ у діапазоні частот від 50 Гц до 50 кГц . Дані для кожного фільтра занести в окрему таблицю.

$f, \text{Гц}$	$\lg f$	$U_{\text{вих}}$	K	$20\lg K$

3. Зібрати схему рис. 5.3. Рахуючи по черзі вихідною напругою напругу на індуктивності та на конденсаторі, зняти АЧХ фільтри нижніх та верхніх частот другого порядку. Дані занести в таблицю.

$f, \text{Гц}$	$\lg f$	U_L	K_1	$20 \lg K_1$	U_C	K_2	$20\lg K_2$

Зміст звіту:

1. Для кожної схеми фільтра необхідно за результатами вимірювань побудувати ЛАЧХ та апроксимувати її відрізками прямих з нахилом 20 дБ/дек, 40 дБ/дек.
2. Скласти за ЛАЧХ вираз для коефіцієнта передачі фільтра.
3. Для схем рис. 5.2,б отримані вирази $K(j\omega)$ порівняти з розрахунковими.

Контрольні запитання та завдання:

1. Що таке смуга пропускання фільтра та як вона визначається за АЧХ фільтра?
2. В яких координатах будуються логарифмічні АЧХ?

Лабораторна робота № 6
Дослідження лінійних електричних кіл з несинусоїдальними
напругами та струмами

Мета роботи: експериментально перевірити методику розрахунку електричних кіл при дії в схемі несинусоїдної е.р.с., перевірити вплив параметрів електричного кола на форму напруг на ділянках кіл.

Теоретичні відомості. Несинусоїдальну періодичну е.р.с. відповідно до теореми Фур'є можна представити рядом, що включає в себе постійну складову та гармонійні складові з частотами, кратними основній частоті ω :

$$U(t) = U_0 + U_{1M}^{(1)} \sin \omega t + U_{1M}^{(2)} \sin 2\omega t + \dots + U_{1M}^{(n)} \sin n\omega t + U_{2M}^{(1)} \cos \omega t + \\ + U_{2M}^{(2)} \cos 2\omega t + \dots + U_{2M}^{(n)} \cos n\omega t.$$

Амплітуда гармонійних складових визначається за формулами:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(\alpha t) d\alpha t;$$
$$U_{1M}^{(n)} = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(\alpha t) \cos n\alpha t d\alpha t;$$
$$U_{2M}^{(n)} = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(\alpha t) \cos n\alpha t d\alpha t.$$

Дві гармонійні складові однієї частоти можна замінити однією, має іншу амплітуду і початкову фазу:

$$U_{1M}^{(n)} \sin n\omega t + U_{2M}^{(n)} \cos n\omega t = U_M^{(n)} \sin(n\omega t + \phi_n),$$

де

$$U_M^{(n)} = \sqrt{(U_{1M}^{(n)})^2 + (U_{2M}^{(n)})^2};$$
$$\phi_n = \arctg \frac{U_{2M}^{(n)}}{U_{1M}^{(n)}},$$

тому можливий такий запис ряду Фур'є:

$$U(t)=U_0+U_M^{(1)}\sin(\omega t+\varphi_1)+U_M^{(2)}\sin(2\omega t+\varphi_2)+\dots+U_M^{(n)}\sin(n\omega t+\varphi_n).$$

Відповідно до отриманого виразу ряду Фур'є несинусоїдальну е.р.с. можна представити сумою, тобто послідовним з'єднанням постійної е.р.с. U_0 та синусоїдальних е.р.с.

Тому розрахунок кіл при дії несинусоїдної е.р.с. ведеться за методом накладання, тобто розраховуються струми в схемі від дії кожної складової окремо, а кінцевий результат записується як сума складових, отриманих на кожному етапі розрахунку, з урахуванням своєї амплітуди та фази.

Залежно від форми напруги, розташування напівхвиль щодо осі часу та початку координат при розкладанні в ряд Фур'є можуть бути відсутніми постійна складова, парні гармоніки, косинусні або синусні складові.

При розрахунку необхідно враховувати залежність величини реактивного опору індуктивностей та конденсаторів від частоти:

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Внаслідок різних значень опорів індуктивностей та конденсаторів для кожної гармоніки амплітуди й фазові співвідношення між напругою та струмами на ділянках кіл матимуть свої значення. Так, як при складанні двох гармонійних складових результуюча форма напруги залежить і від амплітуд, і від зсуву за фазою між гармонійними складовими, то форма напруги на окремих елементах схеми буде різною та не збігатиметься з формою е.р.с. несинусоїдальної напруги.

Діючі значення напруг та струмів у колах з несинусоїдальною е.р.с. визначається за формулами:

$$U = \sqrt{U_0^2 + (U^{(1)})^2 + (U^{(2)})^2 + \dots + (U^{(n)})^2},$$
$$I = \sqrt{I_0^2 + (I^{(1)})^2 + (I^{(2)})^2 + \dots + (I^{(n)})^2}.$$

Потужність у колі з несинусоїдальною е.р.с. визначається як сума

потужностей за кожною гармонікою окремо:

$$P = U_0 I_0 + U^{(1)} I^{(1)} \cos \varphi_1 + U^{(2)} I^{(2)} \cos \varphi_2 + \dots$$

$$Q = U^{(1)} I^{(1)} \sin \varphi_1 + U^{(2)} I^{(2)} \sin \varphi_2 + \dots$$

$$S = UI.$$

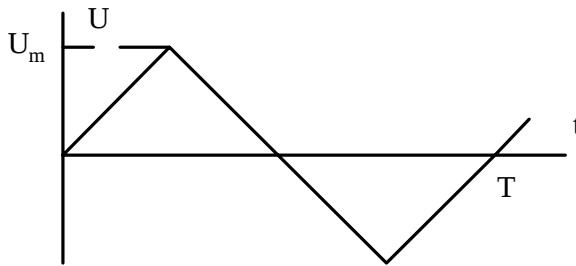


Рис. 6.1

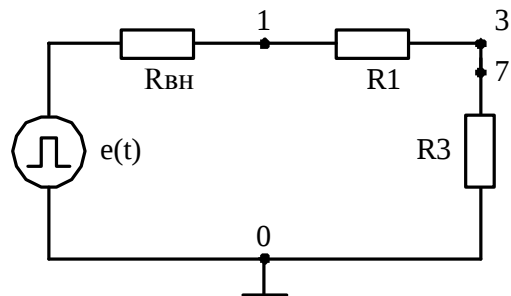


Рис. 6.2

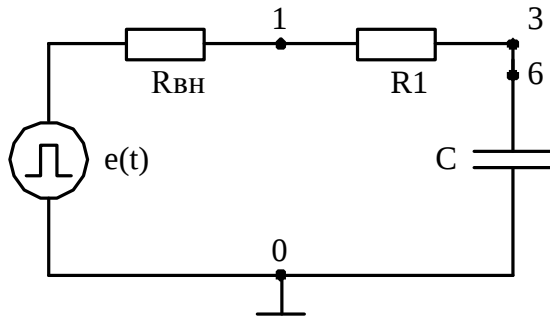


Рис. 6.3

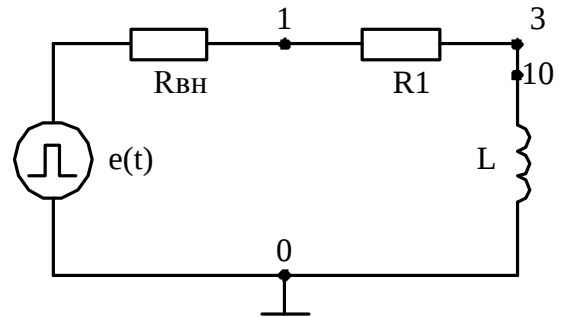


Рис. 6.4

Порядок виконання роботи:

1. Для використовуваної в роботі напруги трикутної форми (рис. 6.1) визначити амплітуди гармонійних складових при $U_m = 5$ В.

$$U(t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t \right)$$

2. Зібрати схему рис. 6.2. Подати на вхід схеми напругу трикутної форми частотою 1,5 кГц; зняти осцилограми напруг на ділянках електричного кола, виміряти діючі значення напруг на елементах схеми.

3. Зібрати схему рис. 6.3. При тих же параметрах вхідної напруги зняти осцилограми напруг та виміряти діючі значення напруг на активному опорі й конденсаторі.

4. Встановити на виході генератора синусоїдальну напругу. Для кожної гармоніки (1,5 кГц, 4,5 кГц та 7,5 кГц) встановити амплітуду, відповідну

амплітуді при розкладанні в ряд Фур'є, та виміряти напруги на ділянках кола. Дані занести в таблицю.

	$U_{30}=U_C$	$U_{31}=U_R$	$U_{90}=I$
1,5 кГц			
4,5 кГц			
7,5 кГц			

5. Зібрати схему рис. 6.4. Подати на вхід схеми трикутну напругу частотою 500 Гц та амплітудою $U_m=5$ В, зняти осцилограми напруг та виміряти діючі значення напруг на активному опорі й індуктивності.

6. Подати на вхід схеми синусоїдальну напругу. Для кожної гармоніки (0,5 кГц, 1,5 кГц, 2,5 кГц) встановити амплітуду, відповідну амплітуді при розкладанні в ряд Фур'є, та виміряти напруги на ділянках кола. Дані занести в таблицю.

	$U_{30}=U_L$	$U_{31}=U_R$	$U_{140}=I$
0,5 кГц			
1,5 кГц			
2,5 кГц			

Зміст звіту:

1. Для кожної досліджуваної схеми (рис. 6.2–6.4) в звіті надати осцилограми напруг на елементах схеми при дії на вході несинусоїдальної (трикутна форма) напруги та перевірку виконання другого закону Кірхгофа для кіл з несинусоїдальними струмами.

2. Результати вимірювань, отримані в п. 4 та п. 6 порівняти з раніше розрахованими напругами на конденсаторі й індуктивності. На підставі цих вимірювань пояснити відмінність форм напруг на ділянках кола.

Контрольні питання:

1. Сформулюйте теорему Фур'є для періодичної несинусоїдної функції.
2. Як визначаються гармонійні складові несинусоїдальної напруги?
3. Чому в одному й тому самому електричному колі напруги та струми мають різну форму?

Лабораторна робота № 7
Дослідження перехідних процесів у лінійних електричних колах
першого порядку

Мета роботи: дослідити характер перехідних процесів у колах, що описуються диференціальними рівняннями першого порядку: за осцилограмами напруг на елементах схеми визначити постійні часу досліджуваних електричних кіл.

Теоретичні відомості. Відповідно до закону Ома в диференціальній формі струм через конденсатор дорівнює:

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt},$$

якщо $U_C = \text{const}$, то $i_C = 0$, тобто в колах постійного струму конденсатор має нескінченно великий опір. Аналогічно напруга на індуктивності дорівнює:

$$U_L = L \frac{di_L}{dt},$$

якщо $i_L = \text{const}$, то $U_L = 0$, тобто в колах постійного струму індуктивність є коротким замиканням.

Конденсатор та індуктивність у колах постійного струму запасують енергію: конденсатор – $E_C = \frac{CU_C^2}{2}$ електростатичну, а індуктивність – $E_L = \frac{LI^2}{2}$ електромагнітну. Процес накопичення енергії не може відбуватися миттєво, тому при включенні/виключенні або зміні параметрів кіл відбувається зміна енергії, а тому струм конденсатора та напруга на індуктивності не рівні нулю, а змінюються за цілком певним законом до тих пір, поки не буде запасена відповідна енергія. Процеси, пов'язані зі зміною енергії в конденсаторах та індуктивностях, називаються перехідними процесами й мають місце при будь-якій комутації кола.

Із виразів для i_C та U_L слідує, що напруга на конденсаторі та струм в індуктивності не можуть змінюватися стрибком (закони комутації), тобто значення цих величин до комутації рівні значенням після комутації. Значення напруг та струмів у колі до комутації називають початковими умовами. Для

того, щоб отримати закон зміни струму або напруги на будь-якій ділянці кола під час перехідних процесів, необхідно скласти рівняння за законом Ома та Кірхгофа в диференційній формі та вирішити отримані диференційні рівняння. Конкретне рішення диференційного рівняння, тобто рішення рівняння з правою частиною, дає сталі або вимушені значення напруг та струмів у колі, тобто значення напруг і струмів після закінчення перехідних процесів. Загальне рішення диференційного рівняння (з нульовою правою частиною) дає вільні складові напруг та струмів у колі, що характеризують перехідний процес у колі. Повні значення напруг та струмів у колі знаходяться, як сума вимушеної та вільної складових:

$$i_{\Pi}(t) = i_{\Pi P}(t) + i_{CB}(t),$$

$$u_{\Pi}(t) = U_{\Pi P}(t) + u_{CB}(t).$$

Закон зміни вільних складових у часі однаковий для всіх напруг та струмів цього кола. Для схеми рис. 7.1,а можна скласти рівняння за законами Ома й Кірхгофа:

$$i \cdot R + \frac{1}{C} \int i dt = E$$

Після диференціювання отримаємо:

$$R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0.$$

Так, як права частина отриманого рівняння дорівнює нулю, то вимушене значення струму в колі дорівнює нулю: $I_{вум} = 0$.

Для знаходження загального рішення диференційного рівняння запишемо типові рівняння та знайдемо його корені:

$$p \cdot R + \frac{1}{C} = 0;$$

$$p = -\frac{1}{RC}; \quad \tau = -\frac{1}{p} = RC.$$

Для рівнянь першого порядку рішення знаходиться у вигляді:

$$i_{BII}(t) = Ae^{pt} = Ae^{\frac{t}{\tau}},$$

де A – постійна інтегрування, знаходиться виходячи з початкових умов. Якщо $U_C(0)=0$, то при включенні схеми $i_{II}(0) = \frac{E - U_C(0)}{R} = \frac{E}{R}$, з іншого боку:

$$i_n(t) = i_{вум} + i_{вил}(t) = 0 + Ae^{\frac{t}{\tau}};$$

$$i_n(0) = A; \quad A = \frac{E}{R}.$$

Отже:

$$i_n(t) = i_{вил}(t) = \frac{E}{R} e^{\frac{t}{\tau}};$$

$$u_{II}(t) = i_{II}(t) \cdot R = E \cdot e^{\frac{t}{\tau}};$$

$$u_C(t) = E - u_R(t) = E - E e^{\frac{t}{\tau}} = E(1 - e^{\frac{t}{\tau}}).$$

Аналогічно для схеми рис. 7.1,б отримуємо:

$$i \cdot R + L \frac{di}{dt} = E.$$

Для знаходження вимушеної складової струму вважаємо, $\frac{di}{dt} = 0$, та:

$$i_{BIM} \cdot R = E;$$

$$i_{BIM} = \frac{E}{R}.$$

Характеристичне рівняння кола та його корінь:

$$R + pL = 0;$$

$$p = -\frac{R}{L}; \quad \tau = -\frac{1}{p} = \frac{L}{R}.$$

$$i_{BIM}(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$i_{II}(0) = 0; \quad i_{II}(t) = i_{BIM} + i_{BUI}(t) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$i(0) = \frac{E}{R} + A; \Rightarrow A = -\frac{E}{R};$$

Отже:

$$i_{II}(t) = \frac{E}{R} - \frac{E}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}});$$

$$u_R(t) = i_{II}(t) \cdot R = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}});$$

$$U_L(t) = E - u_R(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

У колах, що описуються диференційними рівняннями першого порядку, напруги та струми в колі описуються експонентами виду $e^{-\frac{t}{\tau}}$ або $(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$. Побудову таких функцій зручно проводити в масштабі часу, кратному τ (див. рис. 7.2).

t	$e^{-\frac{t}{\tau}}$	$1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$
0	1	0
τ	0,37	0,63
2τ	0,135	0,865
3τ	0,05	0,95
4τ	0,018	0,982
5τ	0,007	0,993

Через деякий час $t=5\tau$ вільна складова зменшується до величини менше 1 % від початкового значення. Тому прийнято вважати, що перехідний процес в колі триває не більше 5τ .

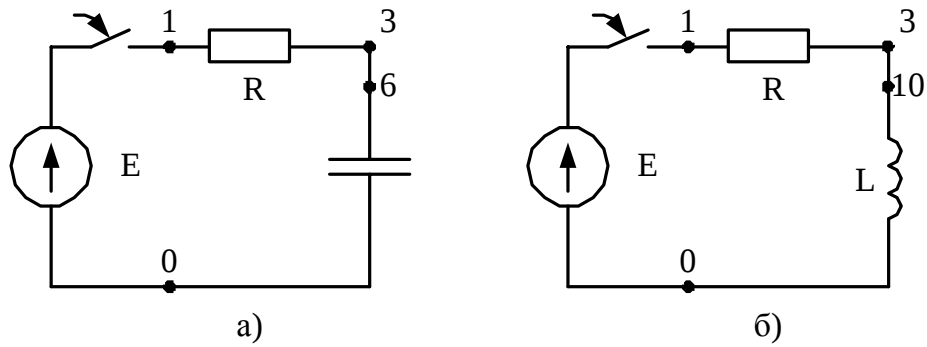


Рис. 7.1

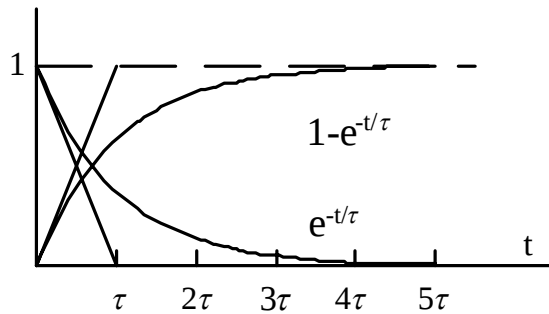


Рис. 7.2

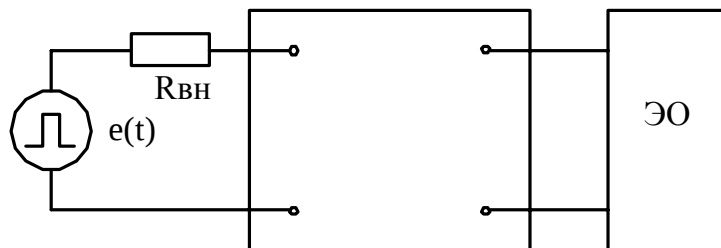


Рис. 7.3

Порядок виконання роботи:

1. Для виконання роботи в якості джерела вхідної напруги використовується напруга прямокутної форми (можна використовувати напругу як різнополярну, так і однополярну). Тривалість позитивного імпульсу (половини періоду) напруги повинна бути такою, щоб за цей час перехідні процеси в досліджуваному колі закінчилися, тобто $\frac{T_{MIN}}{2} \geq 5\tau$. Дослідження перехідних процесів проводиться за схемою рис. 7.3, де в якості досліджуваних схем використовуються схеми представлені на рис. 7.1а, б. При розрахунках необхідно враховувати внутрішній опір джерела прямокутних імпульсів.

2. Для схеми рис. 7.1 визначити мінімальну тривалість половини періоду вхідної напруги та встановити відповідну частоту коливань на генераторі. За

осцилограмами напруги генератора встановити амплітуду напруги в режимі холостого ходу $E=5\text{ В}$.

3. Включити схему рис. 7.1,а до схеми рис. 7.3 та зняти осцилограми напруг на конденсаторі й активному опорі.

4. Визначити частоту коливань генератора для дослідження схеми рис. 7.1,б, включити схему рис. 7.1,б до схеми рис.7.3 та зняти осцилограми напруг на індуктивності й активному опорі.

Зміст звіту:

1. Для кожного експерименту в звіті необхідно представити: схеми досліджень та осцилограми вхідної напруги (у режимі холостого ходу) та напруг на елементах схеми, які побудовані в одному масштабі часу.

2. За осцилограмами необхідно визначити постійну часу досліджуваного кола та записати вирази струмів кола та напруги на елементах схеми, як функції часу.

3. Розрахувати постійну часу за елементами схеми, вказаним на лабораторному макеті, визначити похибки експерименту.

Контрольні запитання та завдання:

1. Запишіть вирази для напруг та струмів реактивних елементів у диференційній формі.

2. Яка функція є рішенням диференційного рівняння першого порядку?

3. Що таке постійна часу електричного кола та яким чином вона визначається?

4. Яким чином на практиці визначається тривалість перехідного процесу?

Лабораторна робота № 8
Дослідження перехідних процесів у лінійних електричних колах
другого порядку

Мета роботи: дослідити характер перехідних процесів у колах, що описуються диференціальними рівняннями другого порядку: за осцилограмами напруг на елементах схеми визначити постійні часу досліджуваних електричних кіл.

Теоретичні відомості. Кола, що містять індуктивність та конденсатор (див. рис. 8.1), описуються диференціальним рівнянням другого порядку. Відповідно до законів Ома й Кірхгофа складемо рівняння:

$$\frac{1}{C} \int i dt + iR + L \frac{di}{dt} = E.$$

Після диференціювання отримаємо:

$$\frac{1}{C} i + R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2 i}{dt^2} = 0.$$

Вимушена складова струму в колі дорівнює нулю: $i_{\text{вим}} = 0$.
Характеристичне рівняння:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Корені характеристичного рівняння:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Залежно від знака дискримінанта рішення рівняння знаходиться наступним чином. При позитивному дискримінанті $\left(\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}\right) > 0$ корені

характеристичного рівняння є дійсними та різними. У цьому випадку вільна складова струму в колі знаходиться, як сума двох експонент:

$$i_{BIM}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

де A_1 та A_2 – постійні інтегрування.

При від'ємному дискримінанті $\left(\left(\frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \right) < 0$ корені характеристичного рівняння є комплексними:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2} = \alpha \pm j\omega$$

та рішення знаходиться у вигляді:

$$i_{BIL}(t) = A e^{\alpha t} \sin(\omega t + \phi),$$

де A та ϕ – постійні інтегрування.

Постійні інтегрування знаходяться з початкових умов шляхом вирішення системи двох рівнянь, отриманих з виразів $i_{BIL}(t)$ та $\frac{di_{BIL}(t)}{dt}$ підстановкою $t=0$.

Графіки $i_{BIL}(t)$ для обох випадків представлені на рис. 8.2а, б. Побудова експонент проводиться, як зазначено вище. Повне значення струму знаходиться, як сума двох експонент та постійної складової (якщо вона не дорівнює нулю).

У разі комплексних коренів на початку будуються дві експоненти, що визначаються закон зміни амплітуди коливань: $Ae^{-\alpha t}$ та $-Ae^{-\alpha t}$, потім за віссю абсцис відкладається в масштабі часу початкова фаза коливань ϕ , а від неї – ділянки, рівні періоду власних коливань $t_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$. На кожному періоді виділяються характерні точки: перехід синусоїди через нуль та два максимуми – позитивний та від'ємний, які збігаються з експонентами $Ae^{-\alpha t}$ та $-Ae^{-\alpha t}$. За цими точкам проводиться крива перехідного процесу.

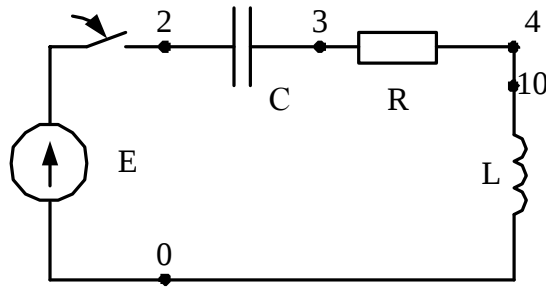


Рис. 8.1

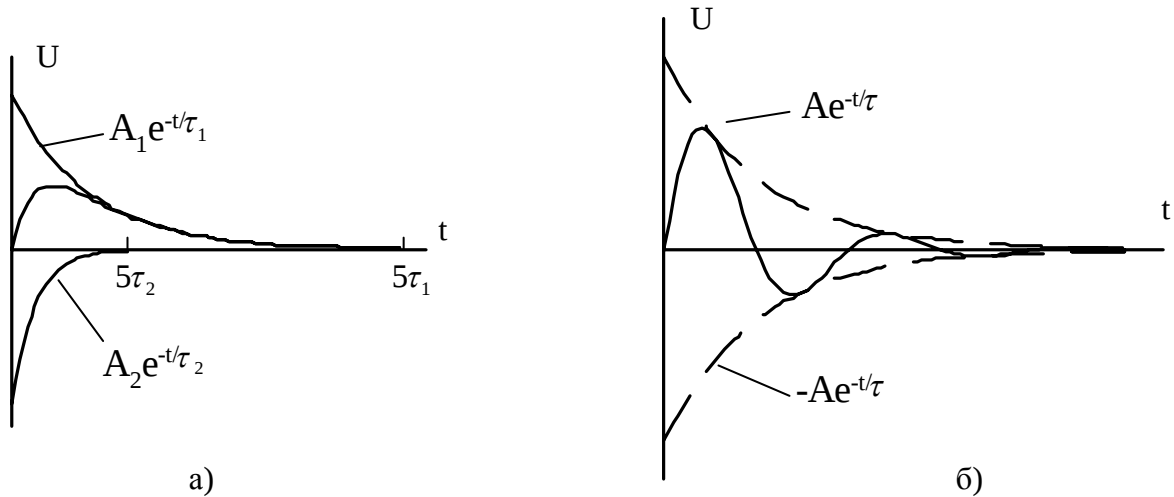


Рис. 8.2

Порядок виконання роботи:

1. Для виконання роботи в якості джерела вхідної напруги використовується напруга прямокутної форми (можна використовувати напруга як різнополярну, так і однополярну). Тривалість позитивного імпульсу (половини періоду) напруги повинна бути такою, щоб за цей час перехідні процеси в досліджуваному колі закінчилися, тобто $\frac{T_{MIN}}{2} \geq 5\tau$. Дослідження перехідних процесів проводиться за схемою рис. 7.3, де в якості досліджуваної схеми використовується схема рис. 8.1. При розрахунках необхідно враховувати внутрішній опір джерела прямокутних імпульсів.

2. Для схеми рис. 8.1 визначити корені характеристичного рівняння для $R_{вн.дж.}=50 \text{ Ом}$. За дійсною частиною коренів рівняння визначити необхідну частоту коливаний генератора. Встановити на генераторі цю частоту, амплітуду коливаний у режимі холостого ходу $E=5 \text{ В}$ та $R_{вн}=50 \text{ Ом}$.

3. Включити схему рис. 8.1 до схеми рис. 7.3 та зняти осцилограми напруг на індуктивності, конденсаторі й активному опорі.

4. Визначити корені характеристичного рівняння при $R_{вн.дж.}=600 \text{ Ом}$, визначити необхідну частоту коливань генератора.

5. Зняти осцилограми напруг у схемі рис. 8.1 на індуктивності, конденсаторі й активному опорі.

Зміст звіту:

1. Для кожного експерименту в звіті представити схему експерименту та осцилограми вхідної напруги (у режимі холостого ходу) та напруг на елементах схеми.

2. За осцилограмою, знятої в п. 2, визначити частоту власних коливань та постійну часу загасання амплітуди коливань. Записати за цими даними корені характеристичного рівняння та порівняти їх з розрахунковими.

3. За осцилограмою, знятої в п. 4, визначити постійні часу обох експонент та порівняти з розрахунковими.

Контрольні запитання та завдання:

1. Які кола описуються диференціальними рівняннями другого порядку?
2. Які корені може мати характеристичне рівняння другого порядку?
3. В якому вигляді знаходиться вільна складова при дійсних та комплексних коренях характеристичного рівняння?

Лабораторна робота № 9

Дослідження нелінійних кіл змінного струму

Мета роботи: вивчити методи розрахунку кіл змінного струму з нелінійними елементами, навчитися визначати середні, діючі значення напруг та струмів у нелінійних колах змінного струму, експериментально перевірити результати, отримані розрахунковим шляхом.

Теоретичні відомості. У колах змінного струму зустрічаються два види нелінійних елементів: інерційно-нелінійні та безінерційні. Інерційно-нелінійні елементи (лампи розжарювання, термістори) мають нелінійну вольтамперну характеристику тільки для діючих значень напруг та струмів, а для миттєвих значень вони є лінійними елементами, тому форму напруги й струму в колі вони не спотворюють. Визначення робочої точки інерційно-нелінійного елемента проводиться так само, як і для кіл постійного струму в системі координат діючих значень напруг та струмів. У робочій точці нелінійний елемент замінюється лінійним, далі коло розраховується як лінійний.

При використанні в колах синусоїдального змінного струму безінерційних елементів форма струму та напруги на ділянках кола стає несинусоїдальною. Для визначення напруг та струмів на ділянках кола використовується аналітичний вираз струму або напруги:

$$I_{CP} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t ;$$

$$U_{CP} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(\omega t) d\omega t ;$$

$$I_D = \sqrt{\int_0^{2\pi} i^2(\omega t) d\omega t} ;$$

$$U_D = \sqrt{\int_0^{2\pi} U^2(\omega t) d\omega t} ,$$

або графічна залежність струму або напруги, отримана шляхом побудови:

$$I_{CP} = \frac{1}{2\pi} \cdot S_i ; \quad U_{CP} = \frac{1}{2\pi} \cdot S_U ;$$

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot S_i^2}; \quad U_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot S_U^2},$$

де S_i , S_U – площа, яка знаходиться між графіками струму та напруги й віссю абсцис з урахуванням знака; S_i^2 , S_U^2 – площа, яка знаходиться між графіками квадратів струму та напруги й віссю абсцис.

Визначення закону зміни струму в колі проводиться за допомогою графічного та графоаналітичного методів. Сутність методів пояснюється на прикладі нелінійного елемента типу напівпровідниковий діод (див. рис. 9.1). Сутність графічного методу полягає в тому, що для схеми, приведеної до виду рис. 9.2, для кожного миттєвого значення напруги джерела будується навантажувальна лінія (рис. 9.3) та в одному з квадрантів будується графік струму або напруги на нелінійному елементі в функції ωt . Після цього графічно визначаються площі S_i та S_u для визначення середніх значень струму та напруги на нелінійному елементі. Напруги на інших ділянках кола знаходяться на підставі законів Ома й Кірхгофа для середніх значень.

При визначенні діючих значень необхідно спочатку побудувати залежності $i^2(\omega t)$ та $u^2(\omega t)$, потім за ними визначити площі S_i^2 та S_u^2 , за якими розраховуються $I_{\text{д}}$ та $U_{\text{д}}$. Закони Кірхгофа для діючих значень при несинусоїдальних струмах та напругах виконуються у вигляді:

$$I_{\text{д ОБ}} = \sqrt{I_{\text{д1}}^2 + I_{\text{д2}}^2};$$

$$U_{\text{д ОБ}} = \sqrt{U_{\text{д1}}^2 + U_{\text{д2}}^2}.$$

При використанні графоаналітичного методу вольтамперну характеристику нелінійного елемента апроксимують відрізками прямих ліній (кількість відрізків бажано вибирати не більше двох) та для кожної ділянки апроксимації встановлюють лінійну електричну схему заміщення. Для нелінійного елемента (див. рис. 9.1) ділянки апроксимації описуються рівняннями:

$$\begin{aligned} 1. \quad i &= 0; & U &\leq E_0; \\ 2. \quad U &= E_0 + i \cdot R_{\text{д}}; & U &\geq E_0, \end{aligned}$$

де $R_{\text{д}}$ – диференційний опір нелінійного елемента.

Відповідно, схеми заміщення мають вигляд, показаний на рис. 9.4. У відповідності до схеми заміщення для кожної ділянки вирази для струму нелінійного елемента мають вигляд:

$$i(\omega t) = \frac{E_m \sin \omega t - E_0}{R_{BH} + R + R_D}, \quad \text{при } i(\omega t) \geq 0$$

де R_{BH} – внутрішній опір джерела.

Напруга на нелінійному елементі описується наступними виразами для кожної ділянки:

$$\begin{aligned} 1. \quad U(\omega t) &= E_m \sin(\omega t); \\ 2. \quad U(\omega t) &= E_0 + \frac{E_m \sin \omega t - E_0}{R_{BH} + R + R_D} \cdot R_D \end{aligned}$$

Межі інтегрування для визначення середніх та діючих значень струмів і напруг знаходяться з умови:

$$E_m \sin(\omega t) - E_0 \geq 0;$$

$$\omega t_1 = \arcsin \frac{E_0}{E_m};$$

$$\omega t_2 = \pi - \omega t_1.$$

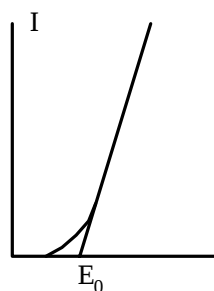


Рис. 9.1

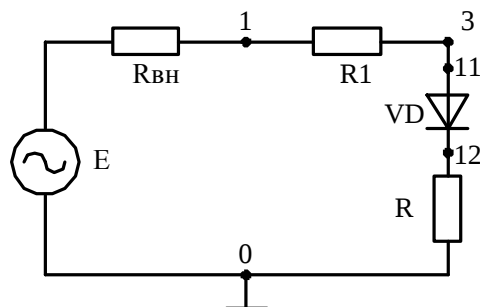


Рис. 9.2

Порядок виконання роботи:

1. Зібрати схему рис. 9.2. Встановити амплітуду вихідної напруги генератора в режимі холостого ходу $E_m = 0,5$ В. Зняти осцилограми напруг на резисторі R та нелінійному елементі. Виміряти середнє та діюче значення

напруги на нелінійному елементі.

2. Встановити амплітуду вихідної напруги генератора $E_m=5$ В. Зняти осцилограми напруг на резисторі R та нелінійному елементі. Виміряти середнє та діюче значення напруги на резисторі R та нелінійному елементі.

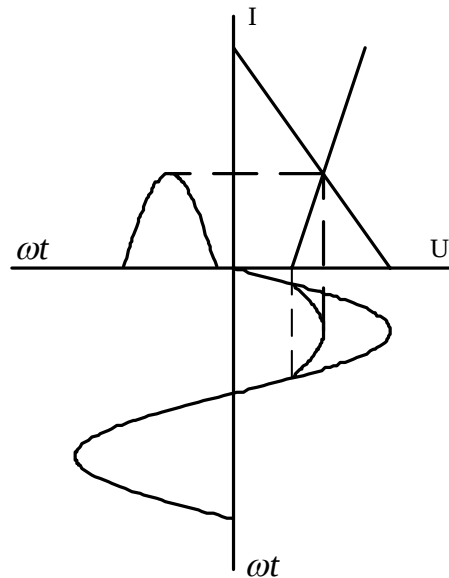


Рис. 9.3

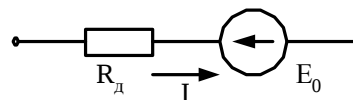


Рис. 9.4

Зміст звіту:

1. Схема рис. 9.2, осцилограми напруг та результати вимірювань за пунктами 1 та 2;
2. Вольтамперну характеристику нелінійного елемента, побудовану за даними: $E_0=0,5$ В; $R_d=10$ Ом;
3. Середні значення струму та напруги на нелінійному елементі, відповідно до осцилограми п. 2;
4. Середні й діючі значення напруги та струму нелінійного елемента, відповідно до схеми рис. 9.2 графоаналітичним методом.

Контрольні запитання та завдання:

1. Як визначається внутрішній опір нелінійного елемента в колах змінного струму?
2. Як визначаються середні й діючі значення струмів та напруг аналітичним методом?
3. Як визначаються середні й діючі значення струмів та напруг графічним методом?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рибалко М.П. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні кола: Підручник / М.П. Рибалко, В.О. Есауленко, В.І. Костенко. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513 с.

2. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 628 с.

3. Бессонов, Л.А. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Зарудин и др. – М.: Высшая школа, 2003. – 528 с.

4. Иродов, И.Е. Основные законы электромагнетизма: учеб. пособ. для студентов вузов / И.Е. Иродов. – 2-е изд. стереотип. – М.: Высшая школа, 1991. – 289 с.

