

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3
НЕРОЗГАЛУЖЕНЕ ЛІНІЙНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО СИНУСОЇДНОГО
СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНИХ ТА
РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ. РЕЗОНАНС НАПРУГ

Мета роботи – експериментально визначити електричні параметри кола з послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів. Дослідити явище резонансу напруг. Навчитися аналізувати електричні процеси в колі за допомогою векторних діаграм.

3.1. Основні теоретичні відомості

Електричний стан кола з послідовним з'єднанням активного опору R , індуктивності L та ємності C (рис.3.1) описується другим законом Кірхгофа, який записується у комплексній формі наступним чином

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \quad (3.1)$$

де $\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}$, $\dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}$, $\dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}$ - комплексні напруги на ділянках кола; R - активний опір, $X_L = \omega L$ та $X_C = 1/\omega C$ - реактивні індуктивний та ємнісний опори відповідно; $\omega = 2\pi f$ - кутова частота; f - циклічна частота напруги живлення.

За рівнянням для комплексної напруги на вході кола можна побудувати векторну діаграму струму та напруг електричного кола. Вектор напруги \dot{U}_R на активному опорі збігається з напрямом струму \dot{I} , вектор напруги на індуктивності \dot{U}_L випереджає струм на 90° , а на ємності \dot{U}_C - відстає на 90° . Побудовану таким чином діаграму подано на рис.3.2.

Враховуючи складові \dot{U}_R , \dot{U}_L та \dot{U}_C , рівняння (3.1) перетворюється до вигляду

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

або до виду рівняння, записаного в комплексній формі за законом Ома для всього кола

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}},$$

де $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ - комплексний опір кола з послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів.

Модуль комплексного опору (повний опір) кола синусоїдного струму :

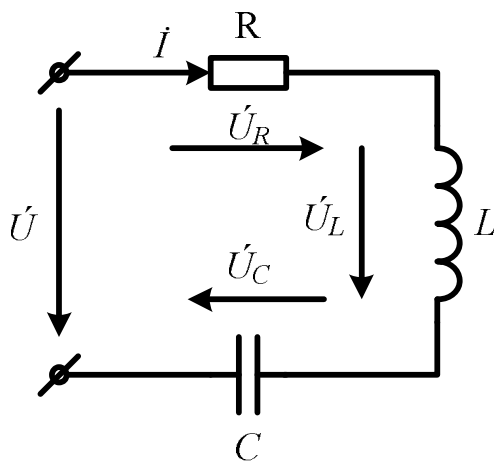
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$


Рис.3.1

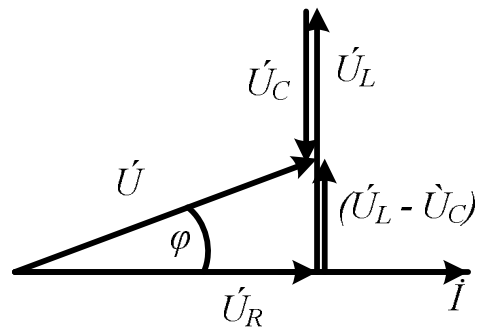


Рис.3.2

Із виразу випливає, що повний опір кола синусоїдного струму залежить не тільки від параметрів елементів кола, а й від частоти прикладеної напруги.

Взаємозв'язок між діючими значеннями струму, напруги та повним опором кола визначається співвідношеннями $U = IZ$ або $I = U/Z$.

Із трикутника напруг, поданого на векторній діаграмі 3.2, можна отримати трикутник опорів (рис.3.3), якщо сторони трикутника напруг поділити на струм

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{U_R}{I}, \quad X = X_L - X_C = \frac{U_L - U_C}{I}.$$

Співвідношення між опорами (сторонами трикутника наступні):

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad R = Z \cos \varphi, \quad X = Z \sin \varphi.$$

З трикутника опорів також випливає, що

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}.$$

Отримані співвідношення показують, що кут зсуву фаз φ між струмом \dot{I} та вхідною напругою \dot{U} залежить від характеру елементів, які складають коло синусоїдного струму.

Помноживши сторони трикутника опорів на квадрат струму I^2 , тримаємо трикутник потужностей (рис.3.4), з якого визначаємо співвідношення між повною S , активною P та реактивною Q потужностями

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi.$$

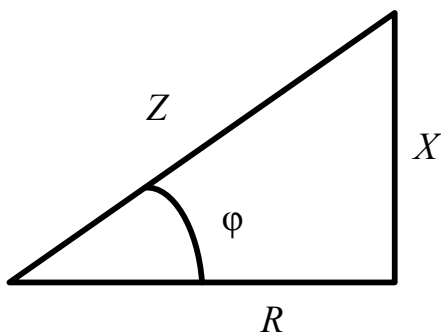


Рис.3.3

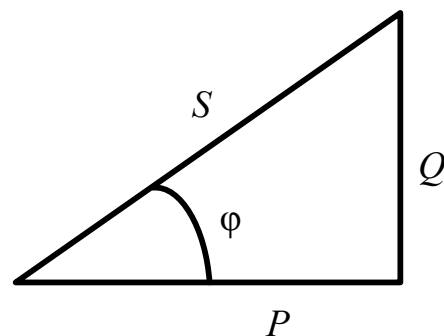


Рис.3.4

Реактивна потужність визначається як різниця індуктивної Q_L та ємнісної Q_C потужностей

$$Q = Q_L - Q_C.$$

Вираз для повної потужності в комплексному вигляді записують так

$$\tilde{S} = \dot{U}I^* = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C)$$

$$\text{та } \tilde{S} = S(\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

В колі з послідовним з'єднанням індуктивного та ємнісного елементів можливий особливий стан, коли кут зсуву фаз між струмом та напругою на вході кола дорівнює нулю. Цей стан називається резонансом напруг і виникає коли індуктивний опір кола дорівнює ємнісному:

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

Із наведених виразів випливає, що резонанс можна отримати змінюючи індуктивність, ємність або частоту прикладеної напруги, а також одночасно змінюючи параметри кола. Якщо змінювати ємність конденсатора, то змінюється ємнісний опір та повний опір кола. Відповідно, змінюються струм, коефіцієнт потужності, напруги на котушці індуктивності та конденсаторі, повна, активна та реактивна потужності кола. Залежності струму I , коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ та повного опору Z кола синусоїдного струму (рис.3.1) від ємнісного опору X_C (резонансні криві) подано на рис.3.5. Векторну діаграму струмів та напруг цього кола подано на рис.3.6.

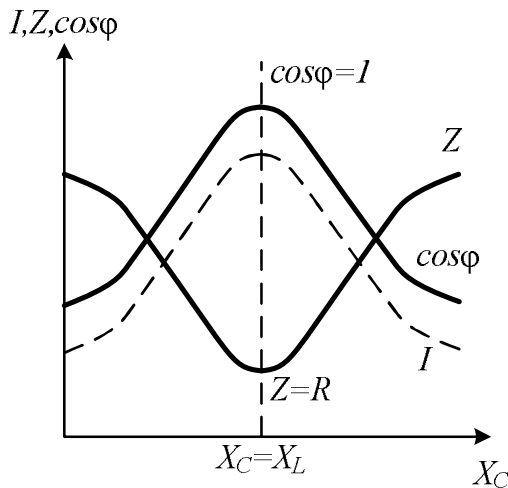


Рис.3.5

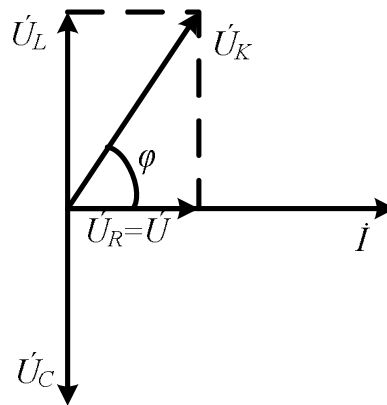


Рис.3.6

Як можна побачити з векторної діаграми, реактивна складова напруги U_L на котушці під час резонансу дорівнює напрузі на конденсаторі U_C . Оскільки у котушки крім реактивного опору X_L є ще й активний R , то напруга на котушці U_K більше напруги на конденсаторі. Тому точка резонансу визначається за максимумом струму в колі.

Проаналізувавши наведені вирази, а також рис.3.5 та 3.6, можна зробити наступні висновки:

1. Під час резонансу повний опір кола має мінімальне значення та дорівнює активному $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$.

2. З п.1 випливає, що за незмінної напруги живлення, струм в колі приймає максимальне значення.

3. В стані резонансу коефіцієнт потужності $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{R} = 1$, тобто приймає максимальне значення, якому відповідає $\varphi = 0$. Вектори струму I

та напруги живлення \dot{U} мають однаковий напрям, оскільки мають однакові початкові фази $\psi_u = \psi_i$.

4. Активна потужність під час резонансу $P = I^2 R$ максимальна і дорівнює повній потужності S ; реактивна потужність Q дорівнює нулю.

5. Напруги на індуктивності та ємності однакові $U_L = U_C$ і можуть бути більшими, ніж напруга живлення; напруга на активному опорі дорівнює вхідній $U_R = U$.

Резонанс напруг в промисловому електротехнічному устаткуванні є небажаним та небезпечним, оскільки може привести до аварії внаслідок перегріву окремих елементів кола або до пробоя ізоляції обмоток трансформаторів, електричних машин, ізоляції кабелів та конденсаторів внаслідок перенапруги на окремих ділянках кола.

В той же час резонанс напруг в електричних колах змінного струму широко застосовується в електроніці та радіотехніці в різних приладах та пристроях, принцип дії яких побудований на використанні явища резонансу.

3.2. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з приладами для вимірювання і обладнанням панелей №3, №4 стенда та вимірювальним комплектом К505.

2. Скласти відповідно до рис. 3.7 схему послідовного з'єднання двох активних опорів R_1 і R_2 .

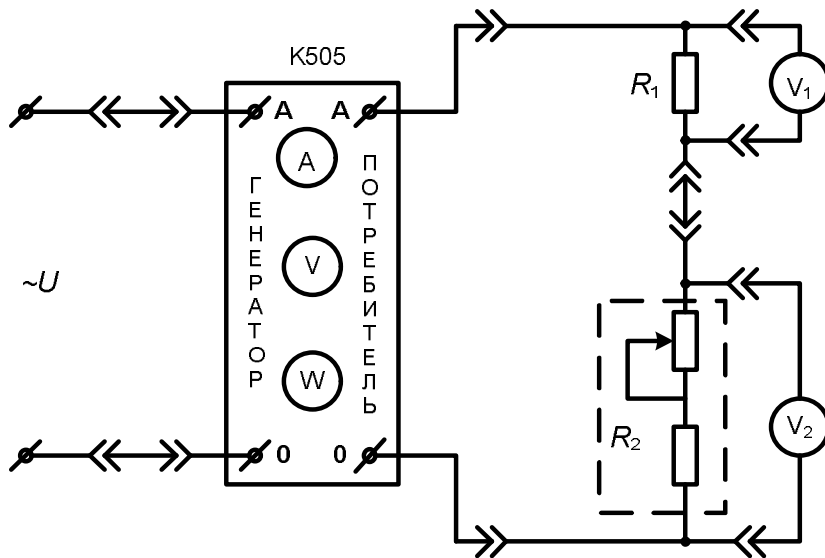


Рис.3.7

3. Подати на електричне коло напругу, величину якої визначає керівник занять та виміряти величини, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Дані вимірювань					Результати обчислень			
I	U	P	U_{R1}	U_{R2}	R	R_1	R_2	$\cos \varphi$
А	В	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	

4. Скласти схему відповідно до рис.3.8 з послідовним з'єднанням опору R_1 та котушки індуктивності. Для цього необхідно замінити активний опір R_2 на котушку з активним опором R_k та індуктивністю L_k розташовану на панелі №4. Провести вимірювання величин відповідно до табл. 3.2. Дослід провести в два етапи.

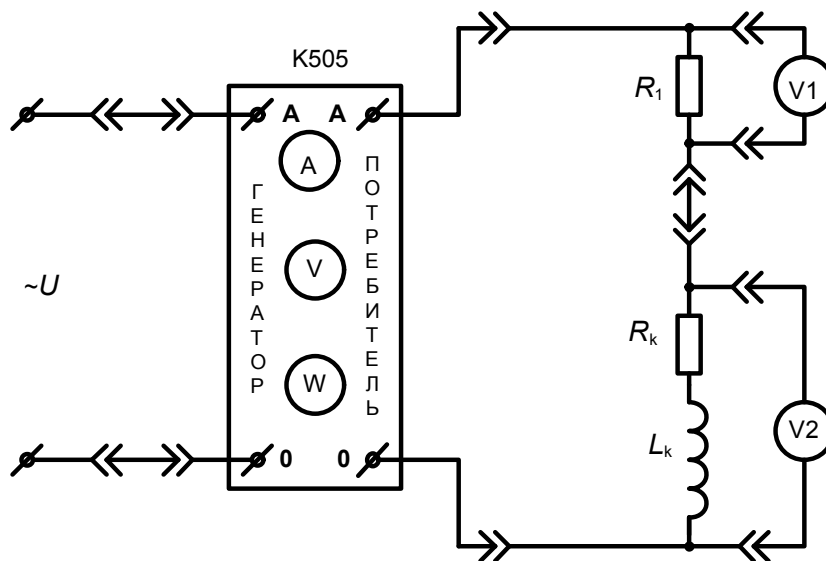


Рис.3.8

Спочатку для визначення параметрів котушки, спростити схему, замкнувши опір R_1 перемичкою та виміряти струм I_k , напругу U_k та потужність P_k для подальшого розрахунку параметрів котушки. Потім відновити опір R_1 і провести вимірювання параметрів для всього кола.

Таблиця 3.2

Дані вимірювань					Результати обчислень									
					Котушка					Усе коло				
I	U	P	U_1	U_2	Z_k	R_k	X_k	$\cos \varphi_k$	L	Z	R	U_a	U_p	$\cos \varphi$
А	В	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом		Гн	Ом	Ом	В	В	

5. Скласти схему відповідно до рис.3.9 з послідовним з'єднанням опору R_1 та конденсатору. Для цього необхідно замінити котушку індуктивності блоком конденсаторів $C_1...C_{15}$ розташованого на панелі №4. Величину ємності встановити за вказівкою керівника. Виміряти величини, наведені в табл. 3.3.

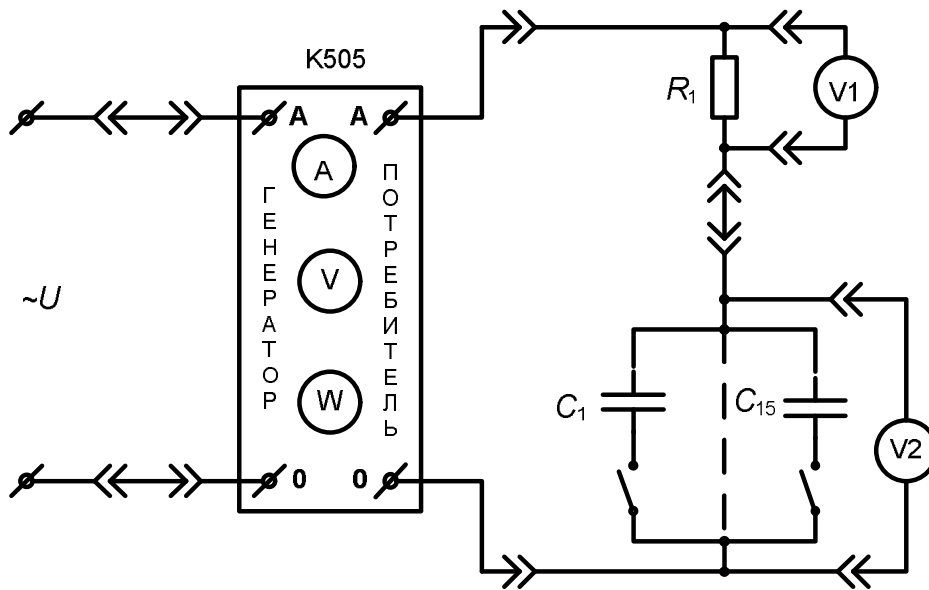


Рис.3.9

Таблиця 3.3

Дані вимірювань					Результати обчислень							
					Конденсатор		Усе коло					
I	U	P	U_1	U_2	X_C	C	Z	R	U_a	U_p	$\cos \phi$	
А	В	Вт	В	В	Ом	мкФ	Ом	Ом	В	В		

6. Скласти схему з послідовним з'єднанням котушки і блока конденсаторів відповідно до рис.3.10. Для цього необхідно замінити активний опір R_1 на котушку з активним опором R_k та індуктивністю L_k розташовану на панелі №4.

Примітка: Враховуючи можливість виникнення великих напруг, дослідження кола треба проводити при напрузі на затискачах джерела не більше 20 В.

Особливу увагу звернути на резонанс напруги при $C = C_0$.

Дані вимірювань записати в таблицю 3.4.

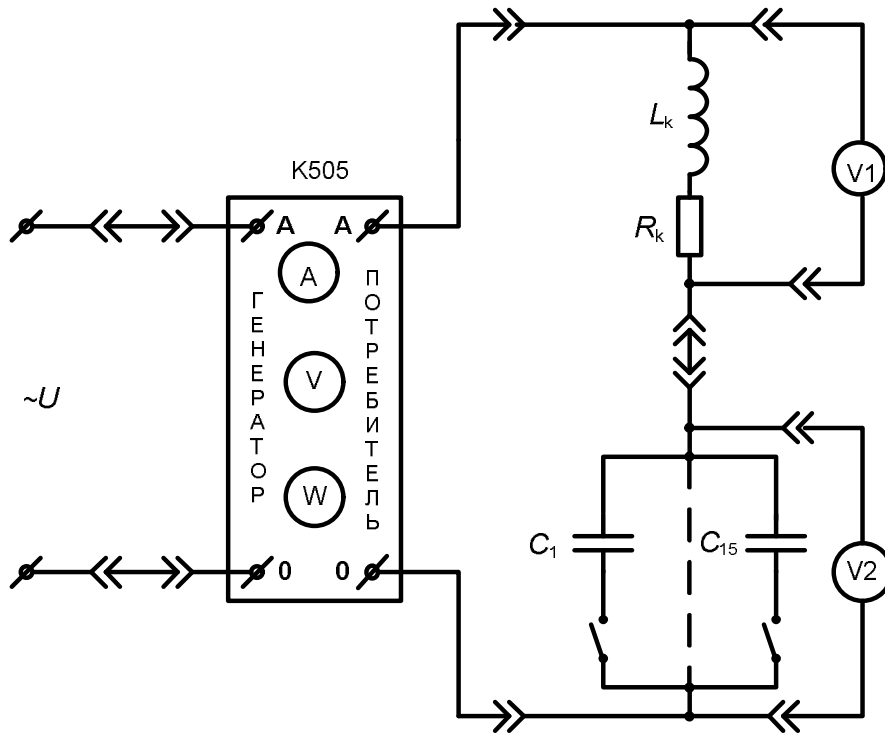


Рис.3.10

Таблиця 3.4

Номер дослід	Дані вимірювань						Результати обчислень		
	C	I	U	U_1	U_2	P	$\cos \varphi$	X_C	φ
	мкФ	А	В	В	В	Вт	від/од	Ом	град
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

3.3. Опрацювання результатів вимірювань

1. За даними вимірювань для активного кола розрахувати значення, вказані в таблиці 3.1.

Побудувати в масштабі за даними вимірювань векторну діаграму струмів та напруг кола.

2. За даними вимірювань аналітично розрахувати значення вказані в табл. 3.2; 3.3 за формулами:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad U_a = U \cdot \cos \varphi, \quad U_p = \sqrt{U^2 - U_a^2} \quad U_{ka} = U_a - U_1,$$

$$\sin \varphi_k = \frac{U_p}{U_2} \quad \cos \varphi_k = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_k} \quad Z_k = \frac{U_2}{I} \quad R_k = \frac{U_{ka}}{I}$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k,$$

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = Z \cos \varphi, \quad \varphi = \arctg \frac{X_k - X_C}{R},$$

$$f = 50 \text{ Гц}, \quad L = \frac{X_k}{2\pi f}, \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C}.$$

Побудувати в масштабі за даними табл. 3.2 і 3.3 векторні діаграми методом засічок. Вказати масштаби для напруги і струму.

3. За даними вимірювань табл. 3.4 побудувати векторні діаграми для випадків $C < C_0$, $C = C_0$, $C > C_0$ і розрахувати значення, зазначені в таблиці 3.4.

4. Побудувати в масштабі на одному рисунку графіки залежностей: $I = f(C)$, $\cos \varphi = f(C)$, $\varphi = f(C)$.

5. За даними в табл. 3.1, 3.2, 3.3 написати в комплексній формі вирази опорів котушки, резистора та конденсатора. Зробити висновки про виконану роботу.

6. Записати рівняння миттєвого значення струму, вхідної напруги та напруг на опорах R_1 та R_2 , вважати величину початкової фази джерела напруги рівною нулю ($\psi_u = 0$).

3.4. Запитання і завдання для самоперевірки

1. Використовуючи результати вимірювань, показати, як виконується другий закон Кірхгофа для діючих значень напруг.

2. Пояснити, як за показами приладів обчислено R_1 , R_2 , L , C .

3. Пояснити принцип побудови векторних діаграм для окремих випадків R, L, C кіл. Графічна побудова циркулем.

4. Зобразити і проаналізувати, використовуючи відповідні формули, графіки $I = f(C)$ та $\varphi = f(C)$ (для графіка $\varphi(C)$ передбачити зміну знака φ).

5. Навести якісні і кількісні умови, при яких виникає резонанс напруг. В який спосіб можна його досягти?

6. Які явища виникають при резонансі напруг? У чому небезпека і користь резонансу напруг?

7. Написати комплекси напруг на затискачах котушки і конденсатора, для резонансу напруг (рис.3.10). Порівняти ці величини.