

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.10- 05.01/152.00.1/Б/ОК14- 2022
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 49 / 1</i>

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»

протокол від 16 грудня 2022 р.  
№13

### **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ для проведення лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теорія електричних сигналів та кіл»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»  
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані інформаційно-  
вимірювальні системи»  
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і  
робототехніки  
кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім.  
проф. Б.Б. Самотокіна

Рекомендовано на засіданні кафедри РЕ  
та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна  
\_\_\_\_\_ 2022 р., протокол № \_\_\_\_

Розробник: к.т.н., доцент кафедри РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна»  
ШАВУРСЬКИЙ Юрій Олександрович

Житомир  
2022

## ЗМІСТ

1. Лабораторна робота №1, Дослідження складного лінійного кола постійного струму.....3
2. Лабораторна робота №2, Дослідження послідовного електричного кола змінного струму.....9
3. Лабораторна робота №3, Дослідження паралельного електричного кола змінного струму.....18
4. Лабораторна робота №4, Дослідження трифазного електричного кола.....24
5. Лабораторна робота №5, Дослідження однофазного трансформатора.....31
6. Лабораторна робота №6, Дослідження трифазного генератора.....36
7. Лабораторна робота №7, Дослідження термопар.....43

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## Дослідження складного лінійного кола постійного струму

МЕТА РОБОТИ: визначення ЕРС джерела, його внутрішнього опору  $R_0$ , опору реостатів, експериментальна перевірка основних законів електричних кіл і методів їх розрахунку, побудова потенціальної діаграми електричного кола

### Загальні положення

Джерело електричної енергії характеризується величиною ЕРС і внутрішнім опором  $R_0$  (Рис. 1.1).

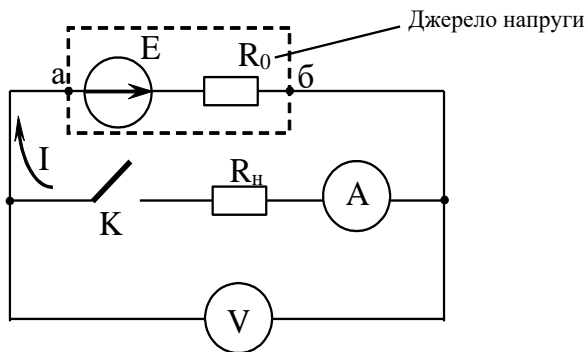


Рис. 1 1

Рис 1.1. Схема досліджень джерела напруги

Вимірювальні прилади – амперметр і вольтметр вимірюють силу струму і напругу, які створює джерело електричної енергії. Вольтметр має великий опір  $R_v \gg R_n$ , через нього протікає незначний струм

$$I_{\epsilon} = \frac{U_{\delta a}}{R_{\epsilon}} \rightarrow 0.$$

При розімкненому ключі **К** джерело напруги працює в режимі холостого ходу, воно створює незначний струм  $I_{xx} \rightarrow 0$ , при цьому падіння напруги на внутрішньому опорі  $R_0$  практично відсутнє, і напруга  $U_{\delta a}$ , яку вимірює вольтметр співпадає з ЕРС  $E$ :  $U_{\delta a, xx} = E$ .

В режимі навантаження при замкненому ключі К через споживач  $R_n$  протікає струм  $I = E / (r_0 + R_n)$ , частина ЕРС джерела енергії втрачається на внутрішньому опорі  $R_0$ . На затискачах джерела енергії напруга зменшується:

$$U_{\text{ба,н}} = E - I \cdot r_0.$$

За результатами вимірювань в режимах холостого ходу і навантаження можна визначити внутрішній опір  $R_0$ :

$$R_0 = \frac{E - U_{\text{ба,н}}}{I} = \frac{U_{\text{ба,хх}} - U_{\text{ба,н}}}{I}.$$

Складне електричне коло (рис.1.2) має два джерела енергії  $E_1$  і  $E_2$  з внутрішніми опорами  $r_{01}$  та  $r_{02}$  і споживачі  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ . Амперметри  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_3$  вимірюють струм в гілках електричного кола. Перемикачі  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  дозволяють вмикати джерела електричної енергії або вмикати замість них відповідні внутрішні опори  $r_{01}$  і  $r_{02}$ .

Коли перемикачі знаходяться в лівому (або правому) положенні в електричному колі діє тільки одна ЕРС  $E_1$ , створений нею струм протікає через споживач  $R_1$  і розгалужується через споживачі  $R_2$  і  $R_3$ . При цьому струм  $I_2$  має зворотній напрям до показаного на рис. 1.2. Вольтметр дозволяє виміряти падіння напруги  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$  на кожному із споживачів.

Результати вимірювань згідно закону Ома і першому закону Кірхгофа пов'язані рівняннями:

$$U_1 = I_1 \cdot R_1; \quad U_2 = I_2 \cdot R_2; \quad U_3 = I_3 \cdot R_3;$$

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Це дозволяє знайти значення опорів  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ , обчислити загальний опір кола

$$R_{\text{заг.лів.}} = R_1 + R_{01} + \frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3}, \quad \text{силу} \quad \text{струму}$$

$I_{1,л} = E / R_{\text{заг.}}$ , і також  $I_{2,л} = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ ,  $I_{3,л} = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3}$ . Значення обчислених струмів повинні співпадати з результатами вимірювань.

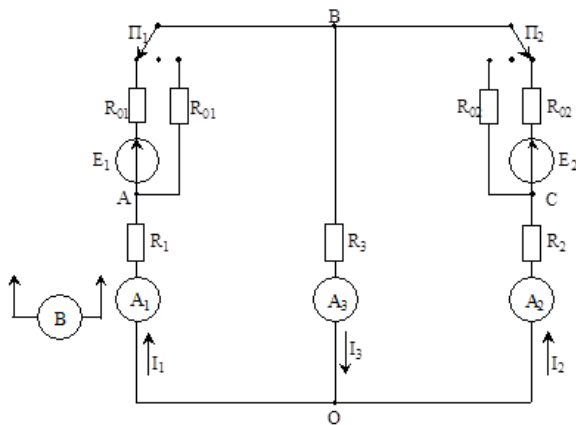


Рис. 1.2 Схема дослідження складного лінійного кола постійного струму

В правому положенні перемикачів найбільшим буде струм  $I_2 = I_1 + I_3$ . Обчислені за результатами вимірювань опори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$  повинні співпадати із попередніми, а загальний опір кола і обчислені значення струмів визначаються виразами:

$$R_{заг.нр.} = R_2 + R_{02} + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}, \quad I_{2нр.} = \frac{E_2}{R_{заг.нр.}}$$

$$I_{1нр} = I_{2нр} \frac{R_3}{R_1 + R_3}, \quad I_{3нр} = I_{2нр} \frac{R_1 + R_{01}}{R_1 + R_3}$$

Коли перемикачі знаходяться в крайніх положеннях, діють обидві ЕРС. Силу струму в кожній з гілок можна обчислити за методом накладання:

$$I_3 = I_{3,л} + I_{3,нр}; \quad I_1 = I_{1,л} - I_{1,нр}; \quad I_2 = I_{2,нр} - I_{2,л}$$

Значення виміряних струмів повинні співпадати з обчисленими.

Потенціал кожної точки електричного кола визначається напругою між даною точкою і точкою, потенціал якої прийнято нульовим. Потенціал може бути додатнім або від'ємним. ЕРС підвищує потенціал на величину  $E$  в напрямку своєї дії. Струм протікає в напрямку зменшення потенціалу – від більш високого до меншого. Потенціальна діаграма показує значення потенціалів окремих точок замкнутого контуру в залежності від опору між даною точкою кола і початковою точкою.

Потенціал будь-якої точки кола можна прийняти нульовим, як правило, приймають нульовим потенціал початкової точки.

Для електричного кола рис.1.2 з крайніми положеннями перемикачів потенціали окремих точок пов'язані такими рівняннями:

$$\varphi_0 = 0; \quad \varphi_A = \varphi_0 - I_1 \cdot R_1; \quad \varphi_B = \varphi_A + E_1 - I_1 \cdot R_{01},$$

$$\varphi_C = \varphi_B + I_2 \cdot R_{02} - E_3; \quad \varphi_0 = \varphi_C + I_2 \cdot R_2 = 0.$$

Знайдене останнє значення потенціалу точки О повинно співпадати з першим. Потенціальна діаграма має вигляд (рис.1.3)

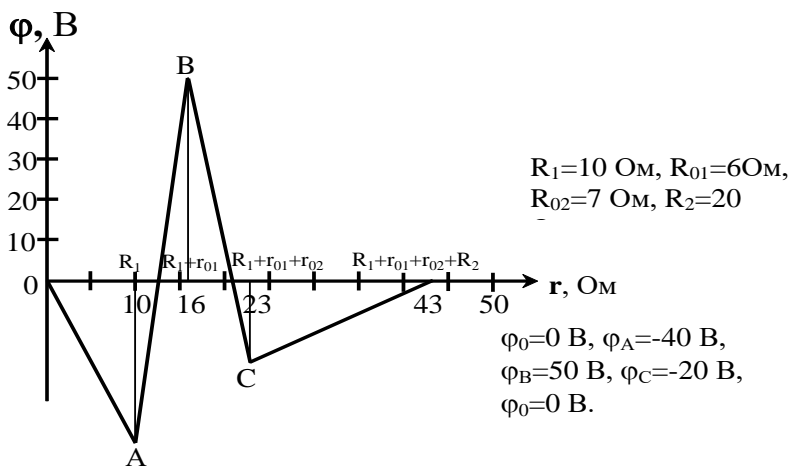


Рис 1.3 Приклад побудови потенціальної діаграми:

### Порядок виконання роботи.

1. Ознайомитися з джерелами електричної енергії, вимірювальними приладами та апаратами, які використовуються у роботі, занотувати їх дані.
2. Виміряти вольтметром ЕРС джерел  $E_1$  і  $E_2$  в режимі холостого ходу. В режимі навантаження виміряти силу струму і напругу в колі. Результати вимірювань занести до таблиці 1.1. Підрахувати значення  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ .

Таблиця 1.1.

Режим Роботи	Дані вимірювань				Підрахунки			
	$E_1$	$U_1$	$I_1$	$E_2$	$U_2$	$I_2$	$R_{01},$ Ом	$R_{02},$ Ом
Режим хх		–	–		–	–		
Навантаження	–			–				

3. Скласти електричну схему за рис. 1.2. Виміряти сили струмів  $I_1, I_2, I_3$  і напруги  $U_1, U_2, U_3$  для кожного режиму. Результати занести до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Режим Роботи	Дані вимірювань						Підрахунки		
	$I_1$	$U_1$	$I_2$	$U_2$	$I_3$	$U_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$E_1 \neq 0, E_2 = 0$									
$E_1 = 0, E_2 \neq 0$									
$E_1 \neq 0, E_2 \neq 0$									

4. Обчислити значення опорів  $R_1, R_2, R_3$  і порівняти їх значення. При розбіжності більше 5 відсотків повторити вимірювання.
5. Обчислити загальний опір електричного кола для кожного з режимів роботи і знайти значення всіх струмів. Для режиму роботи з джерелом ЕРС використати метод накладання. Результати обчислень занести до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3.

<b>Режим роботи</b>	$R_{\text{заг}}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
$E_1 \neq 0, E_2 = 0$				
$E_1 = 0, E_2 \neq 0$				
$E_1 \neq 0, E_2 \neq 0$	–			

6. Приймавши потенціал точки О за нульовий, виміряти потенціали точок А, В, С і полярність потенціалу (+ або –) для двох режимів роботи. Результати вимірювань занести до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4.

Режим роботи	$\varphi_0$	$\varphi_A$	$\varphi_B$	$\varphi_C$	$\varphi_D$
$E_1 \neq 0, E_2 = 0$					
$E_1 \neq 0, E_2 = 0$					

7. За результатами вимірювань і попередніх розрахунків опорів кола побудувати потенціальні діаграми.

*Висновки по роботі.*

1. Показати відповідність законів і методів, що перевіряються.
2. Порівняти дані дослідів і розрахунків.
3. Пояснити причини розбіжностей.

*Контрольні запитання.*

1. Чим відрізняються просте і складне електричне коло?
2. Як визначити з дослідів параметри елементів електричного кола ( $R, L, C$ )?
3. Якими приладами вимірюють напругу і силу струму, як їх вмикають і чому?
7. Як залежить напруга на затискачах джерела від навантаження?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Дослідження послідовного електричного кола змінного струму

МЕТА РОБОТИ: визначення параметрів елементів кола змінного струму і співвідношень між силою струму, напругами, потужностями і параметрами елементів, вивчення явища резонансу напруг, побудова векторних діаграм.

### Загальні положення

Основними пасивними елементами кола змінного струму являються (рис 2.1) резистори, котушки індуктивності і конденсатори. Резистори являються активним навантаженням, вони перетворюють електричну енергію в теплову, між миттєвими значеннями напруги і струму через резистор існує пропорційна залежність і вони споживають середню потужність  $P_R$

$$P_R = \frac{1}{2} I_m U_m = IU = RI^2 = \frac{1}{R} U^2$$

Тут  $I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m$ ,  $U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m$  - діючі значення сили струму і напруги.

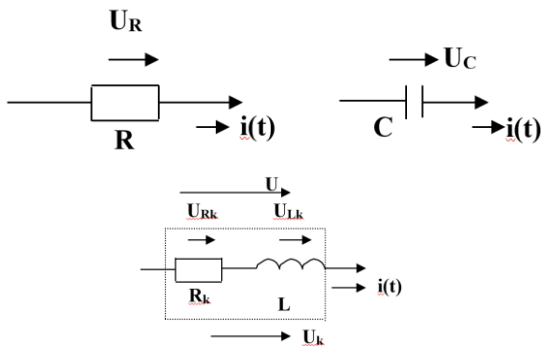


Рис. 2.1 Пасивні елементи кола змінного струму.

Котушка індуктивності має властивість накопичувати енергію магнітного поля  $W_M = \frac{Li^2}{2}$ , при збільшенні сили струму вона забирає енергію від джерела енергії, при зменшенні сили струму котушка повертає накопичену енергію в джерело – це реактивна енергія. При зміні сили струму в котушці виникає електрорушійна

сила самоіндукції  $e_L = -L \frac{di}{dt}$ . Напряга на котушці:

$$u_L(t) = -e_L = L \frac{di}{dt} (I_m \sin \omega t) = \omega L I_m \cos \omega t = X_L I_m \cos \omega t = U_{Lm} \cos \omega t.$$

Тут  $X_L = \omega L$  – реактивний опір котушки.

При протіканні струму через котушку частина енергії перетворюється в теплову, котушка має певний активний опір  $R_k$ , на якому відбувається падіння напруги  $U_{Rk}$ , і який споживає потужність  $P_{Rk}$ :

$$u_{rk}(t) = r_k i_k = r_k I_m \sin \omega t = U_{rk,m} \sin \omega t; \quad P_{rk} = \frac{1}{2} r_k I_m^2 = r_k I^2$$

Падіння напруги на котушці має дві складові: активна напруга  $U_{rk}$ , яка співпадає за фазою з протікаючим струмом і реактивна напруга  $U_i$ , яка випереджає струм на  $90^\circ$ . Повне падіння напруги на котушці  $U_k$  визначають за допомогою векторної діаграми (рис.2.2), на якій показано також кут зсуву фаз  $\varphi$  напруги і струму.

$$U_{km} = \sqrt{U_{Rk,m}^2 + U_{Lm}^2} = I_m \sqrt{R_k^2 + X_L^2} = I_m Z_k,$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{Lm}}{U_{Rk,m}} = \frac{R_k I_m}{X_L I_m} = \frac{R_k}{X_L} = \frac{R_k}{\omega L}$$

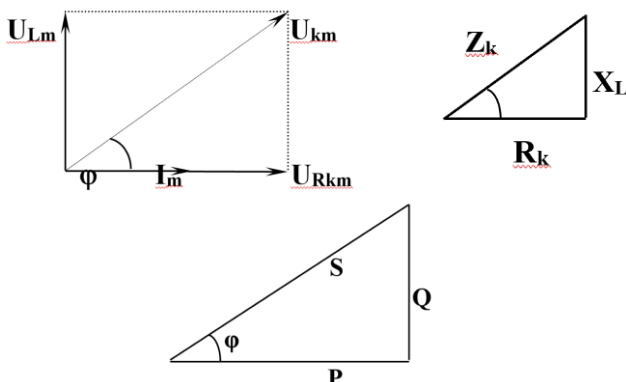


Рис.2.2 Векторні діаграми струму і напруги на котушці індуктивності – а, трикутник опорів – б, трикутник потужностей – в.

Якщо сторони трикутника напруг рис.2.2а розділити на силу струму  $I_m$ , одержимо трикутник опорів – рис.2.2б, у якого катетами являються активний  $R_k$  і реактивний  $X_L = \omega L$  опори, а гіпотенузою – повний опір  $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}$ . Якщо сторони трикутника напруг рис. 2а помножити на силу струму  $I_m$ , одержимо трикутник потужностей, у якого гіпотенуза -  $S = \frac{1}{2} U_{km} I_m = U_k I$  - повна потужність, а катети

$$Q = \frac{1}{2} U_{km} I_m \sin \varphi = U_k I \sin \varphi$$

$$\text{і } P = \frac{1}{2} U_{km} I_m \cos \varphi = U_k I \cos \varphi$$

- відповідно реактивна і активна потужності.

За результатами вимірювань сили струму  $I$  через котушку, падіння напруги  $U_k$  і потужності  $P$  можна визначити параметри котушки:

$$Z_k = \frac{U_k}{I}, \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad R_k = Z_k \cos \varphi = \frac{P}{I^2},$$

$$X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, \quad L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

Конденсатор (рис. 2.1 в) має властивість накопичувати електричні заряди і електричну енергію. При збільшенні напруги  $U_c$  на конденсаторі збільшується заряд  $q = C \cdot U$  на його обкладках і накопичена енергія  $W_E = C \frac{U^2}{2}$  - конденсатор споживає енергію від джерела енергії. При зменшенні напруги конденсатор віддає накопичену енергію джерелу енергії. Конденсатор як і котушка споживає реактивну енергію.

Сила струму  $i_c$  через конденсатор, який має ємність  $C$ , його заряд  $q$  і напруга  $u_c$  пов'язані рівняннями:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = \frac{d(U_c C)}{dt} = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}.$$

Якщо  $u_c = U_m \sin \omega t$ , то

$$i_c = \omega C U_m \cos \omega t = \frac{U_m}{X_c} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Тут  $x_c = \frac{I}{\omega C} = \frac{U_m}{I_m}$  - реактивний опір конденсатора

Конденсатори, як правило мають певні втрати енергії при їх перезарядці і споживають при цьому незначну активну потужність, кут зсуву початкових фаз напруги і сили струму конденсатора наближається до  $90^\circ$  – напруга відстає від сили струму ( рис. 2.3 ).

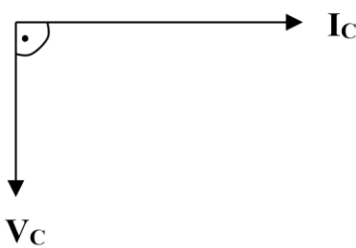


Рис.2.3. Векторна діаграма струму і напруг на конденсаторі

При послідовному з'єднанні резистора, котушки і конденсатора ( рис. 2.4. ) . через них протікає однаковий струм  $I$ , падіння напруги на кожному з елементів пропорційне опору цього елемента:

$$U_R = RI, U_K = Z_k I = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} I, U_c = X_c I.$$

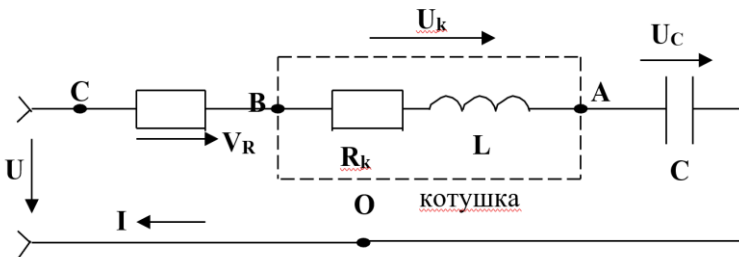


Рис.2.4. Послідовне з'єднання резистора, котушки і конденсатора.

Початкова фаза напруги  $U_R$  співпадає з фазою струму  $I$ , напруга на котушці  $U_k$  випереджає струм  $I$  на кут  $\varphi_k$ , а напруга на конденсаторі  $U_c$  відстає від струму на  $90^\circ$  (рис. 2.5.)

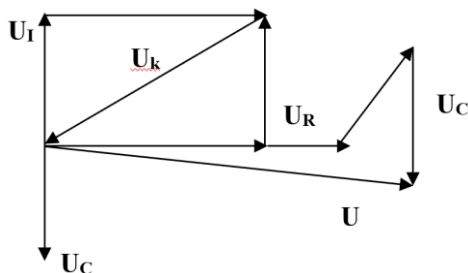


Рис. 2.5 Векторна діаграма струму і напруг при послідовному з'єднанні

Падіння напруги на конденсаторі  $U_c$  і на реактивному опорі  $X_L$  котушки  $U_L$  відрізняються початковими фазами на кут  $180^\circ$  і тому мають протилежні напрями і частково компенсуються. Загальний реактивний опір кола  $X$  визначається різницею реактивних опорів котушки і конденсатора:

$$X = X_L - X_c.$$

Якщо  $X_L = X_c$ , загальний реактивний опір кола  $X = 0$ , при цьому загальний опір кола являється чисто активним, загальна напруга і струм, співпадають за фазами. Це – послідовний резонанс, або резонанс напруг. При резонансі напруг напруга на реактивних елементах кола може значно перевищувати загальну напругу. Резонансу напруг можна досягти зміною частоти напруги, або зміною ємності конденсатора чи індуктивності котушки.

На рис. 2.6 зображена топографічна діаграма електричного кола, Точка  $O$  має нульовий потенціал. Потенціал точки  $A$  і її положення на комплексній площині визначається падінням напруги  $U_c$  на конденсаторі, положення точки  $B$  – геометричною сумою падінь напруг на конденсаторі і котушці, положення точки  $C$  – сумою падінь напруг на всіх елементах кола, яка співпадає з прикладеною до кола напругою  $U$ . Довжина кожного відрізка пропорційна числовому значенню відповідної величини і вибраному масштабу, кутове положення (напрямок) визначається початковою фазою даної величини.

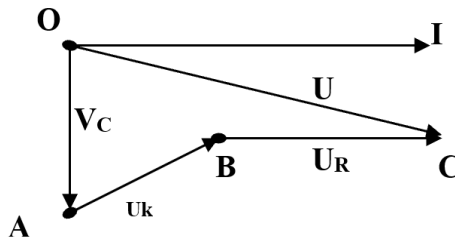


Рис.2.6. Топографічна діаграма електричного кола

### Порядок виконання роботи.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 2.7.

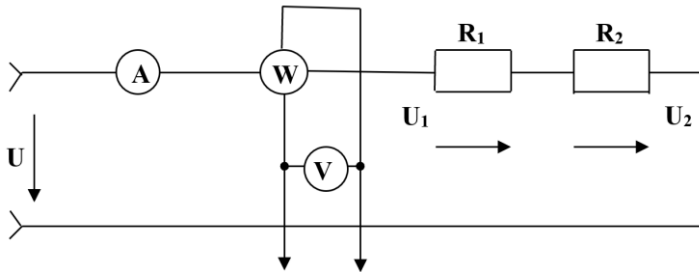


Рис. 2.7 Послідовне електричне коло

2. Встановити в колі струм 0,6 – 0,8 А при напрузі  $U=120 - 140\text{В}$ . Виміряти зазначені в таблиці 2.1. величини. Повторити вимірювання при зменшенні напруги  $U$  до 0,7, до 0,3 від початкової.

Таблиця 2.1

№ п/п	Дані вимірювань					Результати обчислень						
	U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	U <sub>1</sub> +U <sub>2</sub>	P <sub>1</sub> +P <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub> + R <sub>2</sub>	Cos φ
	В	В	В	Вт	Вт	Вт	В	Вт	О М	О М	ОМ	---
1.												
2.												
3.												

Перевірити відповідність загальної потужності  $P$ , напруги  $U$  і опору, значенням потужностей  $P_1$  і  $P_2$ , напруг  $U_1$  і  $U_2$ , опорів. Побудувати графіки залежностей  $U(I)$ ,  $U_1(I), U_2(I)$ ,  $P(I)$ ,  $P_1(I)$ ,  $P_2(I)$  і векторні діаграми струму і напруг.

3. Не змінюючи опору  $R_1$ , в електричному колі рис. 2.8 замінити реостат  $R_2$  котушкою індуктивності. Встановити в колі струм 0,5 – 0,6 А. Виміряти зазначені в таблиці 2.2 величини.

Таблиця 2.2.

Дані вимірювань							Результати обчислень											
I	U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Котушка					Все коло						
							Z <sub>k</sub>	R <sub>k</sub>	X <sub>L</sub>	cosφ <sub>k</sub>	φ <sub>k</sub>	L	R	Z	U <sub>a</sub>	U <sub>p</sub>	cos φ	
A	B	B	B	Вт	Вт	Вт	Ом	Ом	Ом	---	Град	Гн	Ом	Ом	B	B	---	

Перевірити відповідність загальної потужності P потужностям P<sub>1</sub> і P<sub>2</sub>. Визначити параметри котушки:

$$Z_k = U_2 / I, \quad R_k = P_k / I^2, \quad X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, \quad \cos \varphi_k = P / U^2 I, \\ L = X_k / 2\pi f.$$

Визначити параметри всього кола. Побудувати векторні діаграми і трикутники опорів котушки і всього кола.

4. Не змінюючи опору  $R_1$ , в попередньому електричному колі замінити котушку магазином конденсаторів. Установити ємність конденсатора C такою, щоб його реактивний опір  $X_c$  був таким же, як реактивний опір  $X_L$  котушки в попередньому досліді. Установити в колі струм 0,5 – 0,6А і виміряти зазначені в таблиці 2.3. величини.

Таблиця 2.3.

Дані вимірювань							Результати обчислень						
I	U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P	Конденсатор		Все коло				
							X <sub>c</sub>	C	R	Z	U <sub>a</sub>	U <sub>p</sub>	cosφ
A	B	B	B	Вт	Вт	Вт	Ом	мкф	Ом	Ом	B	B	---

При допущенні, що активний опір конденсатора незначний порівняно з його реактивним опором  $X_c$  за допомогою вимірювань обчислити параметри конденсатора і всього кола:

$$X_c = U_2 / I, \quad C = 1 / 2\pi f X_c, \quad R = P / I^2, \quad \cos \varphi = P / UI, \\ U_a = U \cos \varphi, \quad U_p = \sqrt{U^2 - U_a^2}.$$

Перевірити відповідність встановленого і розрахованого значень ємності  $C$  конденсатора і відповідність напруг  $U_2$  і  $U_p$ .

Побудувати векторну діаграму і трикутник опорів електричного кола.

5. Замінити в попередньому колі реостат  $r_1$  котушкою, скласти електричне коло за схемою рис. 2.8.

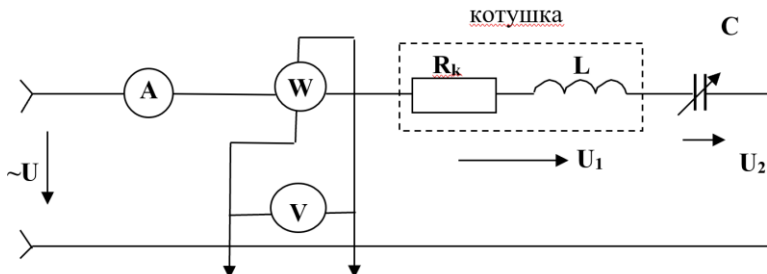


Рис.2.8. Послідовне електричне коло з котушкою і конденсатором.

Установити струм живлення  $0,8A$ . Змінюючи ємність конденсатора, установити в колі резонанс напруг за показами амперметра. Порівняти одержане значення ємності  $C_p$  з величиною ємності, розрахованою в попередньому досліді. Виміряти величини, зазначені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

№ п.п	Дані вимірювань						Результати обчислень			
	$C$	$I$	$U$	$U_1$	$U_2$	$P$	$X_c$	$C$	$\cos\varphi$	$\varphi$
	мкФ	A	B	B	B	Вт	Ом	мкФ	---	Гра д
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										



Повторити вимірювання при значеннях ємності  $C = 0,5C_p$  ;  $0,8C_p$ ;  $1,2C_p$ ;  $1,5C_p$ .

Розрахувати значення величин вказаних в таблиці 2.4:

$$X_c = U_2 / I, \quad C = 1 / 2\pi f X_c, \quad R = P / I^2, \quad \cos \varphi = P / UI, \\ |\varphi| = \arccos( P / UI ).$$

Побудувати в масштабі векторні діаграми струму і напруг для випадків  $C=C_p$ ,  $0,5C_p$ , та  $1,5C_p$ . Побудувати на одному рисунку, враховуючи знак  $\varphi$  графіки залежностей  $I(C)$ ,  $\cos \varphi(C)$ ,  $\varphi(C)$ .

6. Показати відповідність законів і фізичних процесів, що перевіряються.
7. Пояснити графіки залежностей  $I(C)$ ,  $\cos \varphi(C)$ ,  $\varphi(C)$ .
8. Зробити висновки по роботі.

### **Запитання і завдання для самоперевірки.**

1. За результатами вимірювань показати, як виконується другий закон Кірхгофа для комплексних напруг.
2. Як визначити межі вимірювань і ціну поділки ватметра?
9. Пояснити побудову векторних діаграм.
10. Зобразити і пояснити графіки залежностей  $I(C)$ ,  $\cos \varphi(C)$ ,  $\varphi(C)$ .
11. Пояснити умови, при яких виникає резонанс напруг, якими способами його можна досягти?
12. Які явища виникають при резонансі напруг? У чому небезпека резонансу напруг?
13. Написати вираз для напруг на конденсаторі і котушці при резонансі, порівняти їх величини.
14. Чому при резонансі напруга на котушці більша ніж на конденсаторі?
15. Як визначається  $Z$ ,  $X$ ,  $R$  розрахунковим шляхом?

# Лабораторна робота №3

## Дослідження паралельного електричного кола змінного струму

Мета роботи: дослідження кола змінного струму при паралельному з'єднанні елементів, дослідження явища резонансу струмів, визначення параметрів елементів кола і побудова векторних діаграм.

### Загальні положення

При паралельному з'єднанні елементів (Рис. 3.1) до них прикладають одну і ту ж напругу  $U$ .

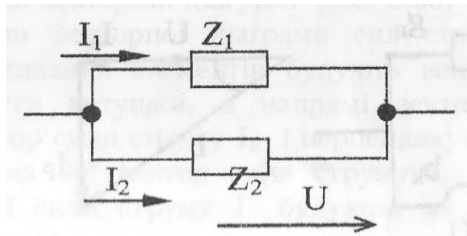


Рис. 3.1. Паралельне з'єднання елементів

Струми, які протікають в елементах кола, можна знайти за законом Ома і першим законом Кірхгофа:  $I_1 = U/Z_1 = U \cdot Y_1$ ;  $I_2 = U/Z_2 = U \cdot Y_2$ .  $I = I_1 + I_2 = UY_1 + UY_2 = U(Y_1 + Y_2) = UY_{екв}$ .

Тут  $Y_1 = 1/Z_1$ ,  $Y_2 = 1/Z_2$ ,  $Y_{екв} = Y_1 + Y_2$ ,  $Z_{екв} = 1/Y_{екв}$  – комплексні провідності і опори гілок, а також еквівалентна провідність  $Y_{екв}$  і опір  $Z_{екв}$  елемента, яким можна замінити паралельно з'єднані елементи  $Z_1$  і  $Z_2$ :  $Z_{екв} = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ .

Провідність вимірюється в сименсах:  $1\text{См} = 1/\text{Ом}$ .

Резистор з опором  $R$  має провідність  $g = 1/R$ , вона має активний характер. Струм  $I_R$  через резистор з провідністю  $g$ , до якого прикладено напругу  $U$ , співпадає за фазою з напругою  $U$ : Він споживає потужність  $P = UI = U^2 g$ .

Котушка індуктивності з повним опором  $Z_k = R_k + jX_L$  має провідність:  $y_k = 1/Z_k = 1/(R_k + jX_L) =$

$g_k - jb_k$ . Ця провідність має активну складову  $g_k$  і від'ємну реактивну складову  $b_k$ :  $g_k = R_k/Z_k^2$ ,

$$b_k = X_L/Z_k^2.$$

Котушку індуктивності можна уявити як паралельно з'єднані елементи: з активною провідністю  $g_k$  і реактивною провідністю  $-jb_k$  (рис. 3.2). До кожного з них прикладено напругу  $U$ , і через них протікають відповідно струми  $I_a = U \cdot g_k$  і  $I_p = U \cdot (-jb_k)$ . Струм  $I_a$  співпадає за фазою з напругою  $U$ , а струм  $I_p$  відстає на  $90^\circ$ , загальний струм  $I$  відстає від напруги на кут  $\phi_k = \arctg(I_p/I_a) = \arctg(b_k/g_k)$ . Котушка споживає активну потужність:  $P_k = U^2 \cdot g_k$ . Провідність котушки і її складові можна визначити за формулами:  $y_k = I/U$ ,  $g_k = P_k/U^2$ ,  $b_k = \sqrt{y_k^2 - g_k^2}$ .

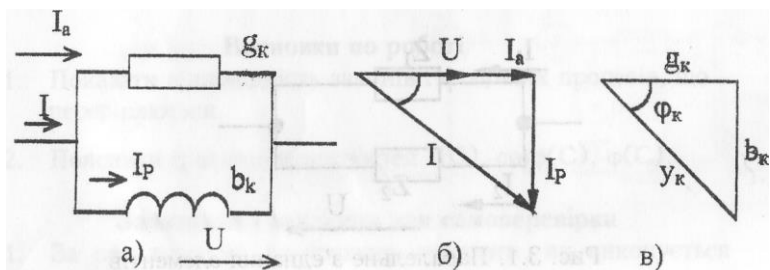


Рис. 3.2. Котушка індуктивності: а - паралельна схема заміщення, б - векторна діаграма, в - трикутник провідностей

На рис. 3.2 б показано векторну діаграму напруги і струмів для паралельної схеми заміщення (Рис. 3.2 а) котушки, а на рис. 3.2 в - трикутник провідностей. Дія побудови векторної діаграми напруги і струмів котушки відкладають в певному напрямі і масштабі вектори напруги  $U$  і активної складової сили струму  $I_a$  і перпендикулярно до них вектор реактивної складової сили струму  $I_p$ , яка відстає від напруги на  $90^\circ$ . Вектор повної сили струму  $I$  являється сумою векторів  $I_a$  і  $I_p$ .

Конденсатор має реактивну провідність:  $b_c = 1/XC = 2\text{Pf}$

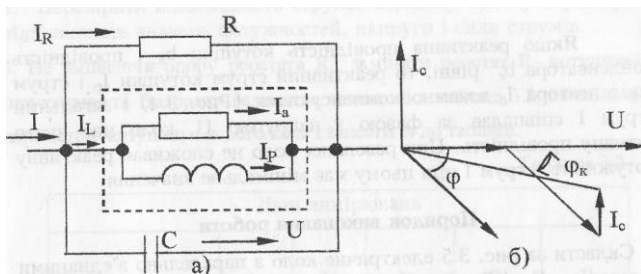


Рис. 3.3. Паралельне з'єднання резистора, конденсатора і котушки : а - електрична схема, б - векторна діаграма струмів

При паралельному з'єднанні резистора, котушки і конденсатора (Рис. 3.3 а) через них протікають струми  $I_R$ ,  $I_K$ ,  $I_C$ , показані на векторній діаграмі рис. 3.3б.

Для побудови векторної діаграми сил струму і напруги паралельного з'єднання елементів будують векторну діаграму струмів і напруги котушки, в напрямі вектора напруги  $U$  відкладають вектор сили струму  $I_K$  і перпендикулярно до них з випередженням на  $90^\circ$  вектор сили струму  $I_C$  конденсатора. Вектор загальної сили струму  $I$  будують, як векторну суму відповідних векторів.

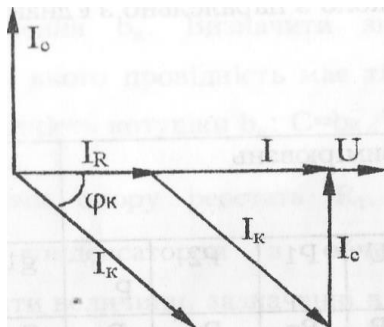


Рис. 3.4. Векторна діаграма при резонансі струмів

Якщо реактивна провідність котушки  $b_k$  і провідність конденсатора  $b_c$  рівні, то реактивний струм котушки  $I_p$  і струм конденсатора  $I_c$  взаємно компенсуються (Рис. 3.4) і загальний струм  $I$  співпадає за фазою з напругою  $U$ , коло має чисто активну провідність. При резонансі коло не споживає реактивну потужність, струм  $I$  при цьому має мінімальне значення.

### Порядок виконання роботи

1. Скласти за рис. 3.5 електричне коло з паралельно з'єднаними реостатами  $R_1$  і  $R_2$ . Встановити струм через кожен реостат в межах 0,3-0,6 А при загальному струмі до 1 А і напрузі до 100 В, виміряти і обчислити величини, вказані в таблиці 3.1

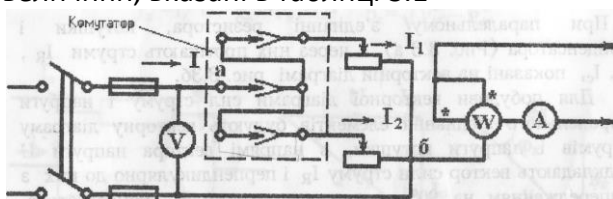


Рис. 3.5. Електричне коло з паралельно з'єднаними реостатами.

Таблиця 3.1

Дані вимірювань							Результати обчислень		
I	II	I2	U	P1	P2	P	g1	g2	g
A	A	A	B	Bт	Bт	Bт	См	См	См

2. Перевірити відповідність струмів першому закону Кірхгофа, відповідність значень потужностей, напруги і сили струмів.

3. Не змінюючи опору реостата  $R_1$  замінити реостат  $R_2$  котушкою індуктивності. Виміряти величини, зазначені в таблиці 3.2, обчислиш параметри котушки і всього кола і занести їх до таблиці.

Таблиця 3.2

Дані вимірювань											
I	$I_1$	$I_2$	U	$P_1$	$P_2$	P					
Результати обчислень											
Котушка				Все коло							
$Y_k$	$g_k$	$b_k$	$\cos\varphi_k$	$I_a$	$I_p$	$y$	$g$	$b$	$\cos\varphi$	$I_a$	$I_p$

4. Перевірити відповідність напруги, сили струму і потужності реостата і співвідношення інших величин. Визначити значення  $b_k$ . Визначити значення ємності  $C$  конденсатора, у якого провідність має таку ж величину, як реактивна провідність котушки  $b_k$ :  
 $C = b_k / 2\pi f$

5. Не змінюючи опору реостата  $R_1$ , замінити котушку індуктивності конденсатором з обчисленим значенням ємності. Виміряти величини, зазначенні в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Дані вимірювань							
I	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	U	P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	
A	A	A	B	Вт	Вт	Вт	
Результати обчислень							
конденсатор		Все коло					
b <sub>c</sub>	C	y	g	b	cosφ	I <sub>a</sub>	I <sub>p</sub>
См	<u>МКФ</u>	См	См	См		A	A

6. Перевірити співвідношення між виміряними значеннями напруги, сили струмів і потужностей. Обчислити значення  $b_c$  і  $C$ , перевірити відповідність обчисленого і встановленого значень ємності.

Таблиця 3.4

№	Дані вимірювань						<u>Рез. обчисл.</u>	
	C	U	I	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	P	cosφ	φ
1								
2								
3								
4								
5								

7. Замінити реостат  $R_1$  котушкою індуктивності. Змінюючи ємність  $C$  конденсатора, досягти резонансу струмів (при резонансі струмів

загальний струм  $I$  має мінімальне значення). Виміряти величини, зазначені в таблиці 3.4

8. Повторити вимірювання при значеннях ємності конденсатора 1,2 Срез, 1,5 Срез, 0,8 Срез, 0,5 Срез.

9. Побудувати в масштабі векторні діаграми струмів за даними таблиць 3.1 - 3.3 і таблиці 3.4 при значеннях ємності Срез, 0,5 Срез, 1,5 Срез.

10. Побудувати графіки залежностей  $I(C)$ ,  $\cos\phi(C)$ ,  $\phi(C)$  за даними таблиці 3.4.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Показати за даними вимірювань, як виконується перший закон Кірхгофа.

2. Пояснити побудову векторних діаграм.

3. При яких умовах виникає резонанс струмів? Якими способами можна досягти резонансу струмів?

4. Яке практичне використання має резонанс струмів?

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ЗІРКОЮ

Мета роботи:

1. Ознайомитись з особливостями симетричних та несиметричних режимів роботи при з'єднанні споживачів „зіркою” з нейтральним проводом та без нього.
2. Визначити призначення нейтрального (нульового) проводу.
3. Навчитися визначати потужність трифазного кола при симетричному та несиметричних режимах.
4. Побудувати за даними дослідів суміщені векторно-топографічні діаграми напруг та струмів при різних режимах роботи.

#### Теоретичні відомості

Трифазна система генерування, передачі та споживання енергії складається із трифазних генераторів (джерел) енергії, споживачів та три або чотири провідної лінії передачі енергії.

Якщо трифазний генератор генерує три синусоїдних електрорушійних сили однакової амплітуди і частоти, зсунутих по фазі одна до іншої на кут  $\alpha = q \frac{2\pi}{3}$ , ( $q= 1, 2$ ) то така система ЕРС називається симетричною. Порядок, в якому ЕРС слідують одна за одною, називають послідовністю фаз.

При  $q=1$  маємо прямий порядок слідування фаз, при  $q= 2$  – зворотний порядок.

В даній лабораторній роботі джерело ЕРС симетричне, внутрішнім опором джерела напруги, із-за його малої величини порівняно з опором навантаження, нехтуємо.



Частини електричного кола, по яких течуть струми однієї ж тієї фази, також називаються фазами, відповідні струми – фазовими струмами, діючі в фазах ЕРС і напруги називають фазовими ЕРС, фазовими напругами. Фази прийнято позначати літерами латинського алфавіту  $A, B, C$ . Відповідно такими ж індексами позначають фазні ЕРС, струми, напруги ( $E_A, E_B, E_C, U_A, U_B, U_C, I_A, I_B, I_C$ ) та інш.

Розрізняють фази генератора енергії і споживачів. Енергія від генераторів до споживачів передається по проводах, які називаються лінією передачі. Напруги між лінійними проводами називаються лінійними і позначаються відповідними індексами ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ). Струми, що протікають по лінійних проводах, також називаються лінійними. При з'єднанні споживачів „зіркою” лінійні струми дорівнюють фазним струмам

$I_L = I_\phi$ , а лінійні напруги дорівнюють геометричній різниці відповідних двох фазових напруг:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B; \quad \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C; \quad \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

У трифазного симетричного генератора діючі значення лінійних і фазних напруг завжди пов'язані співвідношенням  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ . У споживачів таке відношення є дійсним тільки при підключенні нейтрального проводу або у випадку однакового (рівномірного) навантаження всіх фаз.

Якщо електричне трифазне коло складається із симетричного генератора, лінії передачі і однакового навантаження фаз, то таке трифазне коло є симетричним і в ньому система напруг і система струмів також будуть симетричними. Величини фазних напруг в такому колі будуть за величиною рівними між собою і зсунутими по фазі на кут  $120^\circ$  одна відносно іншої.

Фазні струми, які дорівнюють  $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}}$ , також будуть по

величині рівними між собою і зсунутими по фазі на кут  $120^{\circ}$  один відносно іншого. Оскільки кути зсуву фаз між напругою і струмом у фазах залежать від характеру фазного опору і розраховуються за формулою  $\varphi_{\phi} = \arctg \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}}$ , то при рівномірному навантаженні вони

будуть однаковими.

Векторно-топографічну діаграму струмів і напруг симетричного трифазного кола при з'єднанні „зіркою” споживачів з активно-індуктивним опором зображено на рис.4.1.

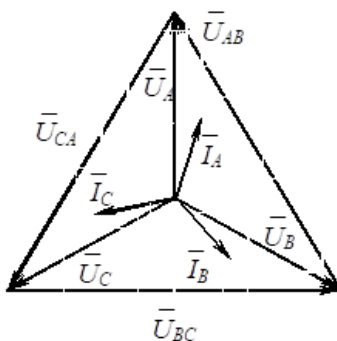


Рис. 4.1 Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні зіркою

При різному навантаженні фаз (споживач несиметричний) нульові (нейтральні) точки генератора „0” і споживача „0' ” з'єднують четвертим проводом. Трифазна система в цьому випадку є чотирипроводною. Це необхідна умова для того, щоб при будь-якому нерівномірному навантаженні фаз система фазних напруг на споживачах залишалась симетричною, а фазні струми і кути зсуву фаз, як і в попередньому випадку, залежали лише від величини і характеру опору конкретної фази.

Струм в нейтральному проводі дорівнює геометричній (векторній) сумі фазних струмів:  $\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$ .

При виконанні роботи зверніть увагу на фазні напруги споживача при нерівномірному навантаженні і відсутності нейтрального проводу. Більша напруга буде в тій фазі, де є більшим опір споживача, і вона буває вищою від норми, на яку розраховані споживачі.

Векторно-топографічні діаграми для несиметричних режимів роботи трифазного кола при наявності нейтрального проводу і при відсутності його зображені, відповідно, на рис.4.2, а і 3.2, б Характер опорів споживачів – активний.

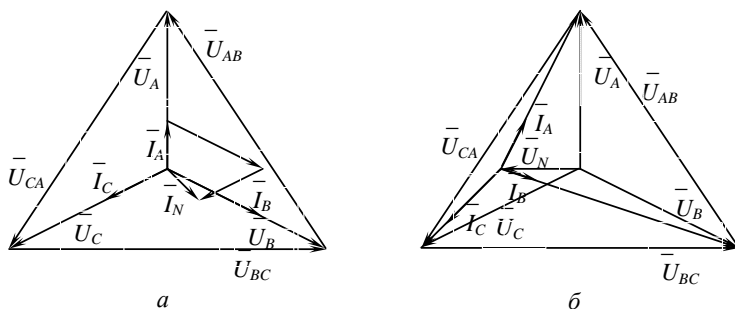


Рис. 4.2

Активні  $P_\phi$ , реактивні  $Q_\phi$  і повна потужності фаз при будь-якому режимі роботи розраховуються за формулами:

$$P_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos\varphi_\phi;$$

$$Q_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin\varphi_\phi;$$

$$S_\phi = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2} = U_\phi \cdot I_\phi.$$

Повна потужність всього трифазного кола, з'єднаного „зіркою”, при нерівномірному навантаженні фаз розраховується в такій послідовності:

спочатку розраховують загальні активну і реактивну потужності всього трифазного кола і лише потім повну потужність.

Загальна активна потужність кола дорівнює арифметичній сумі активних потужностей фаз:  $P = P_A + P_B + P_C$ , загальна реактивна потужність дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей фаз:  $Q = Q_A + Q_B + Q_C$ . (ємнісна потужність записується із знаком „-“).

Повна потужність: 
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При рівномірному навантаженні повна потужність трифазної системи:

$$S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}}.$$

### Послідовність виконання і завдання роботи

1. Скласти електричне трифазне коло згідно з рис.4.3.

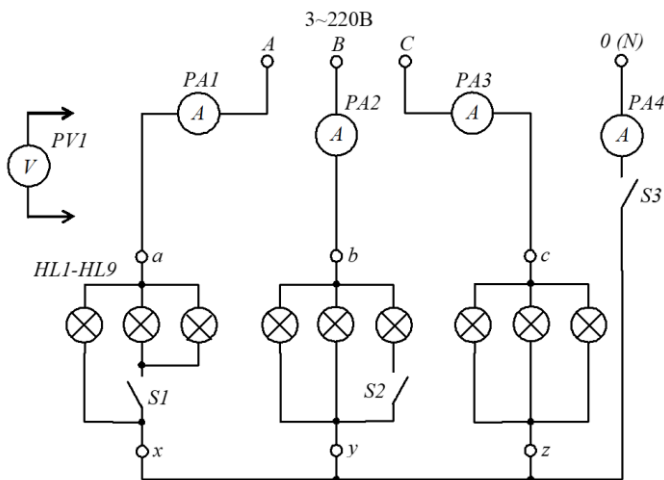


Рис. 4.3 Трифазне електричне коло

2. Підключити однакове активне навантаження фаз з нейтральним проводом. Ввімкнути джерело трифазної напруги і записати показання амперметрів. При рівномірному навантаженні показання амперметрів, які вимірюють лінійні (фазові) струми, мають бути однаковими, а струм в нейтральному проводі має дорівнювати нулю.

Якщо це не так – з'ясувати причину і записати в висновках.

3. Одним вольтметром із щупами виміряти величини усіх лінійних і фазових напруг, а також напругу між нейтральними точками генератора і споживачів. Результати вимірювань записати в табл. 3.1.

4. Відключити нейтральний провід. Виконати аналогічні вимірювання (пп.2,3) і результати вимірювань записати в табл.4.1. Дані вимірювань порівняти з попередніми вимірюваннями і зробити висновки.

5. Установити нерівномірне активне навантаження в фазах спочатку з нейтральним проводом, потім без нього. Виміряти величини струмів і напруг в обох випадках. Дані вимірювань записати в таблицю, проаналізувати результати вимірювань і записати в висновках по роботі.

6. Попередньо вимкнути джерело напруги і від'єднати один із лінійних проводів. Виконати вимірювання напруг і струмів з нейтральним проводом і без нього.

Таблиця 4.1.

РЖИМ КОЛА	Результати вимірювань											Результати розрах.			
	Лінійні напруги			Фазові напруги			$U_{00'}$	Лінійні (фазові) струми			$I_0$	Фазові активні потужності			Загальн а потужн. кола $P$
	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_C$	$U_A$	$U_B$	$U_C$		$I_A$	$I_B$	$I_C$		$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P$
	В	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт
1															
2															
3															
4															
5															
6															

### Опрацювання результатів дослідів

7. Розрахувати активні потужності кожної фази та всього трифазного кола. Дані розрахунків записати в табл. 4.1

8. Побудувати векторно-топографічні діаграми струмів і напруг для кожного досліджуваного режиму навантаження.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### Дослідження однофазного трансформатора

Мета роботи: вивчення будови трансформатора, вимірювання коефіцієнта трансформації, втрат потужності в котушці і магнітопроводі трансформатора, визначення коефіцієнта корисної дії (к. к. д.).

#### 5.1. Загальні теоретичні положення

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм такої ж частоти але іншої напруги.

Трансформатор складається з первинної і вторинної обмоток і феромагнітного осердя. Первинна обмотка приєднується до джерела електричної енергії, вторинна - до споживача. Змінний струм, який протікає в первинній обмотці, створює в котушці змінне магнітне поле. Для концентрації магнітного поля і збільшення магнітного потоку використовують феромагнітне осердя. Магнітний потік пронизує витки вторинної обмотки і створює електрорушійну силу  $E_2$  (явище електромагнітної індукції):

$$E_2 = -W_2 \frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

ЕРС  $E_2$  вторинної обмотки - пропорційна кількості витків вторинної обмотки і швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi$ .

Підвищуючий трансформатор збільшує в певне число раз напругу та у стільки ж раз зменшує силу струму. Понижуючий трансформатор навпаки - зменшує напругу і збільшує силу струму при незмінній (без врахування втрат) потужності, тому повна потужність трансформатора:  $S=U_1 \cdot I_1=U_2 \cdot I_2$ .

Тут  $U_1, U_2$  - діючі значення напруги на первинній і вторинній обмотках трансформатора,  $I_1, I_2$  - сила струму. Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$n=U_1/U_2=I_1/I_2=W_1/W_2.$$

Обмотки трансформатора мають певний активний опір, при роботі трансформатора вони нагріваються. Товщина дроту, з якого виконується кожна обмотка трансформатора, визначається силою струму в обмотці при повному (номінальному) навантаженні.

Струм вторинної обмотки також створює магнітне поле, але воно є розмагнічуючим - компенсує магнітне поле первинної обмотки. При збільшенні сили струму вторинної обмотки відповідно збільшується сила струму первинної обмотки трансформатора.

При роботі трансформатора не вся споживана ним потужність надходить до навантаження - частина потужності втрачається в трансформаторі. Крім втрат в обмотках трансформатора, частина потужності втрачається у феромагнітному осердді. Змінне магнітне поле створює в осердді вихрові струми. Для зменшення цих втрат осерддя виконують з тонких ізольованих одна від другої сталевих пластин.

При намагнічуванні осерддя воно накопичує енергію магнітного поля, при розмагнічуванні енергія магнітного поля повертається в електричне коло. Намагнічування і розмагнічування осерддя проходить згідно з кривою намагнічування, яка має петлю гістерезису. Тому в кожному циклі перемагнічування частина енергії, відповідно до площі петлі гістерезису, втрачається.

Втрати в котушках визначають в режимі короткого замикання, за схемою рис. 5.1. Напругу  $U_1$  короткого замикання визначають при номінальних значеннях сил струму в обмотках трансформатора. Показники ватметра визначаються втратами в обмотках трансформатора. Через невелику напругу короткого замикання (кілька відсотків від номінального значення) відбувається незначне намагнічування осерддя і відповідно незначні втрати потужності в осердді.



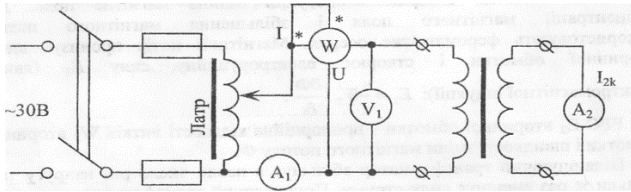


Рис. 5.1. Схема дослідження режиму КЗ трансформатора

Втрати в осерді визначаються в режимі холостого ходу, який характеризують силою струму холостого ходу. Цей струм має величину до 10% від номінального. Тому втрати енергії в котушках незначні, і ватметр в схемі рис. 5.2 показує втрати в осерді.

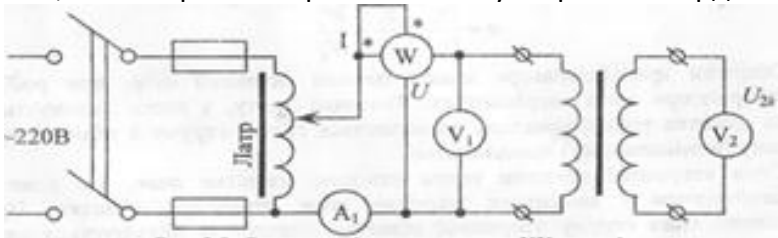


Рис. 5.2 Схема дослідження режиму холостого ходу трансформатора

В робочому режимі ватметр  $W_1$ , показує потужність споживану від мережі, а ватметр  $W_2$  - потужність, яка надходить до споживача. Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається їх відношенням:

$$ККД = P_2/P_1 \cdot 100\%.$$

В режимі ХХ і незначному навантаженні напруга  $U_2$  вторинної обмотки визначається величиною ЕРС, яка виникає у вторинній обмотці. З ростом навантаження через втрати у обмотках напруга  $U_2$  зменшується.

## 5.2 Порядок виконання роботи

1. Провести зовнішній огляд трансформатора, ознайомитися з конструкцією магнітопроводу, розташуванням обмоток, записати паспортні дані трансформатора, обчислити номінальні струми  $I_{н1}$ ,

$I_{H2}$  коефіцієнт трансформації.

2. Скласти коло відповідно до схеми (рис. 5.1), використовуючи прилади, які мають відповідні межі вимірювань. Шляхом зміни напруги -  $U$  і опору реостату  $Я$  встановити номінальні значення струмів первинної і вторинної обмоток трансформатора і визначити напругу короткого замикання  $U_{1K}$ . Результати вимірювань записати до табл. 5.1:

Таблиця 5.1

Режим роботи	Дані вимірювань						Результати обчислень		
	$I_2$	$U_2$	$P_2$	$I_1$	$U_1$	$P_1$	$K$	$\cos\phi$	ккд
Коротке замикання								-	-
Холостий хід	-		-					-	-
Режим навантаження									

3. Скласти коло відповідно до схеми (рис. 5.2). Дослідити холостий хід трансформатора при номінальній напрузі на первинній обмотці. Результати вимірювань записати до табл. 5.1.

4. Скласти коло відповідно до схеми (рис. 5.3), підібрати опір навантаження  $R_{сп}$ , щоб одержати струм  $0,1 I_{H2}$  через споживач при номінальному значенні напруги  $U_{1H}$  на вході трансформатора, записати результати вимірювань до табл. 5.1. Змінюючи опір навантаження  $R_{сп}$ , повторити вимірювання при струмах  $0,25 I_H$ ,  $0,5 I_H$ ,  $0,75 I_H$ ,  $I_H$ , та  $U_1=U_{1H}$ .

5. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора, якісний показник трансформатора і струм ХХ:

$$K = \frac{U_{1H}}{U_{2XX}}; U_K = \frac{U_{1K3}}{U_{1H}} 100\%; I_X = \frac{I_{1XX}}{U_{1H}} 100\% .$$

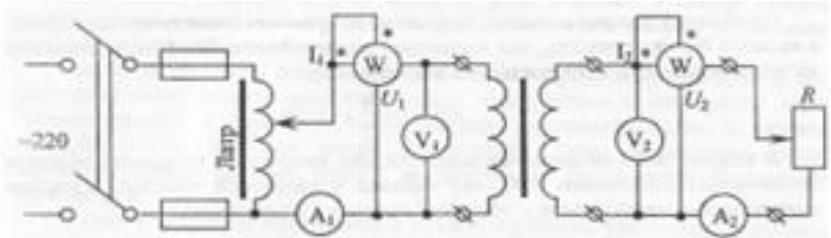


Рис. 4.3 Схема дослідження трансформатора у робочому режимі

- За даними дослідів короткого замикання і холостого ходу визначити ККД при номінальному навантаженні:

$$ККД = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + P_{K3} + P_{1XX}} 100\% .$$

- Побудувати характеристики трансформатора при активному навантаженні

$$U_2 = f(I_2), I_1 = f(I_2), \cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1} = f(I_2), ККД = f(I_2).$$

- Визначити процентну зміну напруги  $U_2$ :

$$\Delta U\% = \frac{U_{2XX} - U_{2H}}{U_{2H}} 100\% .$$

- Зробити висновки по роботі.

### 5.3 Запитання і завдання для самоперевірки

- Для чого призначені трансформатори?
- Поясніть будову і принцип дії трансформатора?
- Як визначити коефіцієнт трансформації?
- Чому при зміні сили струму у вторинній обмотці змінюється сила струму первинної обмотки?
- Як визначити ККД трансформатора?
- Поясніть природу втрат у трансформаторі?
- Для чого в трансформаторі використовують феромагнітне осердя.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### Дослідження трифазного генератора

Мета роботи: вивчення побудови і роботи трифазного синхронного генератора, вимірювання і аналіз основних характеристик генератора.

#### Загальні положення

Основними елементами генератора являються статор і ротор (Рис. 6.1). в пазах статора розміщені три обмотки (А-Х, В-У, С-З), зміщені на  $120^\circ$  одна від одної. Ротор може бути постійним магнітом, або електромагнітом, який живиться постійним струмом. Для цього ротор має 2 кільцевих контакти, до яких через щітки поступає електричний струм. Силкові лінії магнітного поля замикаються через статор. При обертанні ротора його магнітне поле обертається разом з ротором і перетинає обмотки статора, в яких збуджуються електрорушійні сили синусоїдної форми. Частота ЕРС співпадає з швидкістю обертання ротора: час 1 оберту ротора являється періодом синусоїдної напруги. Для одержання частоти 50 Гц необхідно мати швидкість обертання ротора:  $n = 50 \cdot 60 = 3000$  об/хв.

Оскільки обмотки зміщені одна відносно другої на кут  $120^\circ$ , то їх електрорушійні сили відрізняються початковими фазами на третину періоду, тобто на  $120^\circ$ .

Кожна обмотка статора являється фазою генератора, напруги  $U_{AX}$ ,  $U_{BY}$ ,  $U_{CZ}$  являються фазними напругами. Оскільки сума цих напруг  $U_{AX} + U_{BY} + U_{CZ} = 0$ , обмотки можуть бути з'єднані послідовно - з'єднання трикутником. Або кінці Х, У, Z всіх обмоток з'єднують в загальну точку О, а до початків обмоток А, В, С приєднують провідники, які передають електричну енергію споживачам - з'єднання зіркою. Якщо обмотки фаз генератора однакові, то діючі значення фазних напруг рівні  $U_{OA} = U_{OB} = U_{OC}$ . При з'єднанні зіркою лінійні напруги - напруги між провідниками лінії передачі також рівні і в  $\sqrt{3}$  раз більші фазних напруг:  $U_A = \sqrt{3}U_\phi$

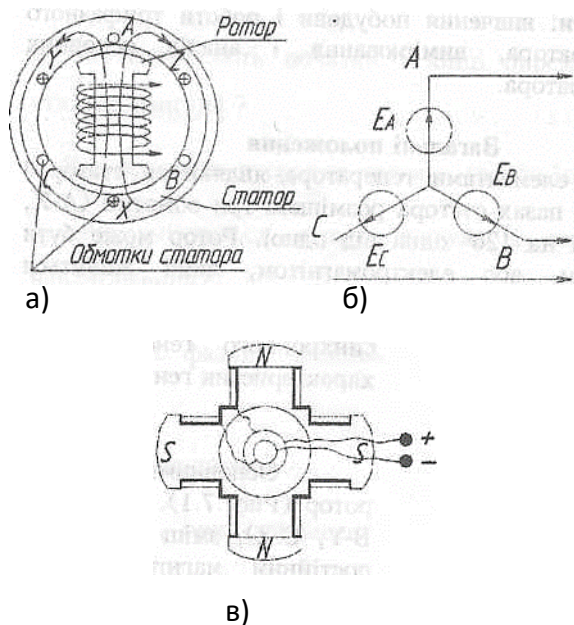


Рис. 6.1. Трифазний синхронний генератор: а - з одною парою полюсів, в - ротор генератора з двома парами полюсів, б - їх електрорушійні сили

Ротор генератора показаний на рис. 6.1 в, має дві пари полюсів, кожна обмотка статора такого генератора має дві половини, зміщені на  $180^\circ$ : обмотки інших фаз зміщені на кут  $180^\circ : 3 = 60^\circ$ . Час повороту ротора на  $180^\circ$  являється періодом синусоїдної напруги, в обмотках статора збуджуються ЕРС подвоєної частоти - при обертанні ротора із швидкістю  $n = 1500$  об/хв. частота ЕРС  $f = 50$  Гц.

Досліджуваний трифазний синхронний генератор змінного струму Г221 має ротор з 6 парами полюсів. Кожна фазна обмотка статора генератора поділена на 6 частин, зміщених на кут  $360^\circ : 6 = 60^\circ$ . Обмотки різних фаз зміщені на кут  $60^\circ : 3 = 20^\circ$ . Частота ЕРС в обмотках генератора в 6 раз перевищує швидкість обертання ротора. При швидкості обертання до 10000 об/хв. частота ЕРС генератора може досягати значення:  $f = 6 \cdot 10000 : 60 = 1000$  Гц.

Це зумовлює значну потужність генератора при порівняно

невеликій масі. Синхронний трифазний генератор змінного струму Г221 являється основним джерелом енергії на автомобілях ВАЗ. Створюваний генератором змінний струм перетворюється в постійний вмонтованим в кришку генератора напівпровідниковим випрямлячем. Номінальна напруга постійного струму - 12 В, номінальний струм при 10000 об/хв. і збільшенні напруги до 14 В - 42 А. Потужність генератора близька до 500 Вт. Максимальний струм генератора - 53 А.

Корпус генератора складається із статора та передньої і задньої кришок. Статор виконано із 19-20 пластин трансформаторної сталі товщиною  $1 \pm 0,5$  мм. Загальна товщина статора 20 мм. На внутрішній циліндричній поверхні статора вирізано 36 пазів, в яких розміщена трифазна обмотка статора.

Характеристики генератора визначають його робочі властивості, вони показують залежність між, основними параметрами генератора, якими являються: ЕРС статора  $E$ , напруга  $U$  на його затискачах, сила струму  $I_n$  в навантаженні, сила струму  $I_{зб}$  збудження і швидкість  $n$  обертання якоря. Всі характеристики генератора визначають при сталій швидкості обертання, при зміні швидкості обертання міняються всі характеристики.

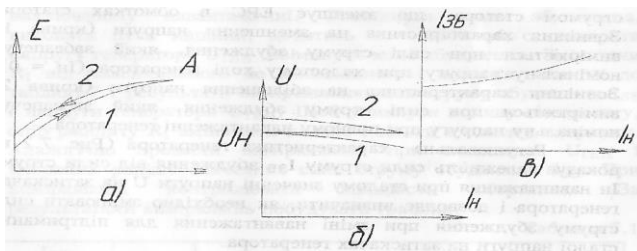


Рис. 6.2. Характеристики генератора: а - холостого ходу, б - зовнішня, в - регульовальна

Характеристика холостого ходу генератора показує залежність ЕРС статора від сили струму збудження при вимкненому навантаженні  $I_n = 0$  і незмінній швидкості обертання.

При  $I_{зБ} = 0$  магнітне коло генератора має певний залишковий магнітний потік  $F_{зл}$ , який збуджує в обмотці статора початкову електрорушійну силу  $E_0$ . При збільшенні сили струму збудження відбувається намагнічування магнітної системи генератора - сталюого ротора і статора, магнітний потік зростає згідно з кривою намагнічування до насичення осердя. Відповідно збільшується і електрорушійна сила  $E$ , як показано на рис. 6.2 (крива 1). Якщо зменшувати (від точки А) силу струму збудження, електрорушійна сила також буде зменшуватись (крива 2). Відмінність залежностей визначається впливом гістерезису кривої намагнічування сталі.

Зовнішня характеристика генератора (Рис.6.2 б) показує залежність напруги  $U$  на затискачах генератора від сили струму  $I_n$  навантаження при сталих силі струму збудження  $I_{зБ} = \text{const}$  і швидкості обертання. При зростанні навантаження збільшується падіння напруги наопорі обмотки статора. Одночасно, внаслідок реакції статора відбувається розмагнічування ротора струмом статора, що зменшує ЕРС в обмотках статора.

Зовнішня характеристика на зменшення напруги (крива 1) вимірюється присилі струму збудження, який забезпечує номінальну напругу при холостому ході генератора ( $I_n = 0$ ). Зовнішня характеристика на збільшення напруга (крива 2) вимірюється

присилі струму збудження, який забезпечує номінальну напругу при повному навантаженні генератора.

Регульовальна характеристика генератора (Рис. 6.2 в) показує залежність сили струму  $I_{зБ}$  збудження від сили струму  $I_n$  навантаження при сталому значенні напруги  $U$  на затискачах генератора- і дозволяє визначити, як необхідно змінювати силу струму збудження при зміні навантаження для підтримання сталої напруга на затискачах генератора.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з установкою, звернути увагу на конструкцію трифазного генератора і первинного двигуна.
2. Скласти електричне коло за рисунком:

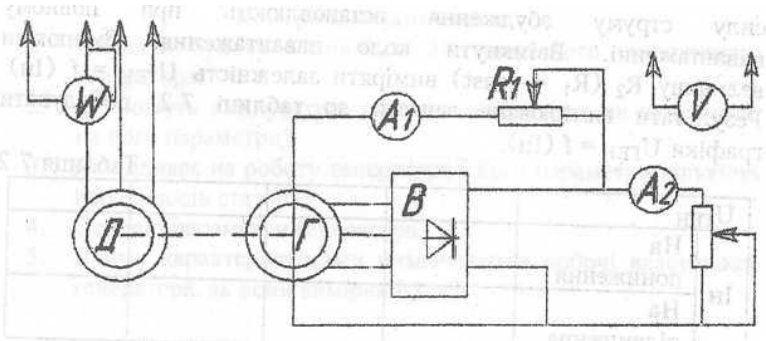


Рис. 6.3. Схема дослідження трифазного генератора: Д - первинний двигун, Г - трифазний генератор, В – трифазний випрямляч.

3. Провести вимірювання характеристики холостого ходу  $U_{ГЕН} = f(I_{ЗБ})$  при постійній швидкості обертання  $n = \text{const}$  і виключеному навантаженні. Розімкнути коло збудження, виконати пуск машини, добитись  $n = 3000$  об/с, виміряти напругу генератора  $U_{ГЕН}$ . Ввімкнути коло збудження. Змінюючи  $R_1$  від максимального до мінімального і навпаки, занести до таблиці 5.1 результати вимірювання сили струму збудження  $I_{ЗБ}$  і напруги генератора  $U_{ГЕН}$ . Щоб уникнути впливу гістерезису, опір реостату  $R_1$  змінювати плавно і тільки в одному напрямку. Аналогічно провести вимірювання при зменшенні  $U_{ГЕН}$  і вибраних раніше значеннях сили струму збудження  $I_{ЗБ}$ . При вимірюванні контролювати швидкість обертання. За результатами вимірювань побудувати графіки.

Таблиця 6.1

$I_{ЗБ}$						
$U_{ГЕН} \uparrow$						
$U_{ГЕН} \downarrow$						



Таблиця 6.2

	$U_{ГЕН}$				
Ін	На пониження				
	На підвищення				

4. Провести вимірювання зовнішньої характеристики генератора  $U_{ГЕН} = f(I_n)$  при  $n = \text{const}$  на пониження (силу струму  $I_{ЗБ}$  встановлюють в режимі ХХ) і підвищення, коли силу струму збудження встановлюють при повному навантаженні. Ввімкнути коло навантаження. Змінюючи величину  $R_2$  ( $R_1 = \text{const}$ ) виміряти залежність  $U_{ГЕН} = f(I_n)$ . Результати вимірювань занести до таблиці 6.2, побудувати графіки  $U_{ГЕН} = f(I_n)$ .

5. Провести вимірювання регульовальної характеристики генератора  $U_{ГЕН} = \text{const}$  при  $n = \text{const}$ . Змінюючи  $R_1$  встановлювати напругу<sup>1</sup> генератора  $U_{ГЕН} = 13,5$  В. Змінюючи навантаження (опір  $R_2$ ) визначити значення необхідної сили струму збудження  $I_{ЗБ}$  для одержання напруги  $U_{ГЕН} = 13,5$  В. Виконати 5-6 вимірювань. Результати занести до таблиці 5.3, побудувати графік  $I_{ГЕН} = f(I_n)$ .

Таблиця 6.3

$I_{ЗБ}$					
$I_n$					

6. Провести вимірювання фазних  $U_{AO}$ ,  $U_{BO}$ ,  $U_{CO}$  і лінійних  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  напруг, спостерігати на екрані осцилографа і зарисувати форму фазних напруг. Результати вимірювань занести до таблиці 5.4.

Розрахувати відношення -  $U_L/U_\Phi$

Таблиця 6.4

$U_{AO}$	$U_{BO}$	$U_{CO}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_L/U_\Phi$

**Контрольні запитання.**

1. Пояснити будову і принцип дії трифазного синхронного генератора .
2. Як можуть з'єднуватись обмотки генератора, як це впливає на його параметри?
3. Як впливає на роботу генератора і його параметри кількість пар полюсів статора?
4. Основні параметри генератора.
5. Якими характеристиками визначаються робочі властивості генератора, як вони вимірюються?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

### Дослідження термопар

Мета роботи: вивчити конструктивні особливості термопар, принцип дії, дослідити характеристики та параметри термопар.

#### Загальні теоретичні положення

##### Термометри

Термометром називають пристрій для вимірювання температури шляхом перетворення її в деякий сигнал, який є функцією температури.

В залежності від принципу дії, в промисловості використовуються наступні термометри:

Термометри розширення, принцип дії яких ґрунтується на зміні об'єму рідини (рідинні), або лінійних розмірів твердих тіл (дилатометричні і біметалічні), в залежності від температури.

Границі вимірювання температури такими термометрами складають від  $-190^{\circ}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ .

Манометричні термометри, в яких в залежності від температури змінюється тиск рідини, парорідинної суміші, або газу в замкнутому об'ємі.

Вони застосовуються для вимірювання температур від  $-50^{\circ}$  до  $+630^{\circ}\text{C}$ .

##### Термометри електричного ОПОРУ.

їх робота основана на зміні електричного опору різних матеріалів при зміні температури.

Діапазон вимірювання температур такими термометрами становить від  $-200^{\circ}$  до  $+650^{\circ}\text{C}$  для металевих та від  $-90^{\circ}$  до  $+180^{\circ}\text{C}$  для напівпровідникових термометрів (термісторів).

##### Термоелектричні термометри (термопари).

Принцип дії термопар ґрунтується на ефектах Томпсона та Зеебека.

Ефект Томпсона заключається у тому, що при нерівномірному нагріванні провідника з електронною

провідністю електрони дифундують з більш гарячого кінця в сторону холодного кінця. При цьому гарячий кінець заряджається додатньо, а холодний - від'ємно (рис.7.1).

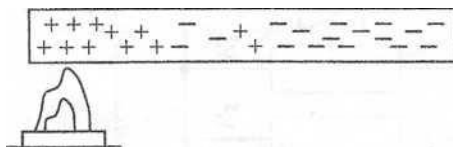


Рис. 7.1 Ефект Томпсона

Ефект Зеебека проявляється в тому, що в спаях різних провідників виникає контактна різниця потенціалів, яка викликана дифузією вільних електронів із провідника, де їх концентрація більша в той провідник, де їх менше.

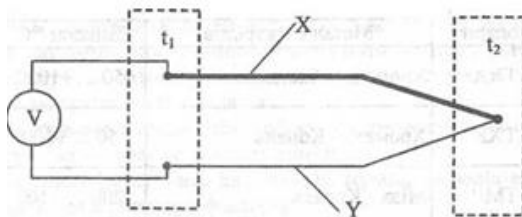


Рис. 6.2 Схема визначення термо ЕРС

Загальна електрорушійна сила термопар (термо ЕРС), обумовлена ефектами Томпсона і Зеебека являється функцією температур  $t_1$  та  $t_2$  та залежить від фізичної природи провідників X і Y (рис.7.2).

$$E=K(t_1- t_2)$$

Якщо температуру холодних кінців їх підтримувати постійною, то термо- ЕРС буде залежати тільки від зміни температури гарячого спаю. Це дозволяє градуувати вимірювальний прилад в одиницях температури.

В якості термоелектродів X і Y застосовують такі метали і сплави, які дають більшу термо ЕРС (табл. 7.1).

В залежності від матеріалів термоелектродів термопар виготовляють із неблагородних, благородних та тугоплавких металів та сплавів.

Термопары із благородних металів і ставів використовують для вимірювання температури до +1000°C. Виготовляються з дроту діаметром 1,2 ... 3,2 мм. різних металів.

Перевагами таких термопар є їх відносно низька вартість та висока чутливість.

Недоліком являється те, що вони не можуть працювати в агресивних середовищах (газів або парів).

Термопары із благородних металів стійкі до агресивних факторів, але мають досить велику вартість та низьку чутливість. Виготовляються з дроту діаметром 0,3 ... 0,5 мм. В якості металів використовуються платина (Pt), родій (Rh) та їх сплави. Верхня межа вимірювання температури складає +1400°C.

Термопары із тугоплавких металів та сплавів використовуються для вимірювання високих температур (до +3000°C).

В якості металів використовуються вольфрам (W), реній (Re) та їх сплави.

Такі термопары можуть працювати тільки у вакуумі або нейтральному середовищі.

В табл. 6.1 приведені основні характеристики деяких термопар.

Таблица 7.1

Тип термопары		Метал електродів	Діапазон	Чутливість
Із благородних металів	ТХА	Хромель - Алюмель	-50 ... +1000	$4 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$
	ТХК	Хромель - Копель	-50... +600	$7 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$
	ТМР	Мідь - Копель	-200 ... +100	$5 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$
Із благородних металів	ТПП	Платинородій (10%Rh) - Платина	-20...+1800	$0,7 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$
	ТПР	Платинородій (30% Rh) - Платинородій (6%Ші)	300 ...+1600	$0,5 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$
Тугоплавкі	ТВР	Вольфрамореній (~5%Re) - Вольфрамореній	0 ... +2200	$1,3 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$
	ВМ	Вольфрам - Молібден	0 ... +2000	$0,9 \frac{\text{тВ}}{100^\circ\text{C}}$

## Конструктивне оформлення термоперетворювачів

Конструкції термоелектричних перетворювачів досить різноманітні і залежать від їх призначення.

На рис.7.3 приведено схематичне зображення типової конструкції

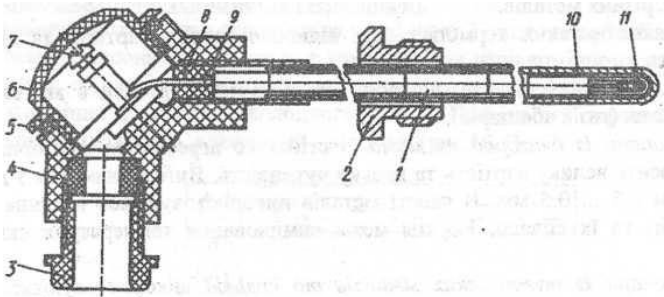


Рис.7.3 Конструкція термоелектричного перетворювача

Гарячі кінці термоелектродів 9 зварені між собою робочим спаєм 11. Вони ізолювані один від одного по всій довжині ізоляторами 1 та розміщені в арматурі 10.

Вільні кінці термопари підключені до контактів 7, які розташовані в головці 4, закритій кришкою з прокладкою 5.

Позитивний електрод підключається до клеми зі знаком Герметизація виводів термоелектронів 9, здійснюється епоксидним компаундом 8. Робочі виводи термопари ізолюються від захисної арматури керамічним наконечником. Термопара може мати штуцер 2, для кріплення на технологічному обладнанні і штуцер 3 для підключення з'єднувальних провідників вимірювальних приладів.

Ізоляція термоелектродів між собою в захисному чохлі і від корпусу арматури суттєво впливає на точність вимірювань.

Захисна арматура служить для захисту термоелектродів від механічних пошкоджень та дії агресивних факторів.

Термоелектроди ізолювані між собою та корпусом керамічними шайбами.

Матеріалом для виготовлення захисної арматури служать високолеговані сталі, а також жаростійкі сплави на основі Fe, Ni, Cr, Al, Si, Mn. Інколи захисну трубку виготовляють із кварцового скла (SiO<sub>2</sub>).

## 7.2. Опис лабораторної установки

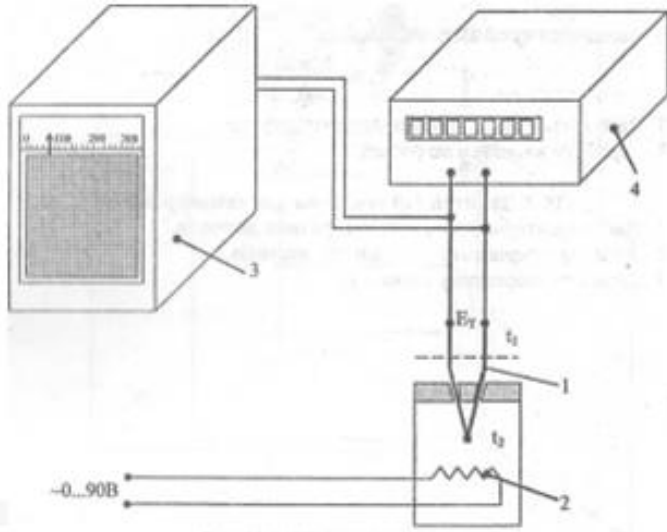


Рис. 6.4 Лабораторна установка  
 1- термопара; 2- термостат; 3- прилад КСП2 для вимірювання  $t^{\circ}C$ ; 4- цифровий мілівольтметр.

## 7.3 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з теоретичним матеріалом
2. Зібрати схему (рис. 6.4),
3. Включити відповідні прилади схеми.
4. Вимірюючи значення  $i^{\circ}$  через кожних  $5^{\circ}$  за допомогою приладу КСП2, визначити залежність термо ЕРС від температури, та залежність температури від часу:  $E_T = \int(t^{\circ}c)$ ,  $t^{\circ}c = \int(T)$
5. Заповнити табл. 7.2

Таблиця 7.2

<i>t, °C</i>	0	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	
<i>E<sub>p</sub>, мВ</i>																											
<i>T, с</i>																											

6. Визначити чутливість термопар:

$$K_T = \frac{E(\text{тВ})}{100(\text{C}^\circ)}$$

7. Визначити тип термопар, що досліджується.

8. . Зробити висновки по роботі.

### 6.3 Запитання і завдання для самоперевірки

1. Дати характеристику дилатометричних датчиків.
2. Дати характеристику біметалевих датчиків.
3. Дати характеристику термопар