



**Міністерство освіти і науки України**

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної  
інженерії та електротехніки**

## **Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи №3**

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та  
(заочної) форми навчання, спеціальності  
163 «Біомедична інженерія»**

**Харків  
2024**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій  
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та  
електротехніки

## Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування

Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи №3

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та (заочної)  
форми навчання, спеціальності  
163 «Біомедична інженерія»

ЗАТВЕРДЖЕНО  
рішенням Науково-методичної  
ради ФЕРКТ ДБТУ  
Протокол №1 від 31 жовтня 2023 р.

Харків  
2024

УДК 615.37+57.08

Схвалено на засіданні кафедри ЕРБМІЕ  
Протокол №2 від 31 вересня 2023 р.

Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи № 3 [Текст] здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія» / Державний біотехнологічний університет; уклад.: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна, В.В. Сухін. – Харків: [б. в.], 2024. – 21 с.

Методичні вказівки по виконанню лабораторної роботи № 3 з дисципліни «Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування» розроблено відповідно до навчальної програми. Видання включає алгоритм виконання лабораторної роботи № 3 у комп'ютерній програмі Multisim та контрольні питання.

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та (заочної) форми навчання, спеціальності 163 «Біомедична інженерія».

**Відповідальний за випуск: М. О. Чорна, доцент.**

© Н.Г. Косуліна, 2024

© М.О. Чорна, 2024

© В.В. Сухін, 2024

© ДБТУ, 2024

**Зміст**

1. Мета та завдання роботи .....	3
2. Перелік обладнання та приладів, необхідних для досягнення запланованого результату.....	3
3. Короткий теоретичний коментар.....	3
3. Алгоритм виконання лабораторної роботи .....	18
5. Структурні елементи звіту .....	20
6. Порядок захисту лабораторної роботи .....	20
7. Контрольні питання .....	20
Список використаної літератури .....	21
Рекомендована література .....	21

Дослідження лінійних електричних кіл однофазного синусоїдного струму з послідовним з'єднанням резистора, котушки індуктивності і конденсатора

### 3.1. Мета роботи

Метою роботи є перевірка закону Ома для послідовного з'єднання кола змінного струму, яке складається активного, індуктивного та ємнісного опорів, дослідження співвідношень між цими елементами, розрахунок кола за визначеними параметрами та дослідна перевірка цього розрахунку при послідовному з'єднанні резистора, котушки індуктивності і конденсатора.

### 3.2. Основні теоретичні положення

При послідовному з'єднанні елементів в колі змінного струму закон Ома в загальному вигляді може бути записаний як:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (3.1)$$

де  $I$  - діюче (ефективне) значення струму, який протікає в колі;

$U$  - діюче значення напруги, яка прикладена до кола;

$Z$  - повний опір послідовного кола.

Якщо в нерозгалужене коло змінного струму з частотою  $f$  ввімкнути активний опір  $R$ , індуктивність  $L$  та ємність  $C$  (рис. 3.1), тоді повний опір такого кола визначається так:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (3.2)$$

де  $X_L = \omega L = 2\pi fL$  — індуктивний опір;

$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$  — ємнісний опір.

На відміну від активного опору, включення якого в коло змінного струму не дає фазового зсуву між струмом і напругою в ньому, реактивні опори (індуктивне і ємнісне) створюють фазовий зсув між струмом, що протікає в колі, та прикладеною напругою.

В колі змінного струму тільки з індуктивним опором характерним є поява позитивного фазового зсуву між струмом і напругою на  $90^\circ$ , тобто струм буде відставати від напруги на  $90^\circ$ .

Аналітична запис зміни струму  $i$ , напруги  $u$ , ЕРС самоіндукції  $e_L$  та миттєвої потужності  $p$  може бути представлена наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t, \\ u &= U_m \sin(\omega t + 90^\circ), \\ e_L &= E_m \sin(\omega t - 90^\circ), \\ p &= ui = UI \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Графічне зображення особливостей такого кола наведено на рис. 3.1, а векторна діаграма — на рис. 3.2.

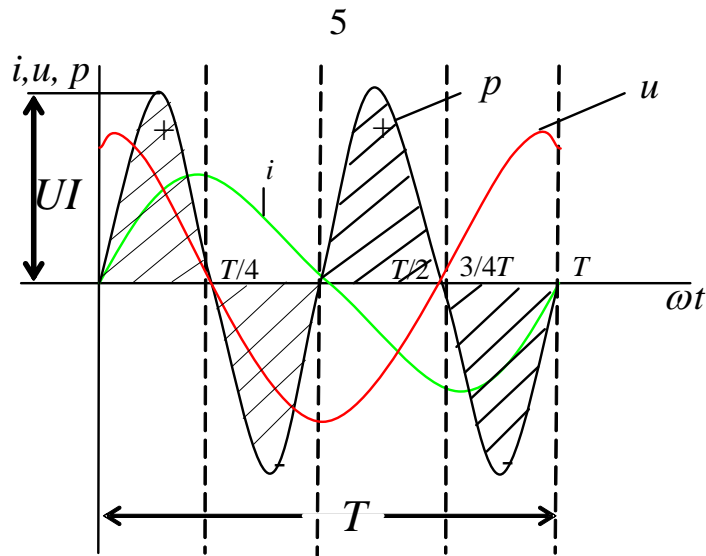


Рис. 3.1. Графічне зображення залежностей  $i, u, p$  від часу.

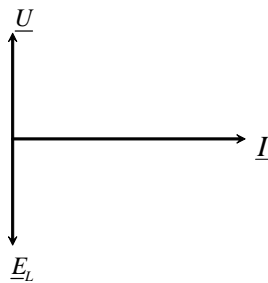


Рис. 3.2. Векторна діаграма кола з індуктивністю.

Щоб зрозуміти фізичні поняття енергетичних процесів у колі з індуктивністю, звернемо увагу на графік потужності, з якого видно, що миттєва потужність за період чотири рази змінює знак (у моменти часу  $T/3, T/2, 3/3T, T$ ), так як вона має нульові значення у ті моменти часу, коли струм  $i$  або напруга  $u$  дорівнює нулю. Зміна знаку потужності означає, що напрямок потоку енергії змінюється.

У першу чверть періоду, коли струм та напруга мають однаковий знак, тобто "+", потужність теж позитивна. Струм збільшується, енергія накопичується у магнітному полі котушки за рахунок енергії джерела. Котушка у цей час є приймачем енергії, струм має напрям протилежний ЕРС самоіндукції.

У другу чверть періоду, коли струм зменшується, енергія магнітного поля, яка запасється у індуктивності  $L$ , віддається назад джерелу живлення. При цьому миттєва потужність негативна. Напрямки ЕРС самоіндукції та струму у котушці співпадають – котушка у цей час є джерелом енергії.

У наступну половину періоду процес повторюється. Легко замітити, що кількість енергії, яка накопичується у котушці за одну чверть періоду (заштрихована площа "+") дорівнює кількості енергії, яка повертається назад у наступну чверть періоду (заштрихована площа "-").

Середня (активна) потужність за період дорівнює нулю ( $P=0$ ), так як у колі з індуктивністю перетворення електричної енергії у інші види енергії (теплову чи механічну) відсутнє.

Щоб оцінити з кількісної сторони міру швидкості такого обміну енергією між генератором і індуктивним колом, вводиться поняття реактивної (на відміну від активної) потужності  $Q$ . Одиниця потужності у цьому випадку має назву „ВАр” – вольт-ампери реактивні. Формула для визначення реактивної потужності має вигляд:

$$Q = I^2 X_L = I^2 \omega L. \quad (3.4)$$

Така особливість кола змінного струму, яке має тільки індуктивний опір.

Для кола змінного струму, яке складається тільки з ємнісного опору, фазовий зсув між струмом і напругою буде негативним і дорівнювати  $90^\circ$ , тобто струм буде випереджати напругу на  $90^\circ$ . Для ємнісного кола вирази для миттєвого значення струму, напруги та потужності мають вигляд:

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t, \\ u &= U_m \sin(\omega t - 90^\circ), \\ p &= -UI \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Графічне зображення особливостей такого кола наведено на рис. 3.3, а векторна діаграма – на рис. 3.3.

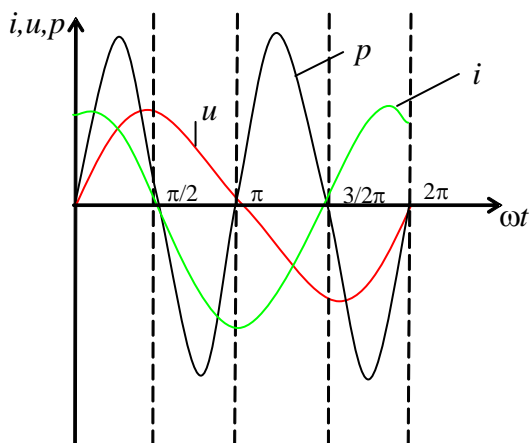


Рис. 3.3. Графічне зображення залежностей  $i$ ,  $u$ ,  $p$  від часу.



Рис. 3.4. Векторна діаграма кола з ємністю.

З графіка бачимо, що миттєва потужність, як і у колі з індуктивністю, чотири рази за період змінює знак. У першу чверть періоду конденсатор споживає енергію від джерела живлення. Ця енергія іде на створення електричного поля у конденсаторі, конденсатор заряджається, напруга на

конденсаторі збільшується. За другу чверть періоду енергія, яка запасється у електричному колі, віддається джерелу (миттєва потужність негативна), напруга зменшується. Потім усе повторюється.

Таким чином, активна потужність у колі з ємністю дорівнює нулю ( $P=0$ ), а реактивна потужність дорівнює добутку діючих значень напруги та струму:

Таким чином, у колі з ємністю, як і у колі з індуктивністю, перетворення електричної енергії у інші види енергії немає.

Розглянемо коло, що складається з послідовно з'єднаних елементів  $R, L, C$  (рис. 3.5).

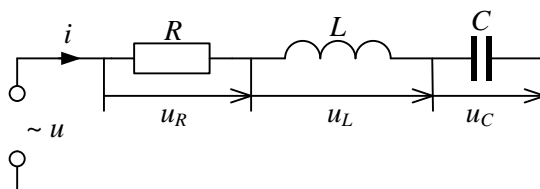


Рис. 3.5. Електричне коло при послідовному з'єднанні  $R, L, C$

Нехай у колі тече деякий струм  $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  і відомі параметри  $R, L, C$ . Треба визначити напругу на ділянках кола  $u_R, u_L, u_C$  а також напругу, прикладену до всього кола,  $u$

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (3.6)$$

де  $u_R = Ri = R \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ ,

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \omega L I_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}),$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + \psi_i) dt = \frac{1}{C\omega} I_m \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}).$$

У останньому виразі стала інтегрування дорівнює нулю, так як у напрузі на конденсаторі відсутня стала складова. Для розв'язання задачі будемо користуватись методом комплексних амплітуд або інакше символічним методом.

У комплексній формі рівняння  $u = u_R + u_L + u_C$  запишеться таким чином:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C. \quad (3.7)$$

Підставивши у це рівняння значення комплексних напруг одержимо:

$$\underline{U} = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} + \frac{1}{j\omega C}\underline{I}, \text{ або } \underline{U} = \underline{I} \left[ R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right]. \quad (3.8)$$

Відношення комплексної напруги до комплексного струму називається комплексним опором:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} = Z e^{j\varphi} \quad (3.9)$$

$$\text{або } \underline{Z} = Z e^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jX, \quad (3.10)$$

де  $R = Z \cos \varphi$  – активний опір;



$X = Z \sin \varphi$  – реактивний опір.

Тоді модуль комплексного опору буде дорівнювати:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \text{ а } \varphi = \arctg \frac{X}{R}. \quad (3.11)$$

Для кола (рис. 3.2.1) будемо мати:

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + j(X_L - X_C) = R + jX, \quad (3.12)$$

де  $X_L = \omega L$ ,

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Для подальшого розв'язання задачі треба підставити комплексні величини струмів і напруг у рівняння, складені за другим законом Кірхгофа:

$$Ue^{j\psi_u} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} e^{j\varphi} Ie^{j\psi_i}. \quad (3.13)$$

Тоді будемо мати:

$$U = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} I. \quad (3.14)$$

Враховуючи, що  $U_m = \sqrt{2}U$ , запишемо вираз для миттєвого значення цієї напруги:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (3.15)$$

При періодичних процесах розраховують середнє значення миттєвої потужності за період  $T$ , яка називається активною потужністю:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi. \quad (3.16)$$

Множник  $\cos \varphi$  називається коефіцієнтом потужності ( $\cos \varphi \leq 1$ ). Поряд з активною потужністю введено поняття реактивної  $\theta = UI \sin \varphi$  і повної  $S = UI$  потужностей.

### 3.3. Програма роботи

3.3.1. Визначити параметри елементів схеми.

3.3.2. Виконати досліди кола при послідовному з'єднанні елементів  $R-L$ ,  $R-C$ ,  $R-L-C$ .

3.3.3. Виконати розрахунки, користуючись результатами дослідів.

### 3.3. Необхідне обладнання

3.3.1. Лабораторний стенд - 1 шт.

3.3.2. Автотрансформатор ЛАТР-1 - 1 шт.

3.3.3. Амперметр - 1 шт.

3.3.4. Вольтметр - 2 шт.

3.3.5. Ватметр - 1 шт.

3.3.6. Комплект з'єднувальних проводів.



3.5.2. Загальні розрахункові формули для схеми з послідовним з'єднанням  $R$ ,  $L$ ,  $C$  або варіантів з'єднання елементів.

$Z_{CX} = \frac{U_{CX}}{I}$ $U_{CX} = U_{BX}$ $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_L^2}$	$R = \frac{U_R}{I}$ $X_L = \omega \cdot L$	$R_{CX} = \frac{P}{I^2}$ $L = \frac{X_L}{\omega}$	$R_L = R_{CX} - R$ $X_C = \frac{U_C}{I}$	$Z_L = \frac{U_L}{I}$ $C = \frac{10^6}{\omega \cdot X_C}$
$\cos \varphi_L = \frac{R_L}{Z_L}$	$\varphi_K = \arccos \frac{R_L}{Z_L}$	$X =  X_L - X_C $	$\operatorname{tg} \varphi = \left  \frac{X_L - X_C}{R_{CX}} \right $	
$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R_{CX}}$	$L = \frac{X_L}{\omega}$	$X = \sqrt{Z_{CX}^2 - R_{CX}^2}$	$\cos \varphi_{CX} = \frac{R_{CX}}{Z_{CX}}$	

В наведених розрахункових формулах:

$Z_{CX}$  – повний опір схеми (комплекс повного опору), Ом;

$X$  – реактивний опір схеми, Ом;

$X_L$  – реактивний опір котушки індуктивності, Ом;

$X_C$  – реактивний опір ємності, Ом;

$Z_L$  – повний опір котушки індуктивності, Ом;

$R_{CX}$  – активний опір всього кола, Ом;

$R_L$  – активний опір котушки індуктивності, Ом;

$R$  – величина під'єданого в схему опору  $R$ , Ом;

$U_{BX}$  – вхідна напруга кола, В;

$U_R, U_L, U_C$  – спад напруги на елементах  $R, L, C$ , В;

$I$  – величина струму в колі, А;

$P$  – потужність, що розсіюється на активних елементах схеми, Вт;

$L$  – значення індуктивності котушки, Гн;

$C$  – величина ємності конденсатору, мкФ;

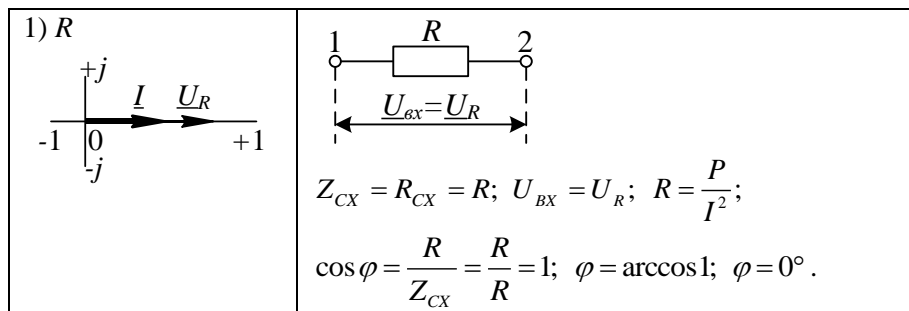
$\varphi_L$  – кут зсуву між напругою на котушці  $U_K$  та струмом  $I$  в колі, град;

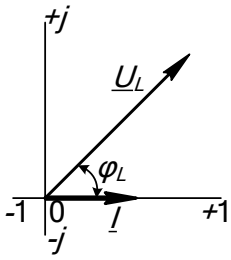
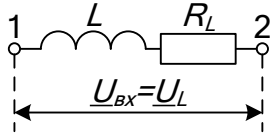
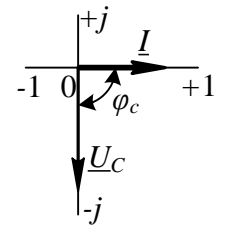
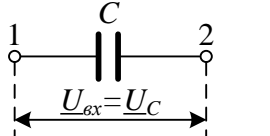
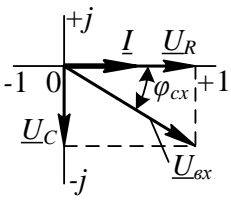
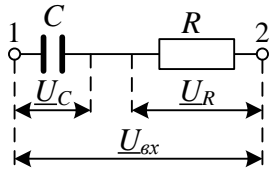
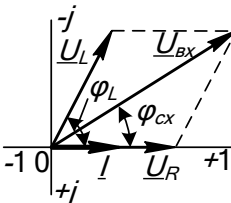
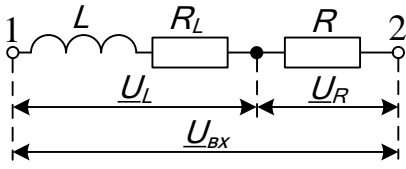
$\varphi$  – кут зсуву між вхідною напругою  $U_{BX}$  та струмом  $I$  в колі, град;

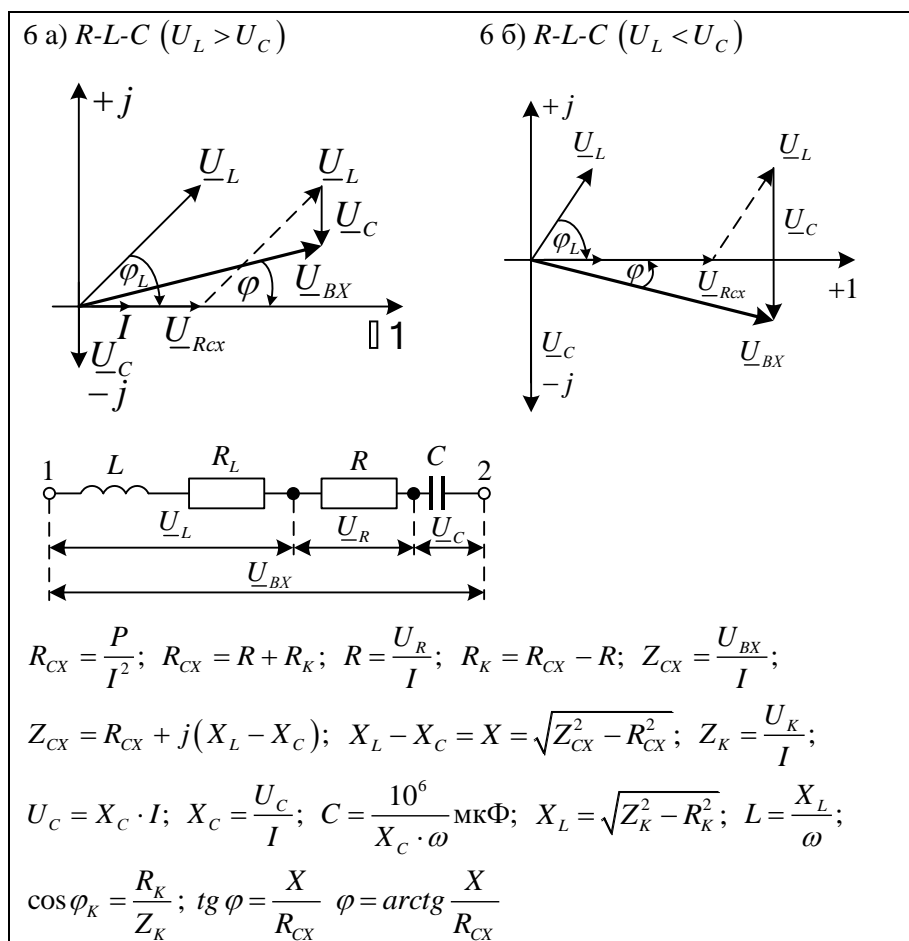
$\omega$  – кутова частота синусоїдного струму, 1/с;

$f$  – частота синусоїдного струму, Гц.

3.5.3. Приклади розрахунків та побудови векторних діаграм



<p>2) L</p> 	 $Z_{CX} = Z_L = \frac{U_{BX}}{I} = \frac{U_L}{I}; \quad R_{CX} = R_L = \frac{P}{I^2};$ $U_{R_L} = I \cdot R_L; \quad Z_{CX} = R_L + jX_L; \quad X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2};$ $U_L = I \cdot X_L; \quad X_L = \omega \cdot L; \quad L = \frac{X_L}{\omega}; \quad \omega = 2\pi f;$ $f = 50 \text{ Гц}; \quad \cos \varphi_L = \frac{R_L}{Z_{CX}}; \quad \varphi_L = \arccos \frac{R_L}{Z_{CX}}.$
<p>3) C</p> 	 $Z_{CX} = -jX_C; \quad R_{CX} = 0; \quad U_{BX} = U_C; \quad X_C = \frac{U_C}{I};$ $C = \frac{10^6}{X_C \cdot \omega} \text{ мкФ}; \quad \omega = 2\pi f; \quad f = 50 \text{ Гц};$ $\cos \varphi = \frac{R_{CX}}{Z_{CX}} = \frac{0}{Z_{CX}};$ $\varphi = \arccos 0 \rightarrow \varphi = -\frac{\pi}{2} (-90^\circ)$
<p>4) C-R</p> 	 $Z_{CX} = \sqrt{R_{CX}^2 + X_C^2}; \quad Z_{CX} = \frac{U_{BX}}{I};$ $R_{CX} = R = \frac{U_R}{I} = \frac{P}{I^2}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}; \quad \omega = 2\pi f;$ $C = \frac{10^6}{X_C \cdot \omega} \text{ мкФ}; \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad \cos \varphi = \frac{R_{CX}}{Z_{CX}};$ $\varphi = \arccos \frac{R_{CX}}{Z_{CX}}.$
<p>5) L-R</p> 	 $R_{CX} = \frac{P}{I^2}; \quad R_{CX} = R + R_L; \quad R_K = R_{CX} - R;$ $Z_{CX} = \frac{U_{BX}}{I} \quad U_{R_{CX}} = U_R + U_{R_L}; \quad X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2};$ $\cos \varphi_L = \frac{R_L}{Z_L}; \quad \varphi_L = \arccos \frac{R_L}{Z_L}; \quad L = \frac{X_L}{\omega}.$



### 3.6. Контрольні запитання

- 3.6.1. Який опір зветься активним, а який – реактивним?
- 3.6.2. Як залежать індуктивний та ємнісний опори від частоти струму?
- 3.6.3. Яка потужність зветься активною і реактивною. Як розраховуються ці потужності для різних кіл змінного струму?
- 3.6.4. Яке значення змінного струму показують прилади електромагнітної системи?
- 3.6.5. Дайте пояснення процесу проходження синусоїдного струму через котушку індуктивності.
- 3.6.6. Дайте пояснення процесу проходження струму через конденсатор.
- 3.6.7. Запишіть закон Ома для кіл змінного струму з активним, індуктивним, активно-індуктивним, ємнісним та активно-ємнісним опором. Які особливості цих кіл?

3.6.8. Який вигляд мають векторні діаграми струму і напруги для котушки індуктивності і конденсатора?

3.6.9. Накреслити трикутники опорів, напруг, потужностей.

3.6.10. Що називають кутом зсуву фаз між струмом і напругою і як його визначити?

3.6.11. Запишіть закон Ома у комплексному вигляді для кола з послідовним з'єднанням активного опору, котушки індуктивності і ємності.

### **Список використаної літератури**

1. Шадріна Г.М., Дедів Л.Є., Дозорський В.Г. Методичні вказівки до проведення лабораторних занять з дисципліни «Основи конструювання біомедичної апаратури» для студентів за напрямом підготовки 6.051302 «Біомедична інженерія» // Г.М. Шадріна, Дедів Л.Є., Дозорський В.Г – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. – 106 с.

2. Електроніка та мікросхемна техніка: курс лекцій для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / укладачі: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна; ДБТУ. – Харків: [б. в.], 2023. – 146 с.

3. Основи конструювання БМА та основи технології виробництва БМА для біооб'єктів: лекції для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / укладач: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна, В. В. Сухін; ДБТУ. – Харків: [б. в.], 2023. – 130 с.

### **Рекомендована література**

1. Основи проектування електронних систем: лабораторний практикум / Уклад.: Т.В.Мелешко, В.А. Швець, А.О. Краснопольський, Н.О. Касперович, О.О. Туз. – К.: НАУ, 2013. – 102 с.

2. Практична електротехніка. Посібник для виконання лабораторних і практичних робіт з курсу «Основи теорії електричних кіл та сигналів» на основі віртуальної лабораторії Multisim. Частина I / В.М. Рябенський, В.С. Буряк. – Миколаїв: НУК, 2016. – 163 с.

3. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.

Навчальне видання

**Методи та засоби автоматизації схемотехнічного  
проектування**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи №3**

**КОСУЛІНА** Наталія Геннадіївна  
**ЧОРНА** Марія Олександрівна  
**СУХІН** Віталій Володимирович

Формат 60x83/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 0,625  
Наклад 50 пр.  
Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44