

**Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія**

**Методичні вказівки
до лабораторних робіт з дисципліни
„Електротехніка, промислова електроніка,
електрообладнання”**

**(для студентів неелектротехнічних
спеціальностей)**

Частина 1

34 11.05.2012.

Краматорськ 2007

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Методичні вказівки
до лабораторних робіт з дисципліни
„Електротехніка, промислова електроніка,
електрообладнання”

(для студентів неелектротехнічних спеціальностей)

Частина 1

Затверджено
на засіданні методичної ради
Протокол № 16 від 22.06.2006

Краматорськ 2007

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни „Електротехніка, промислова електроніка та електрообладнання” для студентів неелектротехнічних спеціальностей/ Укл.: О.М.Наливайко, Т.В.Кірієнко. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – Ч.1. – 69 с.

Наведені вказівки до виконання лабораторних робіт 1...10, мета і програма лабораторних досліджень, основи теорії та розрахункові формули, принципіальні схеми лабораторних установок і їх опис, методика обробки експериментальних даних, література та контрольні питання.

Укладачі:

О.М.Наливайко, доц.
Т.В.Кірієнко, ас.

Відповідальний
за випуск

О.М.Наливайко, доц.

СОДЕРЖАНИЕ

Вступ.....	4
1 Лабораторна робота 1. Дослідження електровимірювальних приладів	5
2 Лабораторна робота 2. Дослідження джерела електричної енергії.....	11
3 Лабораторна робота 3. Дослідження кола постійного струму.....	17
4 Лабораторна робота 4. Дослідження нелінійних кіл постійного струму.....	23

ВСТУП

Метою вивчення електротехнічних дисциплін є теоретична і практична підготовка бакалаврів і інженерів неелектротехнічних спеціальностей в області електротехніки й електроніки в такому ступені, щоб вони могли вибирати необхідні електротехнічні, електронні, електровимірювальні пристрої, уміти їх правильно експлуатувати і складати разом з інженерами-електриками технічні завдання на розробку електричних частин автоматизованих установок для керування виробничими процесами.

Основними задачами вивчення дисципліни є:

- формування у студентів мінімально необхідних знань основних електротехнічних законів і методів аналізу електричних, магнітних і електронних кіл;
- принципів дії, властивостей, областей застосування і потенційних можливостей основних електротехнічних, електронних пристроїв і електровимірювальних приладів;
- основ електробезпечності; уміння експериментальним способом і на основі паспортних і каталожних даних визначати параметри і характеристики типових електротехнічних і електронних пристроїв; використовувати сучасні обчислювальні засоби для аналізу стану і керування електротехнічними елементами, пристроями і системами.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Мета роботи: експериментально вивчити властивості електровимірювальних приладів, які застосовуються в лабораторних дослідженнях дисципліни „Електротехніка та основи електроніки”.





Стислі теоретичні відомості

Залежно від принципу дії найчастіше застосовуються такі системи приладів: магнітоелектрична, електромагнітна, термоелектрична, індукційна, електродинамічна, електростатична, теплова, електронна.

За родом вимірюваної величини електровимірювальні прилади поділяються на: вольтметри (для замирювання напруги); амперметри (для замирювання струму); ватметри (для замирювання електричної потужності); лічильники (для замирювання електричної енергії); омметри, мегомметри (для замирювання електричного опору); частотоміри (для замирювання частоти змінного струму); фазометри (для вимірювання кута зсуву фаз) і тому подібні.

Призначення приладу показано на його шкалі (I амперметр, V вольтметр, W ватметр). Окрім цільового призначення на шкалі вимірювального приладу знаходяться такі позначки.

Різновидність струму, на який розрахований прилад:

-  - прилад для використання в колах постійного струму;
-  - прилад для використання в колах змінного струму;
-  - універсальний прилад, який використовується як в колах постійного, так і в колах змінного струму;
-  - прилад, що використовується в колах трифазного струму.


Система вимірювального механізму приладу:


 - прилад магнітоелектричної системи;

 - прилад електромагнітної системи;

 - прилад індукційної системи.

Робоче положення приладу:

 - горизонтальне;

 - вертикальне;

 45° – під кутом до горизонту.

Клас точності приладу:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Напруга, при якій випробувана ізоляція приладу:



ізоляція приладу випробувана при нарузі 2 кВ.

Виконання приладу в залежності від умов експлуатації:

A – для закритих опалюваних приміщень;

Б – для закритих неопалюваних приміщень;

В – для польових та морських умов.

Усі вимірювальні прилади (в тому числі найточніші) дають приблизне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка приладу – це різниця між вимірюваною величиною та її дійсним значенням:

$$\Delta X = X - X_{\partial}, \quad (1.1)$$

де ΔX - абсолютна похибка;

X - значення вимірюваної величини;

X_{∂} - дійсне значення вимірюваної величини.

При перевірці за X приймають показ робочого приладу, що перевіряється, за X_{∂} - показ більш точного, зразкового приладу. Абсолютна похибка виникає через систематичні (температура, радіація, електромагнітні поля, недосконалі методи вимірювання і т.п.) та випадкові похибки, а також через помилку операторі.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_{\partial}} \cdot 100\% \quad \text{або} \quad \gamma = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

Відносна похибка характеризує результат вимірювання, вона залежить від того, яку величину X вимірюють. Враховуючи те, що абсолютна величина ΔX для різних позначень шкали приладу змінюється незначно, беремо її як $\Delta X \approx 0,1$ А і підраховуємо відносну погрішність при вимірюванні різних значень струму амперметром з межою вимірювання 5 А.

При вимірюванні струму 5 А (граничне значення цього приладу)

$$\gamma_5 = \frac{0,1}{5} \cdot 100\% = 2\% .$$

При вимірюванні струму 1 А

$$\gamma_1 = \frac{0,1}{1} \cdot 100\% = 10\% .$$

При вимірюванні струму 0,5 А

$$\gamma_{0,5} = \frac{0,1}{0,5} \cdot 100\% = 20\% .$$

З прикладу видно, що зі зменшенням значення вимірюваної величини відносна похибка вимірювання необмежено зростає (рис.1.1), а мінімальне її значення – при вимірюванні найбільшої величини, що доступна цьому приладу. Звідси напрашується висновок: для вимірювання необхідно

підібрати прилад з такою межею вимірювання, при якій вимірювана величина знаходилася б в останній третині шкали приладу.

Мінімальне значення відносної похибки зветься зведеною похибкою:

$$\gamma_{np} = \frac{|\Delta X_{\max}|}{X_{\max}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

де X_{\max} - максимальне значення, доступне вимірюванню даним приладом, по-іншому, максимальне значення його шкали. Клас точності приладу – це зведена похибка, виражена у відсотках.

За класом точності приладу і його шкали можна знайти абсолютну похибку приладу (максимально можли-

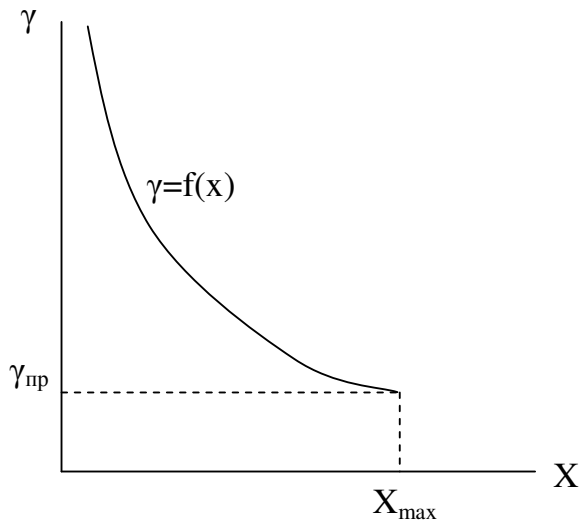


Рисунок 1.1 – Залежність відносної похибки від вимірюваної величини

ву) і відносну похибку результату виміру.

Приклад. Магнітоелектричний вольтметр має шкалу 0...150 В і клас точності 1,5. Визначити абсолютну і відносну похибки замирювання цим вольтметром напруги 20 та 100 В, записати дійсні значення вимірюваної напруги.

Абсолютна похибка вольтметра (максимально можлива при умові, що вольтметр відповідає своєму класу точності 1,5):

$$\Delta U = \frac{\gamma_{np} U_{\max}}{100\%} = \frac{1,5\% \cdot 150}{100\%} = 2,25 \text{ В.}$$

Відносна похибка вимірювання напруги 20 В:

$$\gamma_{20} = \frac{\Delta U}{U_{20}} \cdot 100\% = \frac{2,25}{20} \cdot 100\% = 11,25\% ;$$

дійсне значення вимірюваної напруги:

$$U_{20\partial} = U_{20} \pm \Delta U = (20 \pm 2,25) \text{ В.}$$

Відносна похибка вимірювання напруги 100 В:

$$U_{100} = \frac{\Delta U}{U_{100}} \cdot 100\% = \frac{2,25}{100} \cdot 100\% = 2,25 ;$$

дійсне значення вимірюваної напруги:

$$U_{100\partial} = U_{100} \pm \Delta U = (100 \pm 2,25) \text{ В.}$$

Поправкою називається взята з протилежним знаком абсолютна похибка

$$a = -\Delta X.$$

З формули (1.1)

$$a = -(X - X_0), \quad X_0 = X + a. \quad (1.4)$$

Таким чином, поправка – це те, що слід алгебраїчно додати до результату виміру, щоб одержати дійсне значення вимірюваної величини.

Процес визначення поправок вимірювального приладу називається його перевіркою. Перевірку здійснюють зрівнянням показу приладу, що перевірялись з показом зразкового, що має більш високий клас точності. Перевірці підлягають всі оцифровані поділки шкали приладу. Одержані в результаті перевірки поправки дозволяють зробити висновок про те, чи відповідає прилад своєму класу точності, а також побудувати криву поправок у вигляді, що зображений на рис. 1.2.

Ця крива дозволяє вносити поправки в результати виміру для підвищення його точності.

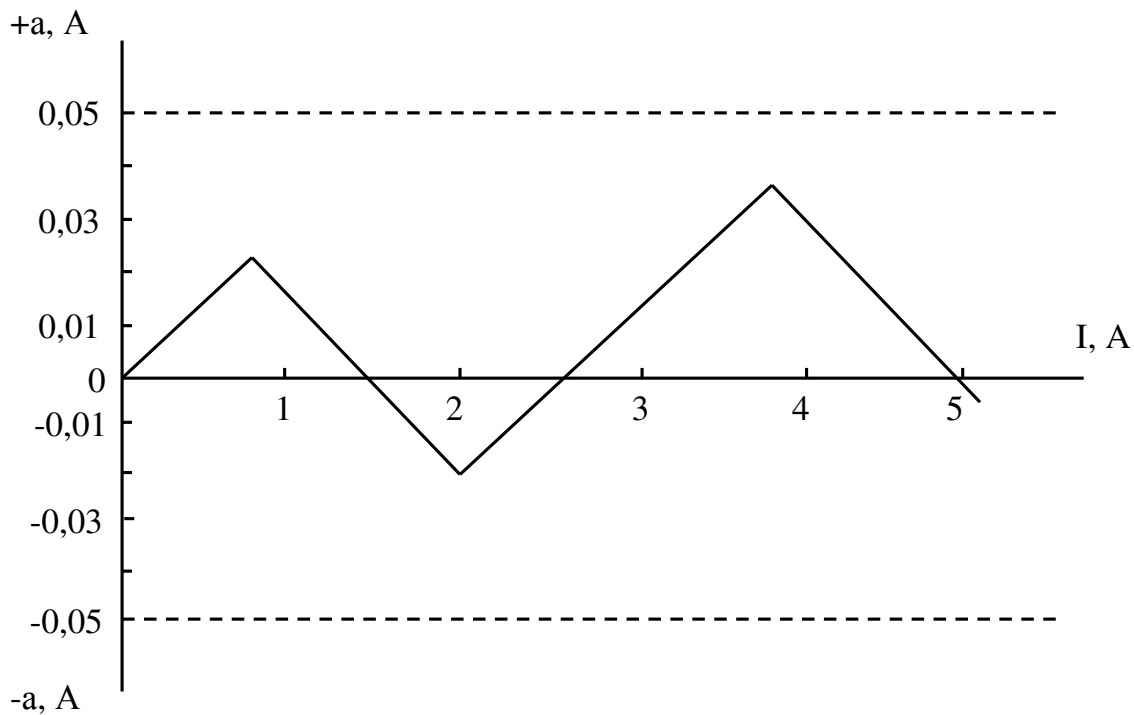


Рисунок 1.2 – Приблизний вид кривої поправок для амперметра зі шкалою 0-5 А та класом точності 1,0; пунктирні – межі найбільшої похибки

Опис лабораторного обладнання

Електричну схему лабораторної установки збирають згідно з рис.1.3.

Вона складається з наступних елементів:

- джерело електричної енергії постійного або змінного струму (на рис.1.3 показано підключення лабораторної установки до джерела постійного струму);
- реостат, що складається з опорів R_1 та R_2 для обмежування струму в вимірюваному полі;
- перевірюючий амперметр pA магнітоелектричної системи з межею вимірювання $0 \dots 1$ А;
- зразковий амперметр pA_0 магнітоелектричної системи з межею вимірювання $0 \dots 1$ А;
- перевірюємий вольтметр pV магнітоелектричної системи з межею виміру $0 \dots 30$ В;
- зразковий вольтметр pV_0 магнітоелектричної системи з межею виміру $0 \dots 30$ В;
- ватметр pW електродинамічної системи з межею виміру за струмом 1А та напругою 30 В.

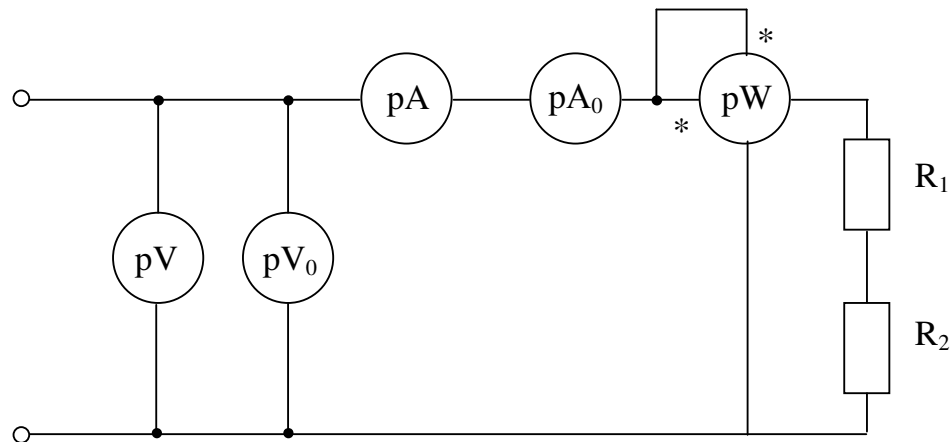


Рисунок 1.3 – Електрична схема лабораторної установки

1 Зібрати електричне коло (див. рис. 1.3). Здійснити перевірку амперметра pA , для чого з допомогою R_2 , змінюючи струм у колі, установити стрілку перевірюючого амперметра на всі цифрові поділки шкали, записуючи при цьому показ зразкового амперметра pA_0 . Результати вимірів занести до табл.1.

2 Здійснити перевірку вольтметра pV , для чого повільно підвищувати напругу, встановлюючи стрілку вольтметра, що перевіряється pV , на всі цифрові поділки шкали, записувати при цьому покази зразкового вольтметра pV_0 . Результати замірів занести до табл.1.

Таблиця 1 – Результати замірів

Виміряно	Показ приладу, що перевіряється, А					
	Показ зразкового приладу, А					
Вираховано	Абсолютна похибка приладу, А					
	Поправка, А					
Виміряно	Показ приладу, що перевіряється, В					
	Показ зразкового приладу, В					
Вираховано	Абсолютна похибка, В					
	Поправка, В					

Примітка до п.1 та 2. При перевірці амперметра та вольтметра струм і напругу в колі виміру змінювати таким чином, щоб стрілка у перевірюючих приладах переміщувалась послідовно тільки в одному напрямку, наприклад від нульової поділки шкали до максимальної. „Перескакувати” чергові поділки і вертати стрілку назад не слід.

Після закінчення перевірки амперметра і вольтметра записати основні дані перевірюваних та зразкових приладів:

- тип приладу;
- заводський номер;
- система виміру;
- клас точності.

3 Визначити ціну поділки ватметра і заміряти потужність, споживаючу реостатом R_1 і R_2 при максимально можливому струмі. Записати при цьому покази амперметра і вольтметра. За результатом вимірної потужності визначити величину сумарного опору реостата R_1 , R_2 .

4 Замінивши зразкові прилади амперметром і вольтметром електромагнітної системи, підключити коло до джерела електричної енергії змінного струму. Провести перевірку амперметра і вольтметра наведеної системи відповідно до п.1, 2.

Обробка результатів експерименту

За результатами перевірки амперметра і вольтметра побудувати криві поправок, на яких відмітити межі максимально можливих абсолютних похибок приладів, що витікають з їх класів точності. Зробити висновки про відповідність перевірюваних приладів своїм класам точності.

При визначенні вимірної потужності ціна поділки ватметра визначається з вираження

$$C_w = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{N},$$

де C_W - ціна поділки ватметра, Вт/поділ;

U_{\max} - межа виміру ватметра за напругою;

I_{\max} - межа виміру ватметра за струмом;

N - кількість поділок шкали ватметра.

Вимірене значення потужності порівняти з обчисленим, використовуючи вираз для потужності

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 R,$$

з останнього відношення визначити величину реостата R_1, R_2 .

Контрольні питання

- 1 Пояснити принцип дії вимірювального механізму магнітоелектричної, електромагнітної та електродинамічної системи.
- 2 Що називається абсолютною похибкою виміру?
- 3 Як визначається відносна похибка виміру?
- 4 Що називається класом точності вимірювального приладу?
- 5 Чому рекомендується застосовувати вимірювальний прилад так, щоб стрілка відхилилась по можливості на більший кут?
- 6 Що називається поправкою?
- 7 Яка мета перевірки приладу? Як здійснюється перевірка?
- 8 Для чого потрібен графік поправок приладу?
- 9 Як по класу точності приладу знайти його максимальну абсолютну похибку?
- 10 Які класи точності установлені ГОСТом?
- 11 Як визначається ціна поділки ватметра?
- 12 Як себе ведуть прилади магнітоелектричної системи в колах змінного струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Мета роботи: експериментально досліджувати режим роботи джерела електричної енергії постійного струму.

Стислі теоретичні відомості

Основними параметрами джерела електричної енергії є його електрорушійна сила E і внутрішній опір R_0 (рис.2.1).

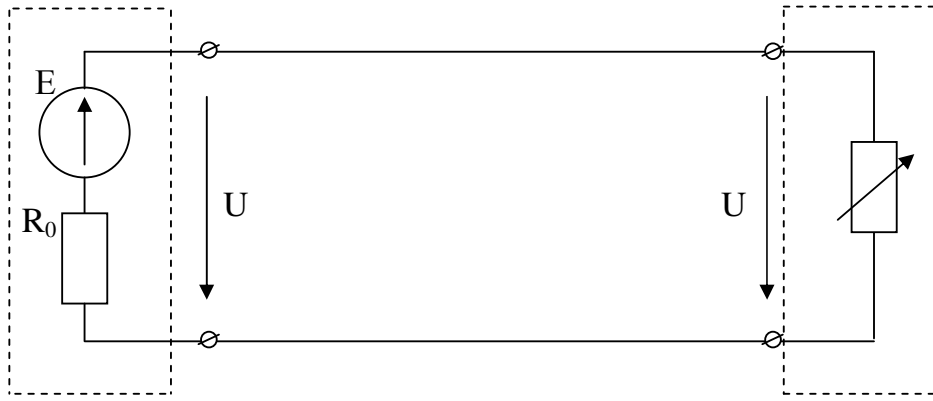


Рисунок 2.1 – Схема найпростішого електричного кола

За законом Ома для кола, що зображене на рис.2.1,

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (2.1)$$

або

$$U = E - IR_0, \quad (2.2)$$

де $U = IR$ - напруга на затискачах приймача електричної енергії (вона ж і напруга на затискачах джерела).

Вираз 2.2 визначає зовнішню характеристику джерела, тобто залежність напруги на його затискачах від струму в колі (рис.2.2).

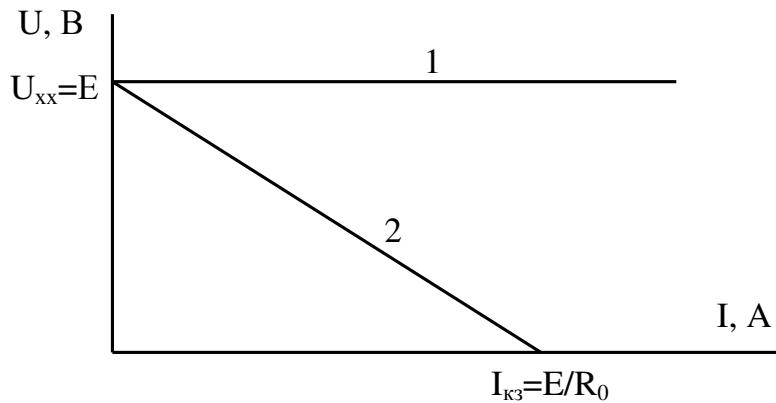


Рисунок 2.2 – Зовнішня характеристика ідеального (1) та реального (2) джерела електричної енергії

Характерними для джерела є такі режими роботи:

1 Режим холостого ходу. У цьому режимі приймач вимкнтий, тобто $R=\infty$ (коло розірване), $I=0$ і, як наслідок з виразу (2.2), напруга на зажимах джерела

$$U_{xx} = E.$$

2 Режим короткого замикання. Здійснюється при замкнutih накоротко затискачах джерела ($R=0$). Струм в колі в цьому випадку максимальний

$$I_{кз} = \frac{E}{R_0}.$$

3 Проміжні режими наявні при $0 < R < \infty$.

Серед нескінченної множини проміжних режимів характерним є узгоджений режим.

Узгодженим режимом називається такий режим електричного кола, при якому потужність P_2 , що віддається джерелом приймачу, має найбільше значення. Змінною величиною при цьому є опір приймача R .

Для визначення величини R , при якій потужність P_2 буде максимальною, необхідно взяти похідну $\frac{dP_2}{dR}$ і прирівняти її до нуля, причому вираз для потужності P_2 береться у вигляді

$$P_2 = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R + R_0} R. \quad (2.3)$$

У результаті маємо:

$$R = R_0. \quad (2.4)$$

Тобто максимум потужності, що віддається споживачу, спостерігається при рівності опору приймача внутрішньому опору джерела.

Знайдемо вираз ККД кола:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + R_0)} = \frac{R}{R + R_0}. \quad (2.5)$$

У такому випадку при $P_2 = P_{2\max}$ ККД кола

$$\eta = \frac{R}{R + R_0} = \frac{R}{2R} = 0,5.$$

Таким чином, з одного боку, для одержання найбільшої потужності в навантаженні необхідно прагнути до рівності $R=R_0$. При цьому ККД кола рівен усього 0,5. З другого боку, для одержання високого ККД необхідно, щоб R_0 прямувало до нуля (при $R_0=0$, $\eta=100\%$). Очевидно, що оптимальне рішення слід шукати, виходячи з конкретних умов роботи того чи іншого електричного пристрою. Наприклад, при більших потужностях, що передаються, прагнуть мати високий ККД. Для цього підбирають обладнання таким чином, щоб $R \gg R_0$, тобто існує режим, близький до режиму холостого ходу.

У слабострумівих пристроях (телефон, датчики і т.д.) першорядною задачею буде одержання максимальної потужності. У цьому випадку обладнання підбирається так, що $R \approx R_0$, тобто пристрій працює з ККД, близьким до 0,5.

Опис лабораторного обладнання

Схема лабораторної установки наведена на рис. 2.3.

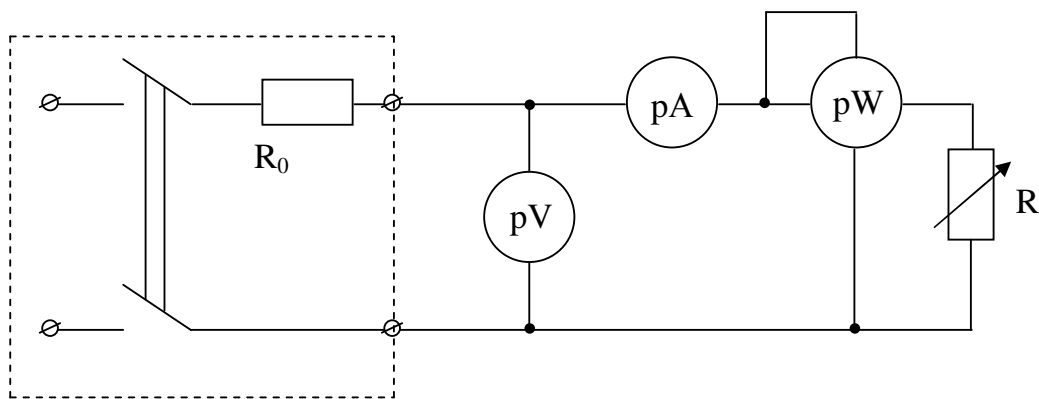


Рисунок 2.3 – Схема лабораторной установки

Як дослідне джерело живлення використовується сіть постійного струму стенду „Уралочка” з напругою 30 В.

Мережа має відносно невеликий внутрішній опір, внаслідок чого при короткому замкненні струм к.з. був би надто великим. Тому в лабораторних пристроях послідовно з джерелом постійного струму 30 В включають додатковий опір $R_0=15$ Ом, умовно вважаючи його внутрішнім опором.

Як приймач (перемінний опір) використовують один із трьох магазинів опорів, що знаходяться на стенді.

Для замірів струму і напруги використовують багато межовий амперметр, що є на стенду.

Для замірів потужності необхідно установити додатковий ватметр.

Порядок виконання експерименту

1 Здійснити режим холостого ходу джерела, для чого відключити приймач і замірити напругу холостого ходу та струм у колі.

2 Утворити режим короткого замикання джерела, зменшив до нуля опір приймача. Заміряти струм і напругу в режимі к.з.

3 Змінюючи опір приймача, добитися максимальних показників ватметра, що відповідає узгодженому режимові роботи джерела та приймача.

4 Здійснити декілька проміжних режимів роботи джерела, замінив у кожному з них електричні параметри кола.

5 Дослідити номінальний режим роботи джерела, що забезпечує ККД джерела $\eta=80\%$.

Результати замірів за пунктами 1-5 занести до табл. 2.1.

Обробка результатів експерименту

Параметри джерела:

$E = U_{\text{дб}}$ – ЕРС джерела (електрорушійна сила);

$$R_0 = \frac{E}{I_{\text{к.з}}} = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{к.з}}} \text{ – внутрішній опір джерела.}$$

Таблиця 2.1 – Результати замірів

Режим роботи джерела	Заміряно		Вираховано			Параметри джерела
	U, В	I, А	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	η, %	
1 Холостий хід						E= R ₀ =
2 Коротке замикання						
3 Номінальний режим (η=80%)						
4 I=0,2·I _{к.з}						
5 I=0,4·I _{к.з}						
6 I=0,6·I _{к.з}						
7 I=0,8·I _{к.з}						

Для всіх режимів, перелічених в табл. 2.1, підраховується потужність:

$$P_1 = EI \text{ - потужність, що віддає джерело;}$$

$P_2 = UI$ - потужність, що споживає приймач.

Для дослідження номінального режиму необхідно спочатку визначити значення $I_{\text{ном}}$, виходячи із заданого $\eta=80\%$. Для цього користуються відношенням

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{E - IR_0}{E} = 1 - \frac{I}{E/R_0} = 1 - \frac{I}{I_{\text{к.з}}},$$

або $I = I_{\text{к.з}}(1 - \eta)$. Підставивши в останній вираз $\eta=80\%$, одержимо величину $I_{\text{ном}}$.

За результатами замірів і розрахунків побудувати залежність $U(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta(I)$ у вигляді, зображеному на рис. 2.4.

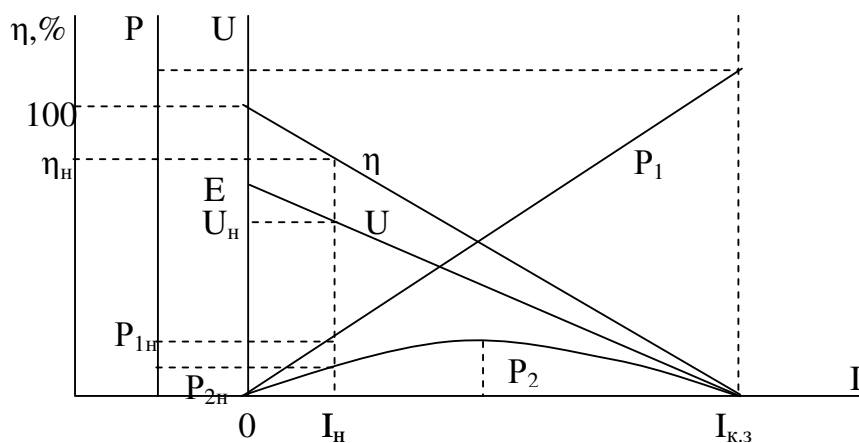


Рисунок 2.4 – Примірний вид залежності $U(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta(I)$

Зробити висновки відносно характеру залежності $U(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta(I)$ від протікаючого струму.

Контрольні питання

1 Що називається зовнішньою характеристикою джерела електричної енергії? Який вигляд має зовнішня характеристика реального та ідеального джерела?

2 Як експериментально визначити основні параметри джерела ЕРС і внутрішній опір?

3 Чому джерело, що досліджується в лабораторній роботі, може бути замкнуто накоротко без ризику вивести його з ладу?

4 У якому випадку потужність, що виділяється в навантаженні, максимальна?

5 Що називається узгодженим навантаженням?

- 6 Чим не вигідний узгоджений режим?
- 7 Чому рівен ККД джерела в різноманітних режимах його роботи?
- 8 На якому відрізку зовнішньої характеристики працюють реальні джерела електричної енергії?
- 9 Чому рівняються I і U при узгодженому режимі, якщо їх виразити через основні параметри джерела E і R_0 ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити загальні властивості електричних кіл з послідовним, паралельним і змішаним з'єднанням приймачів; експериментально перевірити закони Кірхгофа.

Стислі теоретичні відомості

Окремі приймачі електричної енергії можуть бути з'єднані між собою різними способами. Послідовним з'єднанням приймачів (рис.3.1) називається таке з'єднання, коли кінець одного приймача з'єднується з початком другого, кінець другого – з початком третього і т.д.

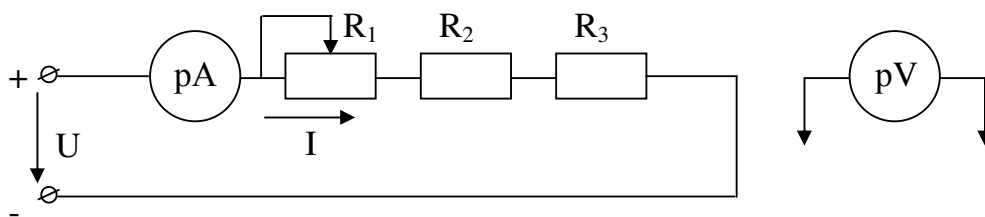


Рисунок 3.1 – Послідовне з'єднання приймачів

При цьому через всі приймачі проходить один і той же струм, тобто $I=I_1=I_2=I_3$. По закону Ома на окремих ділянках (приймача) пропорційна величині опорів цих ділянок, тобто:

$$U_1 = I_1 R_1 = IR_1$$

$$U_2 = I_2 R_2 = IR_2$$

$$U_3 = I_3 R_3 = IR_3$$

Згідно з другим законом Кірхгофа $\sum U = \sum E$ алгебраїчна сума ЕРС за замкнутим контуром рівна алгебраїчній сумі падіння напруги на окремих ділянках (елементах) замкнутого контура. Для дослідження кола (див.рис. 3.1) рівняння згідно з другим законом Кірхгофа має вигляд:

$$\Sigma E = \Sigma U, \quad 0 = IR_1 + IR_2 + IR_3 - U$$

або ж
$$0 = U_1 + U_2 + U_3 - U.$$

Після перетворення одержимо:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3),$$

тобто напруга на затискачах кола U рівняється сумі напруг на окремих ділянках кола (наслідок з другого закону Кірхгофа для кола, що розглядається).

Загальний опір кола при послідовному з'єднанні приймачів дорівнює сумі опорів на окремих ділянках електричного кола:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Потужність всього кола дорівнює сумі потужностей окремих ділянок електричного кола (приймачів):

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = IU_1 + IU_2 + IU_3 = I(U_1 + U_2 + U_3) = IU.$$

Паралельним з'єднанням приймачів (рис.3.2) називається таке з'єднання, коли початки всіх приймачів з'єднані в одну точку, а кінець – в другу. При цьому до загальних вузлових точок підведена одна і та ж (сітьова) напруга, тобто $U=U_1=U_2$.

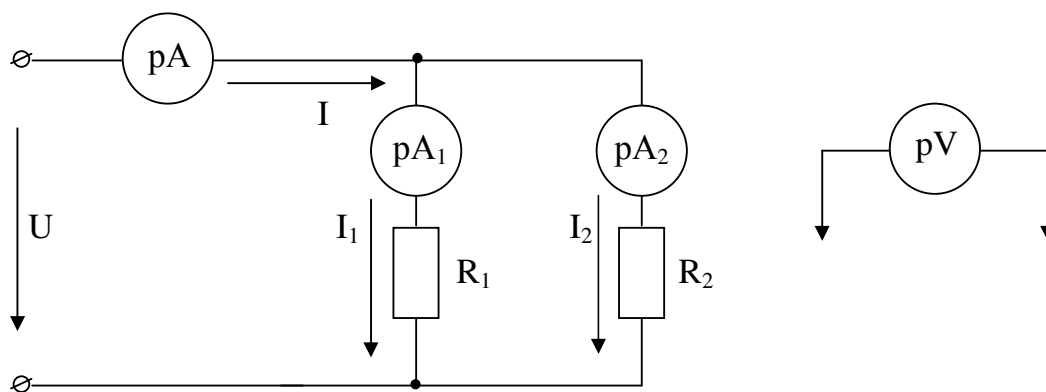


Рисунок 3.2 – Паралельне з'єднання приймачів

Приймачі, включені між двома точками (вузлами) електричного кола, створюють так звані паралельні вітки або відгалуження.

Струм в окремих відгалуженнях визначається за законом Ома, тобто

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U}{R_2},$$

а загальний струм, що підходить до точки відгалуження,

$$I = \frac{U}{R},$$

де R – загальний опір кола.

Для паралельного з'єднання

$$R = R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Згідно з першим законом Кірхгофа $\sum I = 0$, тобто алгебраїчна сума струмів у вузлі електричного кола дорівнює нулю. Для будь-якого вузла кола, що розглядається рівняння згідно з першим законом Кірхгофа має вигляд:

$$I - I_1 - I_2 = 0 \quad \text{або ж} \quad I_1 + I_2 - I = 0.$$

Після перетворення рівняння набуде вигляду

$$I = I_{12} = I_1 + I_2 \quad \text{або} \quad \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$$

Розділивши обидві частини рівняння на U , одержимо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{або} \quad G = G_1 + G_2,$$

де G – загальна провідність кола $\left(G = \frac{1}{R} \right)$.

Змішаним з'єднанням приймачів називається таке з'єднання, при якому в різному поєднанні є і послідовне і паралельне з'єднання окремих приймачів (рис.3.3).

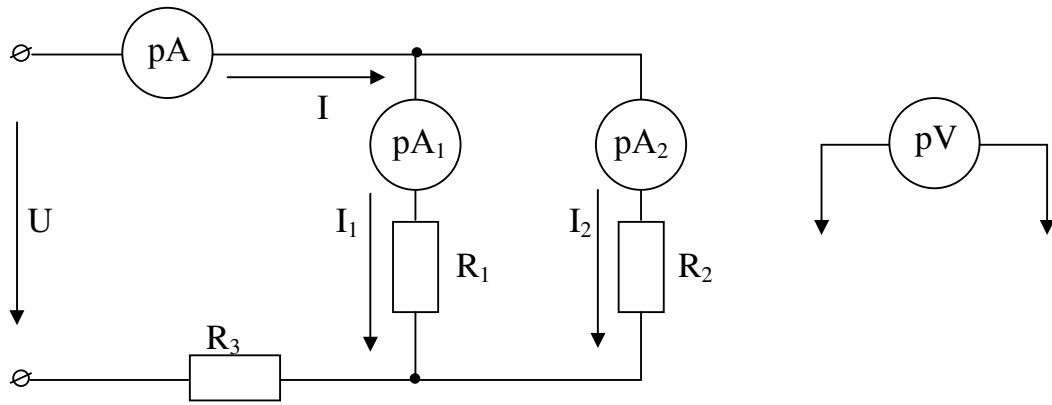


Рисунок 3.3 – Змішане з'єднання приймачів

Загальний опір такого кола дорівнює сумі еквівалентних опорів послідовних відрізків.

У такому випадку

$$R = R_{12} + R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_3.$$

Загальний струм пропорційний напрузі кола і протилежно пропорційний його опору:

$$I = I_3 = \frac{U}{R}.$$

Напруга на окремих ділянках:

$$U_{12} = I_{12} \cdot R_{12} = I \cdot R_{12}, \quad U_3 = I_3 \cdot R_3 = I \cdot R_3.$$

Струми на окремих ділянках знаходяться за законом Ома для ділянки кола:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{12}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_{12}}{R_2}.$$

Опис лабораторного обладнання

Лабораторну установку збирають відповідно до схем (рис. 3.3), вона вмістить наступні елементи:

- вольтметр 0...100 В 1 шт. – для виміру напруги на затискачах джерела і приймача (резисторах);
- амперметр 0...2 А 3 шт. – для виміру струму в вітках;
- приймач електричної енергії (3 групи резисторних елементів – R_1 , R_2 , R_3) зі змінним опором 0...50 Ом;
- джерело електричної енергії постійного струму напругою біля 30 В.

Порядок проведення експерименту

- 1 Ознайомитись з приладами і обладнанням.
- 2 Зібрати коло з послідовним з'єднанням приймачів (див. мал.3.1). При цьому $R_1 \geq 20$ Ом, $R_1 + R_2 + R_3 \geq 30$ Ом.
- 3 Заміряти струм, напругу на кожному приймачеві (резисторі) і на затискачах кола. Результати замірів записати в п.1 табл.3.1

Таблиця 3.1 – Результати замірів

№ пп	Виміряно						Обчислено											Номер рисунок			
	U	U ₁	U ₂	U ₃	I	I ₁	I ₂	R	R ₁	R ₂	R ₃	G	G ₁	G ₂	G ₃	P	P ₁		P ₂	P ₃	
1																					3.1
2																					3.1
3																					3.2
4																					3.3
5																					3.3

- 4 Змінюючи наполовину величину опору R_1 , знову зробити заміри, результати яких записати в п.2 табл.3.1.
- 5 Зібрати коло з паралельним з'єднанням приймачів (див.рис.3.2). При цьому $R_1 \geq 2R_2$, а $R_2 = 30...50$ Ом.
- 6 Заміряти напругу на кожному приймачеві і на затискачах кола, а також усі струми. Результати замірів записати в п.3 табл. 3.1.
- 7 Зібрати коло зі змішаним з'єднанням приймачів (див.рис.3.3). При цьому $R_3 = 15$ Ом, а $R_1 = R_2 = 20...40$ Ом.
- 8 Заміряти напругу на кожному приймачеві й на зажимах кола, а також всі струми, результати замірів записати в п.4 табл.3.1.
- 9 Зменшивши наполовину величину опору R_1 , знову зробити заміри, результати яких записати в п.5 табл.3.1.

Обробка результатів експерименту

За результатами замірів вирахувати опір та провідність кожного приймача.

Переконайтесь в справедливості таких рівнянь:
для послідовного з'єднання –

$$U = U_1 + U_2 + U_3;$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3;$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3;$$

для паралельного з'єднання –

$$U = U_1 = U_2;$$

$$I = I_1 + I_2;$$

$$G = G_1 + G_2; P = P_1 + P_2$$

для змішаного з'єднання –

$$U = U_{12} + U_3; \quad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R;$$

$$I = I_1 + I_2; \quad P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Контрольні питання

1 Як записати і прочитати закон Ома: а) для ділянки кола і б) для всього кола?

2 Які є особливості послідовного, паралельного та змішаного з'єднання приймачів?

3 Записати вираз для визначення загального опору розрахункової схеми (див.рис.3.1...3.3).

4 Розкрити суть першого і другого законів Кірхгофа.

5 Як записати рівняння для розрахункових схем (див.рис.3.1...3.3), коли використовуються закони Кірхгофа?

6 Як зміниться величина струму в колі при включенні чи виключенні одного з резисторів при послідовному з'єднанні?

7 Чому зміниться напруга на кожному приймачі, якщо змінити опір одного з трьох резисторів при послідовному сполученні?

8 Чому при паралельному сполученні під час включення другого реостата не змінюється струм в першому реостаті? Як в такому випадку зміниться загальний струм?

9 Чому при зміні R_1 змінилася напруга на R_3 (див.рис.3.3)?

10 Як зміниться напруга на резисторах R_1 та R_2 (див.рис.3.3), якщо резистор R_3 виключити?

11 Проаналізувати, яким чином зміняться струми на напруги в розрахункових схемах (див.рис.3.1...3.3), якщо змінити один з опорів, наприклад, R_1 ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити нелінійні опори, навчитися знімати та будувати вольт-амперні характеристики, експериментально перевірити графічні методи розрахунку простих кіл з нелінійними елементами.

Стислі теоретичні відомості

До електричного кола можуть входити елементи, опори яких не є величиною постійною, внаслідок чого струм в них не знаходиться в прямій пропорціональній залежності у відношенні до напруги. Елементи, опори яких залежать від величини протікаючого по них струму або прикладеної до них напруги, називаються нелінійними. Вольт-амперні характеристики таких елементів нелінійні. Приклади вольт-амперних характеристик (в.а.х.) таких елементів наведені на рис. 4.1.

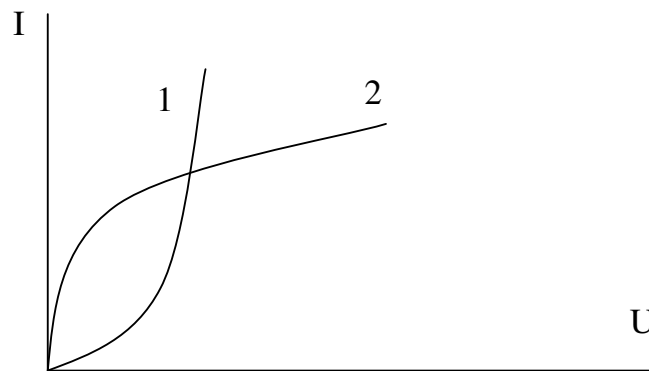


Рисунок 4.1 – Вольт-амперні характеристики напівпровідникового діода (1) та лампи розжарювання (2)

Якщо в електричному колі є хоч один нелінійний елемент, воно називається нелінійним. Через нелінійність в.а.х. аналітичний розрахунок нелінійних кіл надто утруднений і застосовується тільки тоді, коли криволінійні відрізки характеристик можна описати чи апроксимувати аналітичними функціями.

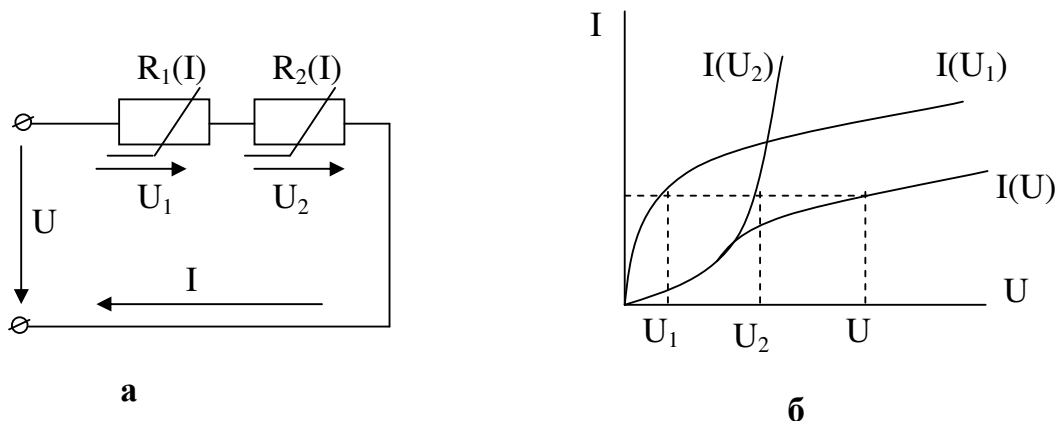
Частіше всього розрахунок кіл з нелінійними елементами здійснюється графічно. Для цього дослідним шляхом знімають в.а.х. кола в цілому.

Одержання результуючої в.а.х. є рішенням задачі за розрахунком нелінійного кола, тобто за допомогою її (а також в.а.х. нелінійних елементів), задаючись тільки одним яким-небудь відомим параметром, можна легко визначити всі ті, що zostалися.

На відрізок кола з двома послідовно з'єднаними елементами (рис.4.2,а) згідно з другим законом Кірхгофа напруга $U=U_1+U_2$. Тому для побудови вольт-амперної характеристики $I(U)$ відрізка складають напруги

за елементами при заданому загальному струмі в колі I , як показано на рис.4.2,б.

При паралельному з'єднанні нелінійних елементів всі вони знаходяться під одною напругою U , а струм в нерозгалуженій частині кола згідно з першим законом Кірхгофа рівняється сумі струмів в галузках, тобто для схеми на рис. 4.3, а $I=I_1+I_2$. Для одержання загальної характеристики $I(U)$ достатньо підсумувати ординати характеристик окремих елементів (рис.4.3,а).

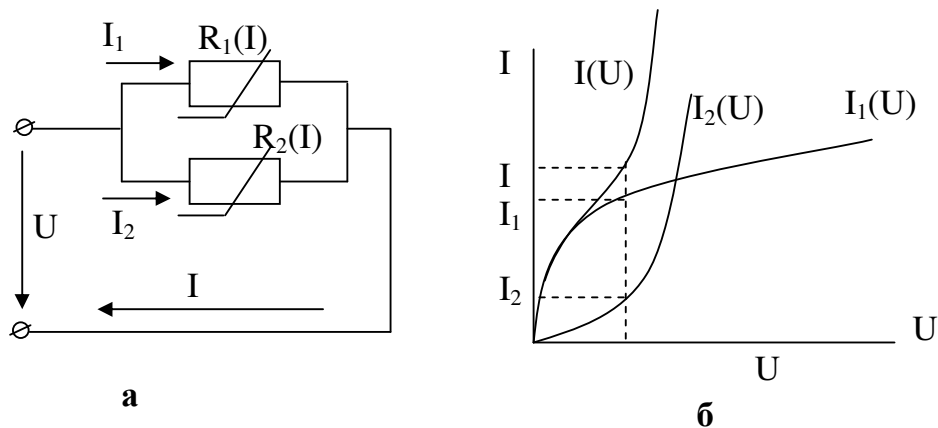


а – схема кола; б – побудова результуючої в.а.х. кола

Рисунок 4.2 – Послідовне з'єднання нелінійних елементів

Вольт-амперні характеристики нелінійного кола, побудовані графічно, дозволяють визначити струми в ньому по заданій напрузі або, навпаки, напруги – за заданим струмом.

Графічний метод розрахунку нелінійного кола постійного струму не змінюється, якщо деякі її елементи будуть лінійними (з в.а.х. у вигляді прямих ліній). Більш трудомісткий розрахунок складного нелінійного кола, що містить декілька джерел. Його виконують із застосуванням ЕОМ.



а – схема кола; б – побудова результуючої в.а.х. кола

Рисунок 4.3 – Паралельне з'єднання нелінійних елементів

Порядок проведення експерименту

1) Зібрати схему, що наведена на рис.4.4.

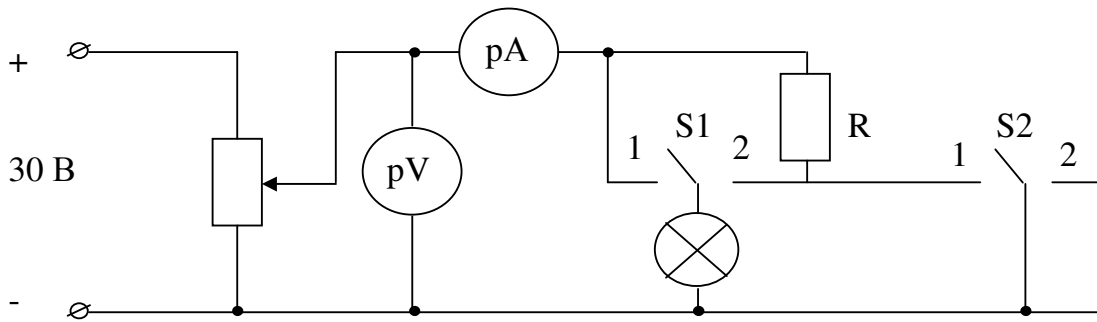


Рисунок 4.4 – Схема лабораторної установки

- 2) Установити на магазині опорів задане викладачем R .
- 3) Установити ключ $S1$ в нейтральне положення, а $S2$ – в положення (1). Зняти в.а.х. резистора. Результати записати в табл. 4.1.
- 4) Установити ключ $S2$ в нейтральне положення, а $S1$ – в положення (1). Зняти в.а.х. лампи розжарювання. Результати записати в табл. 4.1.
- 5) Установити $S1$ в положення (2), а $S2$ – в нейтральне положення. Зняти в.а.х. послідовного з'єднання елементів. Результати записати в табл. 4.1.
- 6) Установити $S1$ и $S2$ в положення (1). Зняти в.а.х. паралельного з'єднання елементів. Результати записати в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати замірів

№ пп	Резистор		Лампа		R, лампа послідовно		R, лампа паралельно	
	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А
1								
2								
.								
.								
.								
8								

- 7) Змінити лампу розжарювання на напівпровідниковий діод і повторити пункти 2...6. Результати записати в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати замірів

№ пп	Резистор		Напівпровідниковий діод		R і діод послідовно		R і діод паралельно	
	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А
1								
2								
.								
.								
.								
8								

Обробка результатів експерименту

- 1) За даними табл.4.1 в одній системі координат побудувати в.а.х., що одержані експериментально.
- 2) На окремому графіку графічно визначити в.а.х. послідовного сполучення лампи і резистора. На цьому ж графіку побудувати характеристику, що отримана експериментально.
- 3) На окремому графіку графічно визначити в.а.х. паралельного з'єднання лампи і резистора. На цьому ж графіку побудувати характеристику, отриману експериментально.
- 4) За даними табл. 4.2 повторити побудову графіків для послідовного та паралельного з'єднання резистора і напівпровідникового діода.
- 5) Зробити висновки.

Контрольні питання

- 1 Які кола відносяться до нелінійних?
- 2 Які методи застосовуються для розрахунку нелінійних кіл?
- 3 Які засоби графічного розрахунку кола з паралельно і послідовно з'єднаними елементами?
- 4 Навести приклад нелінійних елементів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5 ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета роботи: навчитися визначати параметри кіл, досліджувати послідовне з'єднання споживачів в колі змінного струму, будувати векторні діаграми напруг і струмів, досліджувати виникнення резонансу напруг.

Стислі теоретичні відомості

У лінійних колах змінного струму синусоїдально перемінні струми і напруги визивають періодичні зміни енергії, що були запасені в електричному полі конденсаторів $W = CU^2/2$ та в магнітному полі котушок $W = Li^2/2$. Отже, в колах протікають струми і є напруги, що змінюють ці енергії, і всі процеси стають значно складнішими, ніж в колах постійного струму. При цьому елементи з параметрами L і C обмінюються енергіями між собою та з джерелом, і частина енергії вживається на активних опорах.

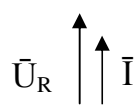
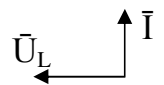
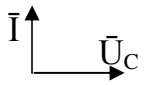
Таким чином, режим роботи визначається сукупністю режимів трьох ідеальних елементів: R , L і C , особливості поведінки яких в колах синусоїдального струму наведено в табл. 5.1. Ці особливості витікають з основних зв'язків між напругами та струмами:

$$U_R = iR; \quad U_L = L \frac{di}{dt}; \quad U_C = \frac{1}{C} \int i dt.$$

Таблиця 5.1- Результати замірів

Характеристики	R	L	C
1	2	3	4
1 Напруги на затисках при синусоїдальному струмі $i = I_m \sin \omega t$	$U = U_{mR} \sin \omega t$	$U = U_{mL} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$	$U = U_{mC} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$
2 Закон Ома для відрізка кола	$I = \frac{U_2}{R}$	$I = \frac{U_L}{X_L}, \quad X_L = \omega L$	$I = \frac{U_C}{X_C}, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$
3 Кут зсуву фаз напруги та струму	$\varphi = 0$	$\varphi = +\frac{\pi}{2}$	$\varphi = -\frac{\pi}{2}$
4 Активна потужність, що виділяється в елементі	$P = I^2 R =$ $= U_R I = \frac{U^2}{R}$	0	0
5 Реактивна потужність елементу	0	$Q_L = I^2 X_L =$ $= U_L I = \frac{U_L^2}{X_L}$	$Q_C = -I^2 X_C =$ $= -U_C X_C = -\frac{U_C^2}{X_C}$

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4
6 Векторна діаграма напруги і струму			
7 Опір в символічній формі	$\underline{R} = R$	$\underline{X}_L = j\omega L$	$\underline{X}_C = \frac{1}{j\omega C}$

Елементи з параметрами L і C називають реактивними елементами.

Помітим, що кут зсуву фаз є алгебраїчною величиною і його знак визначає характер навантаження: індуктивний, якщо $\varphi > 0$, і ємнісний при $\varphi < 0$.

При послідовному з'єднанні трьох вищеназваних ідеальних елементів (рис.5.1) для миттєвих значень за другим законом Кирхгофа маємо

$$U = U_R + U_L + U_C$$

і в геометричній формі -

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C = I(R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})) = I\underline{Z},$$

де \underline{Z} – комплекс повного опор кола,

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi},$$

де $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ - модуль повного опорю;

φ – кут зсуву фаз, що визначається для заданої частоти параметрами кола,

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \arctg \frac{\pm X}{R},$$

де $X = X_L - X_C$ - реактивні опори кола, визначають характер кола.

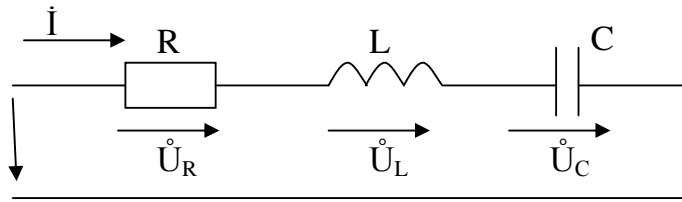


Рисунок 5.1 – Послідовне з'єднання RLC - елементів

Якщо $X_L > X_C$, кажуть, що індуктивність домінує в колі, коло має індуктивний характер і $\varphi > 0$.

Якщо $X_L < X_C$, $\varphi < 0$, коло носить ємнісний характер (рис.5.2).

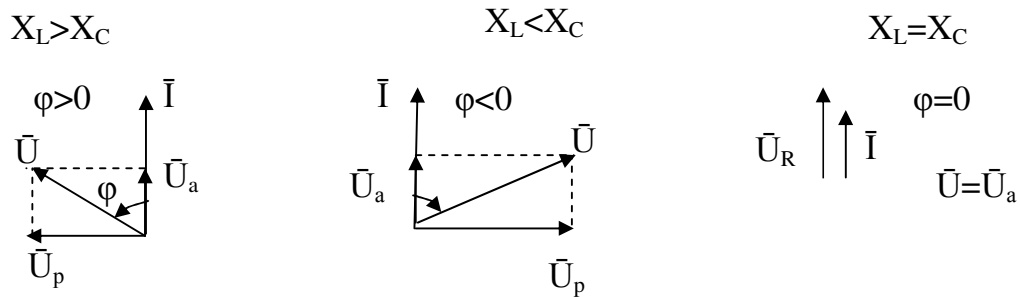


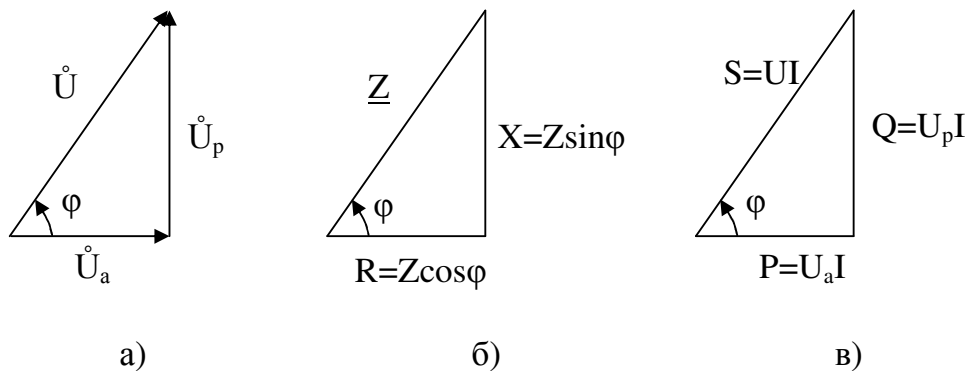
Рисунок 5.2 – Векторні діаграми струму та напруги

Розклавши вектор напруги на складові, одна з яких збігається зі струмом, а друга йому перпендикулярна, одержують активну і реактивну складові напруги при цьому.

$$U_a = U \cos \varphi = IZ \cos \varphi = IR;$$

$$U_p = U \sin \varphi = UZ \sin \varphi = IX = I(X_L - X_C) = U_L - U_C.$$

Таким чином, для будь якого кола мають векторну діаграму напруг (трикутник напруг). Поділивши усі сторони цього трикутника на загальний для всіх елементів струм, чи перемножив їх на той же струм, одержують ще два подібних трикутника, сторони яких у відповідному масштабі будуть у першому випадку опори і в другому – потужності. Наприклад, для індуктивного характеру навантаження ці трикутники подані на мал. 5.3.



а) трикутник напруг; б) трикутник опорів; в) трикутник навантаження

Рисунок 5.3 – Векторні діаграми

Аналіз послідовного з'єднання має на увазі справедливність другого закону Кірхгофа та інших співвідношень для електричних кіл, але в геометричній формі. Аналіз проводиться звичайно при розкладі напруг на активні і реактивні складові, які з урахуванням характеру відрізків (індуктивний чи ємнісний) будуються на векторній діаграмі.

Векторні діаграми підвищують наочність результатів аналізу. При розрахунку цих складових необхідно знати параметри приймачів.

Якщо приймач має тільки один параметр (наприклад резистор, що має тільки активний опір), то величина $R = U_R / I$ визначається за законом Ома чи $R = P / I^2$, тобто для визначення параметру необхідно заміряти струм і напругу чи струм і потужність приймача.

У приймачі двох параметрів, наприклад котушки параметрів R і L , останні назначаються експериментально двома методами.

Перший полягає у визначенні опору R_k в колі постійного струму. Для цього котушку вмикають в коло постійного струму і заміряють опір котушки $R_k = U / I$ і вважають його надалі активним опором котушки. На низьких частотах, де поверхневий ефект та ефект близькості проявляються слабо, це допускається.

Визнавши R_k , вмикають в коло змінного струму і визначають повний опір котушки $Z_k = U \sim / I \sim$. Далі вираховують:

$$X_L = \omega L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad \text{та} \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X}{2\pi f}.$$

Другий метод використовується частіше, але для цього методу потрібен ватметр. Вмикають котушку в коло змінного струму відомої частоти та заміряють напругу U_k , струм I_k і потрібну активну потужність P_k . Відомо, що

$$Z_k = U_k / I_k, \quad R_k = Z_k \cos \varphi_k, \quad X_k = Z_k \sin \varphi_k,$$

де $\cos \varphi_k$ визначають з формули потужності $P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$.

Тоді $\cos \varphi_k = P_k / U_k I_k$, а $\sin \varphi_k = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k}$. Далі $L = X_k / \omega = X_k / 2\pi f$.

Окремим випадком є режим кола, в якому $X_L = X_C$, тобто $\omega L = 1 / \omega C$ або $\omega^2 LC = 1$. У такому випадку $X = X_L - X_C = 0$, відповідно $\varphi = 0$ та $Z = R$, тобто коло веде себе як активний опір. Такий режим кола називається резонансом напруг. При цьому в колі на окремих елементах мають місце реактивні потужності $Q_L = I^2 X_L$ і $Q_C = I^2 X_C$, але реактивна потужність, що вживається з сіті дорівнює нулю. Зазначимо, що при $X = 0$ повний опір $Z = R$ є мінімальним. Звідси струм має максимальне значення і реактивні напруги $U_L = I X_L$ і $U_C = I X_C$ можуть бути значними і навіть перевищувати напругу джерела. При умові $X_L = X_C \gg R$ напруга на реактивних елементах $U_L = U_C \gg U_R = U$, і в такому випадку говориться про перенапругу на елементах з параметрами L і C . Описаний режим, при якому $\omega^2 LC = 1$, може бути одержаний шляхом зміни параметрів L або C або зміною частоти постачальної напруги до величини $\omega_{рез} = 1 / \sqrt{LC}$ називають власною частотою кола.

У лабораторних умовах про проходження точки резонансу при зміні параметрів, наприклад C , роблять висновок про змін струму.

Опис лабораторної установки

Робота виконується на стенді „Уралочка”. Лабораторна установка збирається за схемою (рис. 5.4).

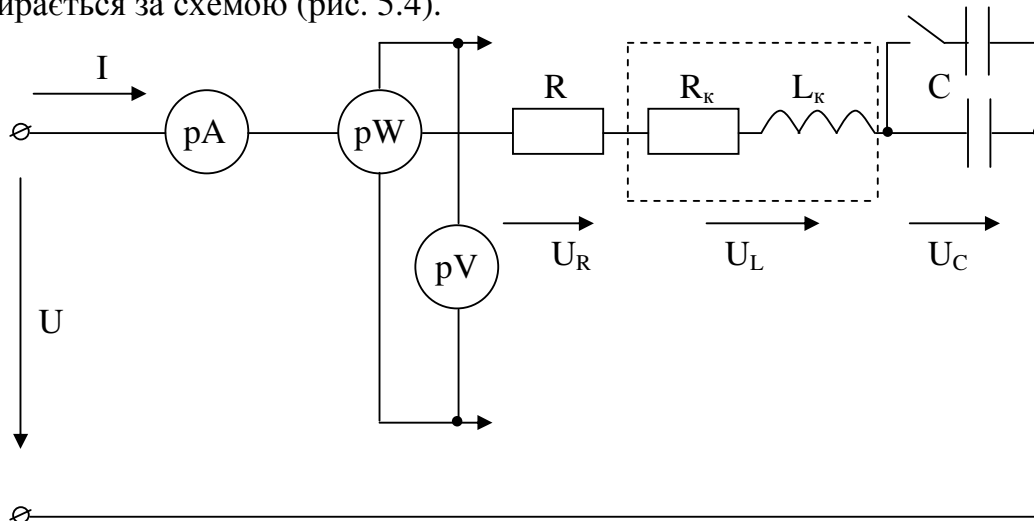


Рисунок 5.4 – Схема лабораторної установки

Вона містить такі елементи:

– магазин резисторів в блоку резисторів;

- магазин конденсаторів в блоку конденсаторів;
- котушку індуктивності: в роботі дві котушки, з'єднані послідовно;
- амперметр і вольтметр на вимірювальних блоках стенда;
- переносний ватметр електродинамічної системи.

Відповідно до схеми кола обмотки напруги ватметра і вольтметра для зручності заміру включені паралельно. У цьому випадку, коли мають один і той же струм на відрізках кола, на будь-якому відрізку чи всьому колі одночасно заміряють напругу і потужність.

Порядок проведення експерименту

- 1) Експериментально визначити параметри котушки методом ватметра, вольтметра і амперметра.

Підключивши електричне коло (див.рис. 5.4) до джерела змінної напруги, виміряти струм, напругу і потужність, що споживають котушки. Результати замірів записати в табл.5.2.

Таблиця 5.2 –Результати замірів

Виміряно			Виразовано							
I, А	$U_K, В$	$P_K, Вт$	$Z_K, Ом$	$R_K, Ом$	$\cos\phi_K,$	$\phi_K, град$	$X_K, Ом$	L, Гн	$U_{ак}, В$	$U_K, В$

- 2) Дослідити коло змінного струму з послідовним сполученням приймачів з різноманітним характером навантаження.

Включивши максимальну ємність в колі (див.рис. 5.4), підключити коло до джерела змінної напруги і заміряти струм у колі, напруги та потужності окремих елементів та всього кола для індуктивного характеру навантаження. Результати замірів записати в табл.5.3 (дослід 1).

Таблиця 5.3 – Результати замірів

№	Виміряно										Виразовано									
	U_B	I, А	P, Вт	$P_K, Вт$	$U_K, В$	$P_K, Вт$	$U_R, В$	$P_c, Вт$	$U_c, В$	Z, Ом	R, Ом	$X_L, Ом$	$X_c, Ом$	$\pm X, Ом$	$U_{ак}, В$	$U_{пр}, В$	$U_a, В$	$\pm U_p, В$	Q, ВАр	S, ВА
1	$X_L > X_C$																			
2	$X_L < X_C$																			

Зробити ті ж виміри, зменшивши ємність до $1/\omega C = X_C > X_L$ (дослід 2). Для цього тумблерами у колі зменшити число паралельно включених конденсаторів, спостерігаючи при цьому зміни струму, який спочатку зростає до максимального значення, а потім зменшується.

Перехід струму через максимум і буде означати зміну характеру навантаження, тобто реалізацію умови $X_C > X_L$. Результати замірів занести до табл. 5.3 (дослід 2).

- 3) Дослідити явище резонансу напруг. Включати до кола максимальну кількість конденсаторів, а потім ступеневно зменшувати ємність конденсаторної батареї до нуля. При цьому зробити 4...5 замірів струму в колі, напруги на котушці U_k і конденсаторній батареї U_C . Результати замірів занести до табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати замірів

№ пп	Виміряно			Вираховано	
	I, А	U_k , В	U_C , В	X_C , Ом	C, Ф
1					
2					
3					
4					
5					

Обробка результатів експерименту

За результатами замірів (п.1) вирахувати параметри котушки і повкий, активний та індуктивний опір, а також індуктивність котушки. Вирахувати активну і реактивну частини напруги котушки. Результати цих обчислень занести до табл.5.1. Побудувати векторну діаграму напруг котушки та трикутник опорів.

За результатами замірів (п.2) вирахувати активні і реактивні частини напруг приймачів і всього кола, активний і реактивний опори, а також повну і реактивну потужності кола.

Побудувати векторні діаграми напруг кола для індуктивного та ємнісного характеру навантаження, а для обох дослідів – трикутник опорів і потужностей.

Векторні діаграми та трикутники опорів і потужностей будуються в масштабі.

За результатами замірів (п.3) вирахувати для кожного досліду ємнісний опір $X_C=U_C/I$ та ємність $C=1/\omega X_C$. Побудувати в масштабі графіки струму, напруги котушки і конденсатора в функції ємності C. Проаналізувати одержані резонансні криві. Із графіків визначити значення $C_{рез}$, при якому у колі буде резонанс напруг.

Сформулювати висновок з роботи, звернувши увагу на справедливості другого закону Кірхгофа та інші співвідношення в колах змінного струму в геометричній формі.

Контрольні питання

- 1) Яка фізична суть індуктивного та ємнісного опорів?
- 2) Як залежать значення індуктивного та ємнісного опорів від частоти? Одиниці виміру індуктивності і ємності?

- 3) Сформулювати та записати закон Ома для послідовного з'єднання активного, індуктивного та ємнісного опорів.
- 4) Особливості кіл змінного струму при послідовному сполученні активного, індуктивного і ємнісного опорів.
- 5) Формули і одиниці вимірів потужності в колах змінного струму.
- 6) Що таке коефіцієнт потужності і як він залежить від активного і реактивного опорів кола?
- 7) Чому прагнуть до підвищення $\cos\varphi$ промислових споживачів електроенергії?
- 8) Як за показниками амперметра можна визначити момент появи резонансу напруг? Умови виникнення резонансу?
- 9) Поясніть підвищення напруг на елементах кола при появі резонансу напруг.
- 10) Що таке амплітуда, частота, період, фаза змінного струму.
- 11) Чим відрізняється активний опір від омичного?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Мета роботи: дослідити закономірність розподілу струмів у колі синусоїдального струму, що має паралельно з'єднані резистивний елемент, котушку індуктивності та конденсатор.

Стислі теоретичні відомості

Паралельним з'єднанням елементів електричного кола змінного струму називають таке їх з'єднання, при якому усі елементи знаходяться під одною й самою напругою (рис. 6.1), тобто до спільних вузлових точок підведена одна напруга: $\dot{U} = \dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_3$.

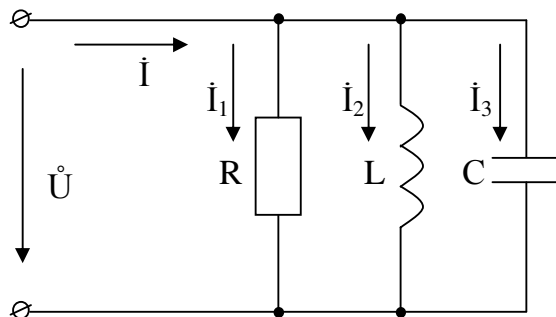


Рисунок 6.1 – Паралельне з'єднання приймачів змінного струму

Нехай друга вітка має активний та індуктивний опори (котушка індуктивності), перша – лише активний опір (резистор), третя – лише

ємнісний опір (конденсатор). Тоді, використовуючи перший закон Кірхгофа до комплексів діючих значень струмів, одержимо:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3,$$

Розклавши струми паралельних віток на активні та реактивні складову, одержимо:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = UG_1; \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = UG_2;$$

$$I_{3a} = I_3 \cos \varphi_3 = UG_3 = 0$$

через те, що $G_3 = 0; I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = UB_1 = 0$

через те, що $B_1 = 0; I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = UB_2; \quad I_{3p} = I_3 \sin \varphi_3 = UB_3$

де G_1, G_2, G_3 – активні провідності віток;

B_1, B_2, B_3 – реактивні провідності віток.

Векторна діаграма струмів для паралельного з'єднання R, L, C елементів наведена на рис. 6.2.

Активна складова струму в вітці, що має конденсатор, та реактивні складова струму в вітці, що має реостат, дорівнюють нулю (I_{3a}, I_{1p}) через те, що конденсатор не має активного опору, а ($I_{1p}=0$) резистор не має реактивного опору. З векторної діаграми (див.рис. 6.2) бачимо, що активна складова струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює арифметичній сумі складових струмів паралельних віток:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = UG_1 + UG_2 = U(G_1 + G_2) = UG,$$

де G – еквівалентна активна провідність кола.

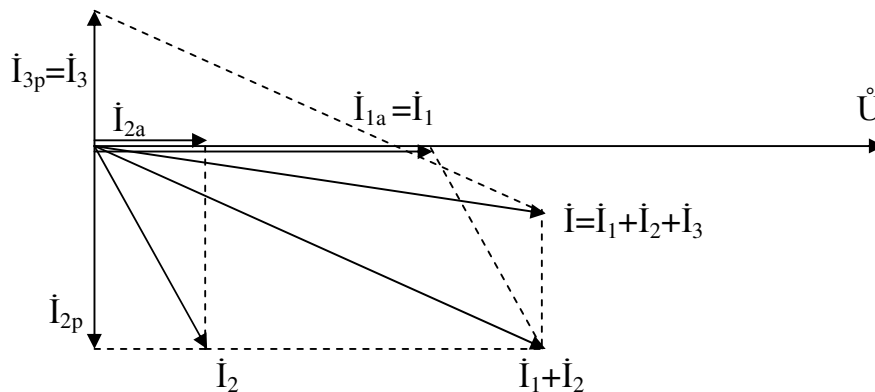


Рисунок 6.2 – Векторна діаграма струмів

Реактивна складова струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює алгебраїчній сумі реактивних складових струмів паралельних віток:

$$I_p = I_{2p} - I_{3p} = UB_2 - UB_3 = U(B_2 - B_3) = UB,$$

де B – еквівалентна реактивна провідність кола.

Струм в нерозгалуженій частині кола

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = U\sqrt{G^2 + B^2} = UY = U\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2},$$

де $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ - повна еквівалентна провідність кола.

Активна потужність усього кола дорівнює арифметичній сумі активних потужностей паралельних віток:

$$P = P_1 + P_2 = U^2 C_{T1} + U^2 C_{T2} = U^2 (C_{T1} + C_{T2}) = U^2 C_T.$$

Реактивна потужність усього кола дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей віток:

$$Q = Q_2 - Q_3 = U^2 B_2 - U^2 B_3 = U^2 (B_2 - B_3) = U^2 B.$$

Повна потужність кола

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} = UI.$$

Опис лабораторного обладнання

Зібрати лабораторну установку згідно з схемою (рис.6.3). Вона містить такі елементи:

– ватметр астатичний 0...750 Вт 1 шт. – для замирювання активної потужності в колі;

– вольтметр змінного струму 0...100 В 1 шт. – для замирювання напруги в колі;

– амперметр змінного струму 0...2 А 1 шт. – для замирювання струму в колі;

– індуктивний приймач електричної енергії – згуртована котушка індуктивності – дві котушки індуктивності, з'єднані послідовно;

– ємнісний приймач електричної енергії – блок конденсаторів (1 шт.);

- активний приймач електричної енергії – блок резисторів з опором (30...50) Ом 1 шт.;
- перемикач однополюсний (3 шт. – S1, S2, S3) – для підключення в коло елементів.

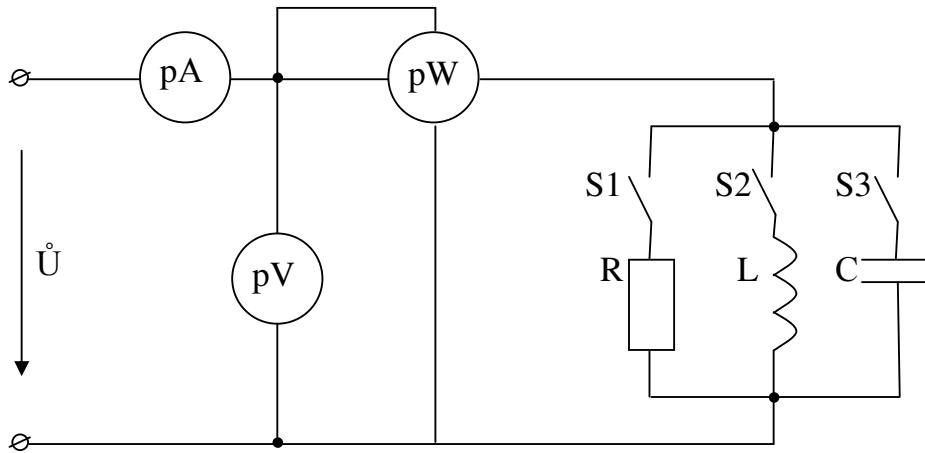


Рисунок 6.3 – Схема лабораторної установки

Електрична енергія змінного струму підводиться до лабораторної установки від сітки змінного струму, що має напругу $U = 30 \text{ В}$ (блок № 4 лабораторного стенду „Уралочка”).

Величину опору резистора R установити у діапазоні 30...50 Ом.

Величину ємності конденсатора C установити в положенні $C=C_{\text{max}}$.

Порядок проведення експерименту

- 1) Ознайомитися з приладами та обладнанням.
- 2) Забрати електричне коло за схемою (див.рис.6.3). При цьому перемикачі S1, S2, S3 установити в положення „Відключено”.
- 3) Підключити до кола резистор, для чого перемикач установити в положення „Включено”. Заміряти за допомогою приладів pV, pA, pW відповідно напругу, струм та активну потужність. Результати замірювань записати в п.1 табл.6.1.
- 4) Відключити резистор S1 та включити котушку індуктивності S2. Покази приладів записати в п.2 табл. 6.1.
- 5) Відключити котушку індуктивності S2 та увімкнути конденсатор S3. Покази приладів записати в п.3 табл. 6.1.
- 6) Увімкнути резистор S1 разом з котушкою індуктивності S2 (без конденсатора). Покази приладів записати в п.4 табл. 6.1.
- 7) Увімкнути резистор S1, котушку індуктивності S2 та конденсатор S3. Покази приладів записати в п.5 табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати замірювань

№ пп	Спосіб з'єднання	Виміряно			Виразовано					
		U, В	I, А	P, Вт	cosφ	sinφ	I _a , А	I _p , А	Q, ВАр	S, ВА
1	Резистор									
2	Котушка індуктивності									
3	Конденсатор									
4	Паралельно резистор та котушка індуктивності									
5	Паралельно резистор, котушка індуктивності та конденсатор									
6	Паралельно резистор, котушка індуктивності та конденсатор При $C = \text{var}$ $I = I_{\min}$									

- 8) Увімкнути резистор S1, котушку індуктивності S2 та конденсатор S3. Змінюючи ємність конденсатора ($C = \text{var}$), добитися мінімального значення струму в колі ($I = I_{\min}$). Покази приладів записати в п.6 табл.6.1.

Обробка результатів експерименту

Обчислити для кожного випадку навантаження коефіцієнт потужності ($\cos\phi$), активний та реактивний струм (I_a , I_p), реактивну повну потужність (Q , S).

За даними вимірювань та обчислень (п.4, 5, 6) побудувати за масштабом три векторні діаграми.

Контрольні питання

- 1) Які резонансні явища можливі при паралельному з'єднанні R, L, C елементів?
- 2) Що таке коефіцієнт потужності, який технічний та економічний зміст підвищення $\cos\phi$?
- 3) Яким чином покращують $\cos\phi$ електротехнічного приладу (послідовним або паралельним підключенням конденсаторів до індуктивного опору і чому?)

- 4) За якими умовами в колах з паралельним з'єднанням віток виникає резонанс?
- 5) В колі, що містить паралельно увімкнуті R , L і C , підвищили частоту в 2 рази. Як зміниться струм в вітках, якщо напруга не змінилася?
- 6) Навести схему заміщення котушки індуктивності при паралельному з'єднанні.
- 7) Записати вираз для повного опору при різних сполученнях приймачів електричної енергії. Побудувати векторну діаграму.
- 8) Чому при вмиканні в коло конденсатора ватметр показує нульове значення?
- 9) Чому при резонансі струмів загальний струм в колі має мінімальне значення?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

ТРИФАЗНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, З'ЄДНАНЕ ЗА СХЕМОЮ „ЗІРКА”

Мета роботи: експериментально дослідити розподіл струмів та напруг у трифазному електричному навантаженні, що з'єднане за схемою "зірка", у трипровідній та чотирипровідній сітках.

Перед виконанням роботи необхідно, користуючись літературою [1,2] та конспектом лекцій. Самостійно ознайомитись із схемами з'єднання фаз трифазного джерела та трифазного приймача електричної енергії (трифазного електричного навантаження) при передачі електроенергії від джерела до приймачів через трипровідну лінію електропередачі (ЛЕП), особливостями симетричного та несиметричного трифазного електричного навантаження, співвідношеннями між лінійними та фазними параметрами навантаження при нормальних режимах електропостачання, назначеним нейтрального проводу, особливостями аварійних режимів електропостачання, коли має місце обрив лінійного проводу нейтрального проводу або однієї з фаз приймача, послідовністю чергування фаз джерела та приймачів.

Як трифазне джерело електричної енергії змінного струму використовується синхронний генератор. Від нього електрична енергія передається через трипровідну чи чотирипровідну ЛЕП до трифазного приймача електричної енергії (асинхронні електродвигуни та ін). При цьому фази трифазного приймача звичайно з'єднують за схемою "зірка" Y або "трикутник" Δ для підключення до ЛЕП. Окремі однофазні приймачі (освітлювальне навантаження ділянок цеху та території підприємства, побутове навантаження в квартирах жилого будинку та ін.) для більш рівномірного навантаження проводів ЛЕП перед підключенням розподіляють на три приблизно рівні за потужністю групи (що називають фазами приймача). Через те, що всі ці однофазні приймачі розраховані на

одну й ту ж саму номінальну напругу, але в межах кожної з трьох фаз, вони з'єднуються паралельно. Трифазна система електропостачання має багато переваг. Трифазний синхронний генератор можна уявити собі як сукупність трьох однофазних джерел електричної енергії змінного струму. Фазні джерела генератора можуть бути з'єднані за схемою Y або Δ . На рис. 7.1 показано підключення трифазного приймача, фази якого з'єднані за схемою Y , до трифазного джерела електроенергії, фазні джерела якого (\dot{E}_A , \dot{E}_B , \dot{E}_C) з'єднані а схемою Y через чотиріпровідну ЛЕП. Напруги між початками фаз а, в, с та кінцями (х, у, z, на схемі вузол n) окремих фаз приймачів $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$. називають фазними напругами U_ϕ , а струми в фазах $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$, - фазними струмами I_ϕ . Напруги між початками фаз приймачів $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$, або між лінійними проходами ЛЕП називаються напругами U_L , а струми в лінійних проводах (\dot{I}_B, \dot{I}_C) - лінійними струмами I_L . Струми в фазах приймачів можуть бути визначеними через фазні параметри ($U_a, U_b, U_c, Z_a, Z_b, Z_c$) згідно з законом Ома.

Якщо активні ($R_a=R_b=R_c=R_\phi$) та реактивні ($X_a=X_b=X_c=X_\phi$) складові повних опорів (Z_a, Z_b, Z_c), фаз трифазного приймача рівні за величиною, а також рівні кути зсуву за фазою ($\phi_a=\phi_b=\phi_c=\phi_\phi$) між фазними напругами ($\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$) та відповідними фазними струмами ($\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$), то таке трифазне електричне навантаження називається симетричним. Тут $X_\phi=(X_L-X_c)$. При цьому будуть рівними повні опори в фазах приймачів ($Z_a=Z_b=Z_c=Z_\phi$), фазні струми ($\dot{I}_a=\dot{I}_b=\dot{I}_c=\dot{I}_\phi$) та фазні напруги ($\dot{U}_a=\dot{U}_b=\dot{U}_c=\dot{U}_\phi$). Для симетричного трифазного навантаження, з'єданого за схемою Y , справедливі такі відношення:

$$I_L = I_\phi, \quad U_L = \sqrt{3}U_\phi, \quad \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_{nN} = 0.$$

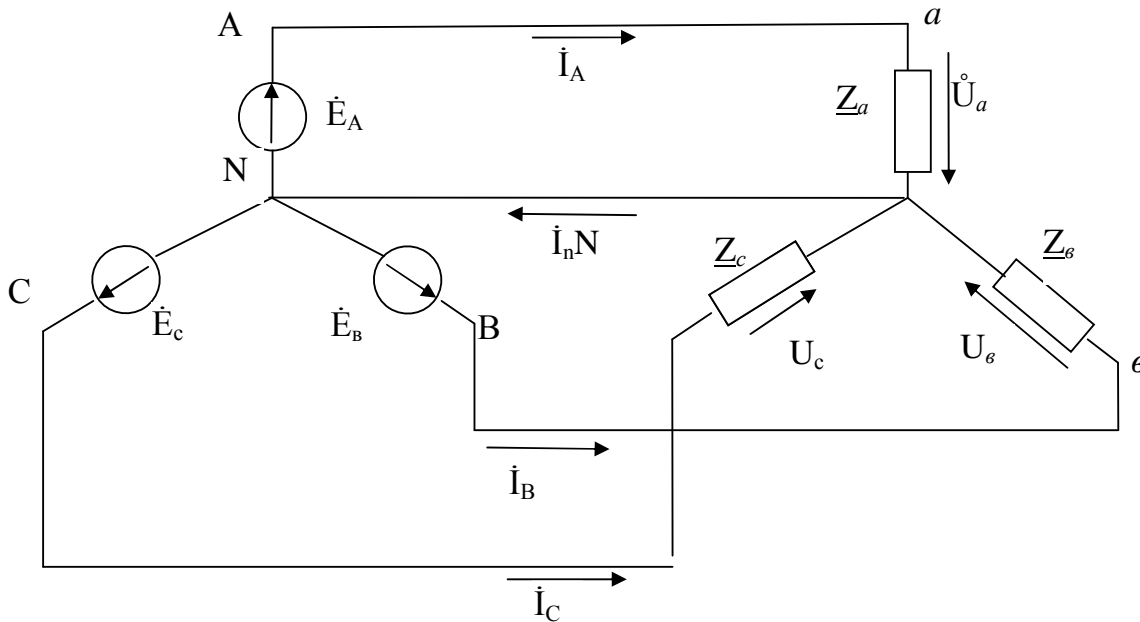


Рисунок 7.1 – Трифазне коло з'єдане "зіркою" (Y)

Через те що струми у нейтральному проводі відсутні ($I_{nN} = 0$), то нейтральний провід не прокладають, використовують трипровідну ЛЕП (наприклад, високовольтні ЛЕП). Якщо одна з вказаних вище умов не виконується, то таке трифазне електрична навантаження вважається несиметричним. При несиметричному трифазному електричному навантаженні нейтральний провід необхідний ($I_{nN} \neq 0$) і прокладається чотирипровідна ЛЕП (наприклад, чотирипровідні ЛЕП, при освітлювальному навантаженні). Від порядку підключення початків фаз приймача (а, в, с) до відповідних лінійних проводів (А, В, С) залежить, наприклад, напрям обертання магнітного поля і ротора в асинхронних та синхронних електродвигунах. Пряма послідовність чергування фаз приймачів створюється, якщо а, в, с підключені до відповідних лінійних проводів А, В і С, зворотна послідовність - при зміні місця підключення двох лінійних проводів (наприклад, провід А підключено до початку с, провід С - до початку а, провід В - до початку в), що веде до зміни напрямку обертання поля і ротору на зворотний (реверс ротору), а також напрямку руху механізму, з'єднаного з ротором.

Опис лабораторного обладнання

Для проведення лабораторної роботи використовуємо стенди № І...8, призначені для дослідження електричних машин та трансформаторів, або стенди типу "Уралочка", призначені для проведення робіт за першою частиною електротехніки. Принципова електрична схема для проведення експериментальних досліджень приведена на рис. 7.2.

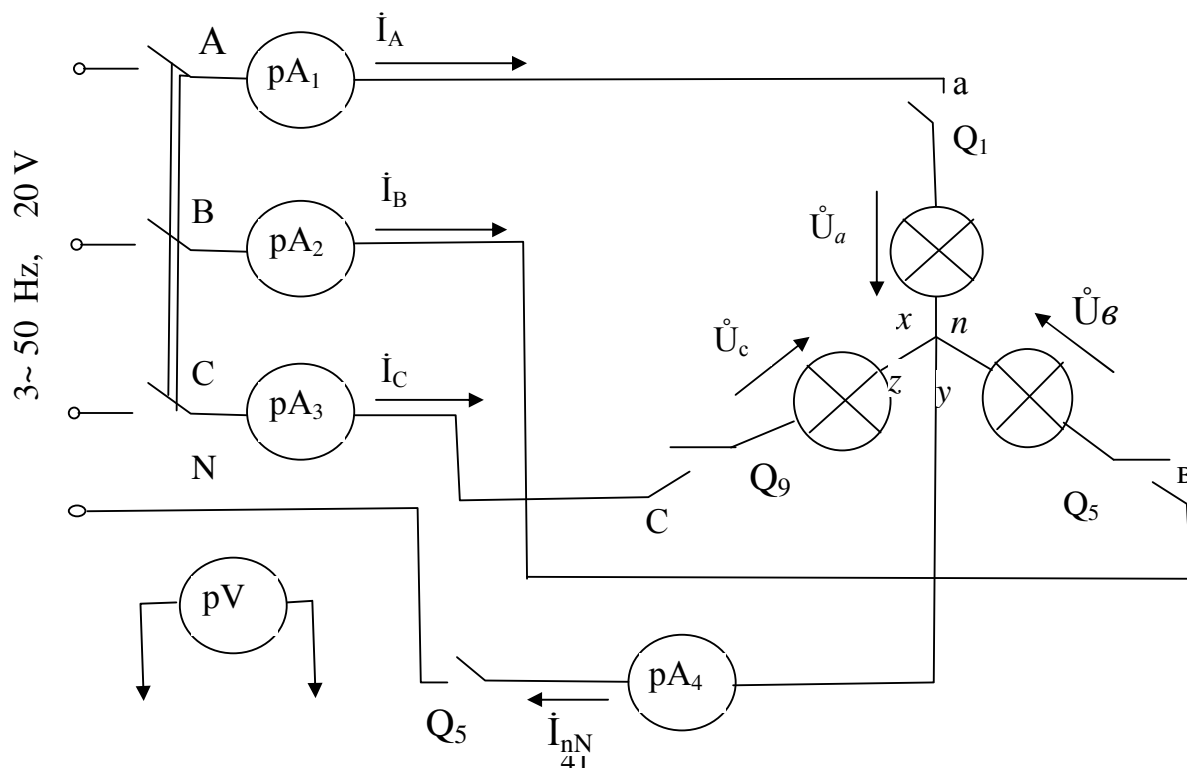


Рисунок 7.2 – Електрична схема установки

При використанні стендів першого типу (№ 1...8) як трифазне електричне навантаження беруть три групи ламп розжарювання однакової потужності (активне навантаження R) по чотири лампи в групі з окремими вимикачами ($Q_1...Q_{12}$) для кожної лампи. Лампи в групі з'єднані паралельно та складають одну з фаз трифазного приймача: між клемми а і х іспитового стенду з'єднано паралельно чотири лампи з вимикачами $Q_1...Q_4$, між клемми в і у - чотири лампи з вимикачами $Q_5...Q_8$, між клемми с і z - чотири лампи з вимикачами $Q_9...Q_{12}$. На схемі (див. мал. 7.2) показано лише по одній лампі в кожній фазі приймача. Для відключення трифазного приймача, підключення до лінійних проводів ЛЕП (А, В, С) використовували автоматичний вимикач (Q_F), який на іспитовому стенді вже підключено до ЛЕП.

Збір схеми починаємо з виходу автоматичного вимикача, тобто від клем А, В і С, розміщених на стенді під вимикачем (Q_F), та ведемо до амперметрів $pA_1...pA_3$, що вибираються на найбільш, струм до 5 А. Обрив нейтрального проводу (між вузлами N і n) та переведення ЛЕП з чотирипровідної в трипровідну виконуємо вимикачем Q_{13} . Амперметр pA_4 , що увімкнений до нейтрального проводу, вибираємо на найбільший струм 2,5 А. Вольтметр pV використовуємо як переносний прилад, його вибираємо на найбільшу напругу 250 В. Для створення трифазного активно-індуктивного навантаження (R, L) послідовно з кожною групою ламп розжарювання підключаємо котушку індуктивності L , для створення трифазного активно-ємнісного навантаження (R, L) послідовно з кожною групою ламп розжарювання підключаємо конденсатори C . Для створення різнорідного навантаження залишаємо, наприклад, в фазі а-х активне навантаження (R , лампи), в фазі в-у між клемми в-у підключаємо котушку індуктивності L і вимикаємо в цій фазі усі лампи вимикачами $Q_5...Q_8$, в фазі с-z між клемми с-z підключаємо конденсатор C і вимикаємо всі лампи вимикачами $Q_9...Q_{12}$. Електрична енергія подається до цих іспитових стендів по чотири провідній ЛЕП (провід А, В, С, N) при лінійному напруженні $U_L=220В$.

При використанні стендів типу „Уралочка" активне навантаження R в кожній фазі приймач набирається на стенді з опорів резисторів за допомогою вимикачів. Активно-індуктивне навантаження в фазі створюється послідовним включенням з реостатом котушки індуктивності, активно-ємнісне навантаження (R, C) в фазі створюється послідовним включенням з реостатом набору конденсаторів з вимикачами. Для створення різнорідного навантаження (R, L, C) вмикаємо в одній з фаз набір реостатів, в другій підключаємо котушку індуктивності, до третьої підключаємо набір конденсаторів. Електрична енергія подається до цих

іспитових стендів по чотирипровідній ЛЕП при лінійній напрузі $U_{л}=35$ В. Амперметри $pA_1...pA_3$ вибираємо на найбільший струм 2 А, амперметр pA_4 на найбільший струм 1 А, вольтметр pV - на найбільшу напругу 100 В.

Порядок проведення експерименту

Після складання електричної схеми та перевірки її викладачем експерименти з дослідження розподілу струмів та напруг в фазах провести в послідовності, наведеній нижче. Результати цих експериментів занести в табл.7.1. Для кожної спроби побудувати векторну діаграму напруг та струмів за масштабом.

- 1) У чотирипровідній мережі створити симетричне трифазне навантаження; увімкнути однакову кількість ламп в кожній фазі на стендах першого типу; однакові опори реостатів в кожній фазі на стендах другого типу, виміряти струми та напруги.
- 2) У чотирипровідній межі при симетричному трифазному навантаженні від'єднати від навантаження один з лінійних проводів (А, В чи С), тобто імітувати обрив лінійного проводу ЛЕП, виміряти струми та напруги.
- 3) У чотирипровідній межі створити несиметричне трифазне навантаження: увімкнути в кожній фазі різну кількість ламп; різні опори реостатів в фазах, виміряти струми та напруги.
- 4) У трипровідній межі (відключити нейтральний провід вимикачем Q_{13}) створити симетричне трифазне навантаження (увімкнути однакову кількість ламп в кожній фазі і однакові опори реостатів в кожній фазі, як це було зроблено раніше, коли виконували спробу 1), виміряти струми та напруги. Порівняти отримані результати з результатами вимірювань для такого самого навантаження у чотирипровідній сітці (спроба 1 в табл. 7.1).
- 5) У трипровідній сітці створити несиметричне трифазне навантаження (включити таку ж кількість ламп в кожній фазі і такі ж за величиною опори реостатів в кожній фазі, як це було зроблено спроби 3), виміряти струми і напруги. Порівняти отримані, результати з результатами вимірювань для такого самого навантаження у чотирипровідній мережі (спроба 3 в табл.7.1).

Таблиця 7.1 – Результати замірів

Номер спроби	I_a	I_b	I_c	I_{nN}	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ac}	U_{Nn}	P
	А	А	А	А	В	В	В	В	В	В	В	Вт
1												
2												
3												

4												
5												
6												
7												

- 6) У чотирипровідній сітці створити різнорідне навантаження за фазами приймача (включити лампи, котушку індуктивності та конденсатор в різні фази; набір реостатів, котушку індуктивності та набір конденсаторів), виміряти струми і напруги.
- 7) У трипровідній межі створити різнорідне навантаження за фазами приймача (R, L, C), виміряти струми і напруги.

Обробка результатів експерименту

1) Для визначення активної потужності в фазі трифазного приймача використати вираз $P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos\phi_{\phi}$.

При активному навантаженні / лампи або резистори / прийняти $\cos\phi=1$. Решту даних беремо з табл. 7.1 ($U_a, U_b, U_c, I_a, I_b, I_c$).

Якщо навантаження симетричне, то активна потужність трифазного приймача $P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos\phi_{\phi} = 3P_{\phi}$. Якщо навантаження несиметричне, то активну потужність трифазного приймача знайдемо як суму активних потужностей окремих фаз: $P = P_a + P_b + P_c$. При активно-індуктивному навантаженні для котушки індуктивності прийняти $\cos\phi = 0,3$. Для конденсаторів прийняти $\cos\phi = 0$. При різнорідному навантаженні по фазам приймача активну потужність знайти для фази з активним навантаженням R і для фази з котушкою індуктивності, сума цих потужностей визначить активну потужність трифазного приймача.

2) Для побудови векторних діаграм напруг і струмів для кожної з проведених спроб (спроби 1...7 в табл. 7.1) вибрати масштаб напруг m_U та масштаб струмів m_I (наприклад, $m_U = 5$ В/мм, $m_I = 0,1$ А/мм). На мал. 7.3 приведені векторні діаграми напруг і струмів трифазного симетричного (а) і несиметричного (б) з'єднаного за схемою Y, при активному навантаженні в фазах R для чотирипровідної сітки (спроби 1 і 3 в табл. 7.1).

Побудову векторної діаграми для кожного виду навантаження (спроби 1...7 в табл.7.1) почати з розміщення симетричної системи векторів лінійних напруг ($\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$), що подаються від симетричного трифазного джерела електроенергії через ЛЕП. Незалежно від схеми з'єднання фаз трифазного джерела електроенергії між лінійними проводами ЛЕП існує три однакові за діючим значенням лінійні напруги $U_{л}$, зсунуті за фазою одна відносно одної на кут $2\pi/3$, які і подаються між початками фаз трифазного приймача. Вектори лінійних напруг утворюють рівнобічний трикутник (а, в, с - вершини трикутника). З центру цього трикутника - точки n (точки перетинання його медіан та бісектрис) виходять вектори фазних напруг приймача при симетричному та несиметричному навантаженні з нейтральним проводом (чотирипровідна ЛЕП). Положення

векторів фазних струмів приймача ($\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$) на векторній діаграмі визначається кутом зсуву за фазою φ_ϕ відносно відповідної фазної напруги ($\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$), який визначається з виразу $\cos\varphi_\phi=R_\phi/Z_\phi$, та, дивлячись на характер навантаження в даній фазі, проводять за масштабом ці вектори. Для активного навантаження (лампи, реостат) вектори фазних струмів збігаються з векторами відповідних фазних напруг ($\cos\varphi_\phi=1, \varphi_\phi=0$), що й показано на рис.7.3. Якщо в фазах приймача буде створене активно-індуктивне навантаження (R, L), то фазні струми будуть відставати від фазних напруг на кут φ_ϕ . Одночасно ці ж вектори є лінійні струми для трифазного приймача, з'єднаного за схемою Y. З векторної діаграми (рис. 7.3, а) бачимо, що при симетричному трифазному навантаженні струм в нейтральному проводі $\dot{I}_{nN}=0$, і це показано на діаграмі пунктирними лініями: $\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$. Відключення нейтрального проводу при цьому не веде до зміни фазних напруг і фазних струмів, кутів φ_ϕ , потужностей і самої векторної діаграми (для спроб 1 і 4 векторні діаграми однакові). При несиметричному трифазному навантаженні та чотирипровідній мережі (рис.7.3,б) симетрія фазних напруг зберігається, але порушується симетрія, фазних струмів (неоднакові повні опори фаз, кути зсуву фаз струмів відносно напруг - обидві, ці умови порушені), і в нейтральному проводі виникає струм \dot{I}_{nN} . Складання векторів фазних струмів показано на векторній діаграмі пунктирними лініями: $\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=\dot{I}_{nN}$. Доки нейтраль джерела N і нейтраль приймача n з'єднані нейтральним проводом, опором якого можна знехтувати, потенціали цих вузлів електричної схеми (див. рис. 7.1) однакові при будь-якому навантаженні і нейтральна точка O буде знаходитись в центрі рівнобічного трикутника з вершинами a, b, c. Зміна навантаження в одній із фаз викликає зміну відповідного фазного струму ($I_\phi=I_n$) і струму в нейтральному проводі I_{nN} , але не впливає на величину фазних напруг і струмів в інших фазах приймача.

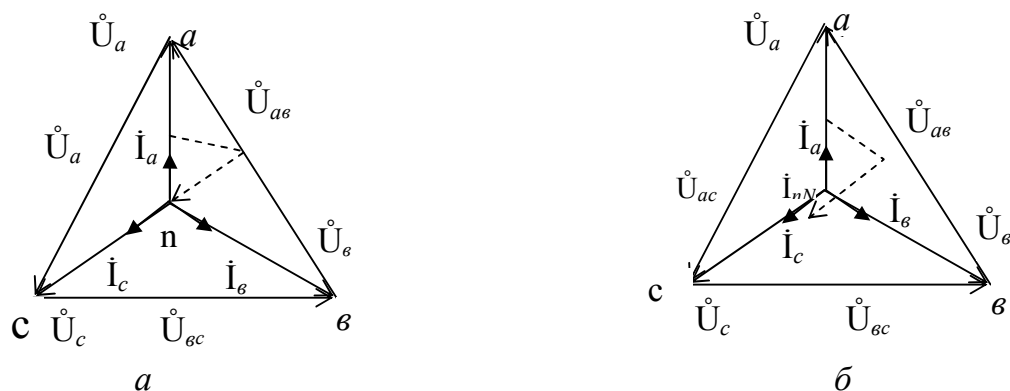


Рисунок 7.3 - Векторні діаграми напруг і струмів для симетричного (а) і несиметричного (б) навантаження

Якщо відбувається обрив одного з лінійних проводів ЛЕП або однієї з фаз приймача (відключення усіх приймачів цієї фази), то приймачі цієї фази залишаються без електроенергії, а приймачі двох інших фаз продовжують отримувати електроенергію від непошкоджених лінійних проводів (спроба 2 в табл. 7.1). При наявності нейтрального проводу для приймачів, приєднаних до непошкоджених лінійних проводів, обрив чужого лінійного проводу практично не відчувається. При відсутності нейтрального проводу (три провідна сітка) приймачі двох фаз, які залишилися будуть відключені послідовно і струм через них буде визначатись величиною лінійної напруги та їх еквівалентним повним опором, а напруги на цих приймачах (фазні напруги) будуть визначатись з виразу $U_{\phi}=IZ_{\phi}$. В такому колі може бути резонанс напруг (підвищення фазних напруг на приймачах ВІД лінійного струму).

Векторну діаграму для несиметричного навантаження при трипровідній сітці (спроба 5 в табл. 7.1) теж починаємо будувати з рівнобічного трикутника лінійних напруг (рис. 7.4).

З відповідних вершин трикутника (а, в, с) радіусами, що дорівнюють вимірним фазним напругам (U_a, U_b, U_c) описати дуги, перетин яких визначить знаходження точки n, яка є початком векторів фазних напруг ($\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$).

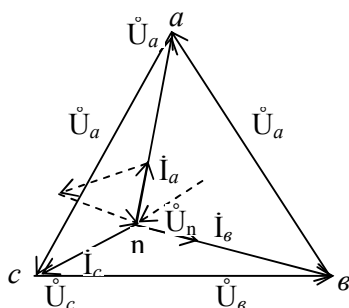


Рисунок 7.4 – Векторна діаграма для несиметричного навантаження при трипровідній мережі

У центрі рівнобічного трикутника лінійних напруг залишається точка N, з якою при наявності нейтрального проводу співпадає точка n. Тепер з'явилась різниця потенціалів між нейтраллю джерела N та нейтраллю приймача n, тобто напруга зміщення потенціалу нейтралі приймача відносно нейтралі генератора U_{nN} , яку ми виміряли при проведенні цієї спроби. Векторна діаграма на рис. 7.4 наведена для несиметричного активного навантаження. Очевидно, що обрив

нейтрального проводу при несиметричному трифазному навантаженні порушує нормальний режим фаз.

Контрольні питання

- 1) Як за допомогою вольтметра виявити в чотирипровідній ЛЕП лінійні проводи та нейтральний провід?

- 2) Яке практичне значення має порядок підключення лінійних проводів (А, В, С; А, С, В) до початків фаз трифазного електричного навантаження
- 3) Який з проводів чотирипровідної ЛЕП надійно заземлюють та з якою метою?
- 4) Які відмінні особливості трифазного симетричного електричного навантаження?
- 5) До яких наслідків веде обрив нейтрального проводу в чотирипровідній ЛЕП?
- 6) При якому трифазному електричному навантаженні досить трипровідної ЛЕП?
- 7) До яких наслідків веде ОБРИВ одного з лінійних проводів в чотирипровідній ЛЕП?
- 8) Яким чином можна визначити напругу між нейтраллями трифазного джерела і приймача \dot{U}_{nN} на векторній діаграмі? Де практично її вимірюють?
- 9) Як визначити активну, реактивну та повну потужності окремих фаз та сумарні потужності трифазного симетричного і несиметричного приймачів?
- 10) Яким чином можна визначити струм в нейтральному проводі на векторній діаграмі?
- 11) Яким чином можна довести, що при симетричному трифазному електричному навантаженні в трипровідній ЛЕП векторна сума лінійних струмів дорівнює нулеві: $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$?
- 12) Для лінійних чи фазних параметрів трифазного електричного навантаження використовують закон Ома?
- 13) Скільки однофазних ватметрів необхідно увімкнути в чотирипровідну ЛЕП при симетричному та несиметричному трифазному електричному навантаженні для вимірювання її сумарної активної потужності?
- 14) Скільки однофазних ватметрів необхідно увімкнути в трипровідну ЛЕП при симетричному та несиметричному трифазному електричному навантаженні для вимірювання її сумарної активної потужності?
- 15) Впливає чи ні послідовність включення неоднорідного електричного навантаження /R, L, C/ в різних фазах трифазного приймача на струм в нейтральному проводі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

ТРИФАЗНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, З'ЄДНАНЕ ЗА СХЕМОЮ „ТРИКУТНИК”

Мета роботи: експериментально дослідити розподіл струмів та напруг в трифазному електричному навантаженні, з'єднаному за схемою "трикутник".

Стислі теоретичні відомості

Перед виконанням даної роботи необхідно, користуючись літературою [1, 2] та конспектом лекцій, самостійно ознайомитись зі схемами з'єднання фаз трифазного джерела і трифазного приймача (трифазного електричного навантаження) при передачі електроенергії від джерела до приймачів через трипровідну лінію електропередачі (ЛЕП), особливостями симетричного та несиметричного трифазного електричного навантаження, співвідношеннями між лінійними і фазними параметрами навантаження при нормальних режимах електропостачання, особливостями аварійних режимів електропостачання при обриві лінійного проводу чи однієї фази приймача.

Трифазна система електропостачання споживачів електричної енергії має багато переваг перед системою з трьох незалежних однофазних кіл: економія провідникових матеріалів; можливість отримання обертового магнітного поля в синхронних або асинхронних електродвигунах, присутність якого складає основу їх принципу дії: можливість використання найбільш простих за конструкцією та надійних в експлуатації асинхронних двигунів; можливість підключення до трифазного джерела фазних приймачів, розрахованих на дві різних за величиною напруги (лінійна або фазна напруга джерела).

Трифазний синхронний генератор можна показати як сукупність трьох однофазних джерел електричної енергії змінного струму, які можуть бути з'єднані за схемою "зірка" Y або "трикутник" Δ . Незалежно від схеми з'єднання фаз трифазного джерела електроенергії (генератора) між лінійними проводами ЛЕП існують три однакові за діючим значенням лінійні напруги U_L , зсунуті за фазою одна відносно одної на кут $2\pi/3$, які й подаються між фаз трифазного приймача. Фази трифазного приймача звичайно з'єднуються за схемами Y чи Δ для підключення до ЛЕП. На рис. 8.1 показане підключення трифазного приймача, фази якого з'єднані за схемою Δ , до трифазного джерела електроенергії, фазні джерела якого (\dot{E}_{AB} , \dot{E}_{BC} , \dot{E}_{CA}) з'єднані за схемою Δ , через трипровідну ЛЕП. З електричної схеми бачимо, що при з'єднанні трифазного приймача за схемою Δ кожна фаза приймача (а-х, в-у, с-з) увімкнена між лінійними проводами ЛЕП і знаходиться під відповідною лінійною напругою, яка одночасно є фазною напругою приймача, тобто $U_\phi = U_L$.

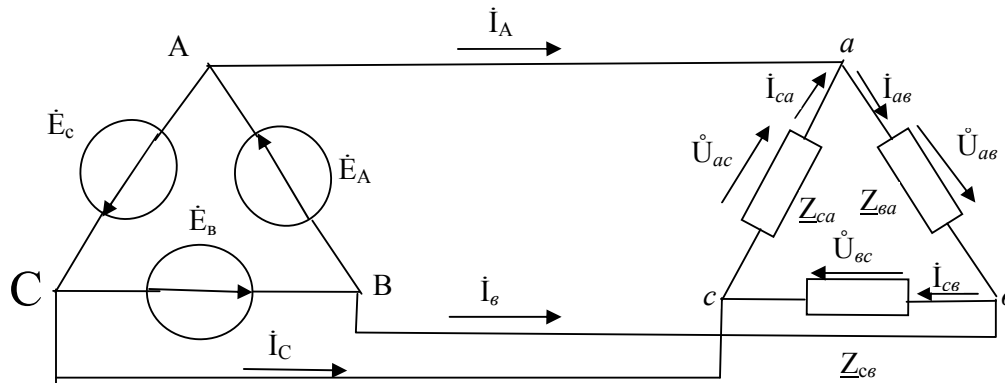


Рисунок 8.1 – Трифазне коло з'єднане „ трикутником”

Звідси можна зробити висновок про те, що з'єднання за схемою Δ треба використовувати в тому випадку, коли кожна фаза трифазного приймача (однофазні приймачі) розрахована на номінальну напругу, рівну лінійній напрузі ЛЕП, до якої вони підключені. Якщо фази приймача розраховані лише на фазну напругу ЛЕП, то їх треба з'єднувати за схемою Y . Фазні джерела трифазного синхронного генератора звичайно з'єднують за схемою Y .

Струми в фазах приймача (I_{ab} , I_{bc} , I_{ca}) можна визначити через фазні параметри згідно з законом Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / Z_{ab} \quad \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / Z_{bc} \quad \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / Z_{ca} ,$$

де Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} - повні опори в фазах приймача;
 \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} , \dot{U}_{ca} - фазні напруги приймача, які дорівнюють лінійним напругам ЛЕП.

Струми в лінійних провадах ЛЕП можна визначити згідно з першим законом Кірхгофа, що записаний для вузлів a , b і c схеми з'єднання приймача: $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$, $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$. Отже, незалежно від характеру навантаження (R , L і C) завжди виконується рівняння $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ (сума лівих і правих частин попередніх рівнянь). Розрахунок трифазного приймача зводиться до розрахунку кожної фази та робиться аналогічно розрахунку звичайного однофазного кола синусоїдального змінного струму. При симетричному трифазному електричному навантаженні діючи значення струмів в фазах приймача однакові за величиною ($I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi$), а отже рівні між собою лінійні струми ($I_A + I_B + I_C = I_\phi$), в цьому разі справедливе відношення $I_L = \sqrt{3}I_\phi$ для схеми Δ .

Опис лабораторного устаткування

Для проведення лабораторної роботи використовуються стенди №1...8, призначені для дослідження електричних машин та трансформаторів, або стенди типу "Уралочка", будова та використання яких при проведенні

спроб докладно описані в роботі 7. Принципова електрична схема для проведення експериментальних досліджень наведена на рис. 8.2.

Порядок проведення експерименту

Після збірки електричного кола та перевірки його викладачем спроби по дослідженню розподілу струмів та напруг в фазах провести в приведеній нижче послідовності. Результати цих спроб занести в табл.8.1.

Для кожної спроби побудувати векторну діаграму напруг і струмів за масштабом.

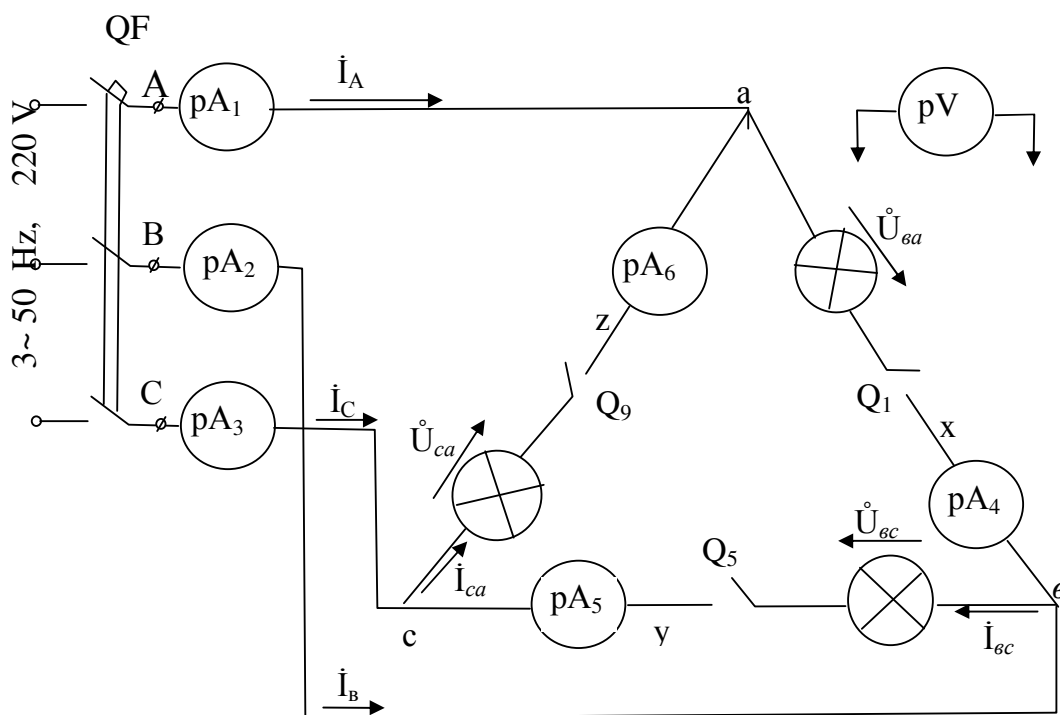


Рисунок 8.2 – Електрична схема установки

Таблиця 8.1- Результати замірів

Номер спроби	U_{ab}	U_{bc}	U_{ac}	I_A	I_B	I_C	$I_{a\phi}$	$I_{c\phi}$	$I_{b\phi}$	P
	В	В	В	А	А	А	А	А	В	Вт
1										
2										
3										
4										

1) Створити симетричне трифазне навантаження (включити однакову кількість ламп в кожній фазі на стендах першого типу; однакові опори реостатів в кожній фазі на стендах другого типу), виміряти струми на напрузі.

2) При симетричному трифазному навантаженні відчепити від навантаження один з лінійних проводів (А, В чи С), тобто імітувати обрив лінійного проводу ЛЕИ, виміряти струми і напруги.

3) Створити несиметричне трифазне навантаження (включити в кожній фазі різну кількість ламп; різні опори реостатів в фазах), виміряти струми і напруги.

4) Створити різнорідне навантаження за фазами приймача (включити лампи, котушку індуктивності та конденсатор в різні фази), виміряти струми і напруги.

Оброблення результатів експерименту

1) Дані для розрахунку активної потужності трифазного приймача взяти з табл. 8.1. Якщо навантаження несиметричне, то активну потужність трифазного приймача знайти як суму активних потужностей окремих фаз: $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$. Активну потужність в фазі знайти з виразу $P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$, для активного навантаження (лампи, реостат) взяти $\cos \varphi_{\phi} = 1$. При розрахунку активної потужності котушки індуктивності прийняти $\cos \varphi = 0,3$. Для конденсатора прийняти $\cos \varphi = 0$. Якщо навантаження симетричне, то активна потужність трифазного приймача $P = 3P_{\phi}$.

2) Для побудови векторних діаграм напруг і струмів для кожної з проведених спроб (спроби 1...4 в табл.8.1.) вибрати масштаб напруг m_u та струмів m_i . На рис. 8.3 наведені векторні діаграми напруг і струмів для трифазного симетричного приймача (а) при активному навантаженні в фазах і для різнорідного навантаження в фазах (б), з'єднаних за схемою Δ (спроби 1 і 4 в табл. 8.1.).

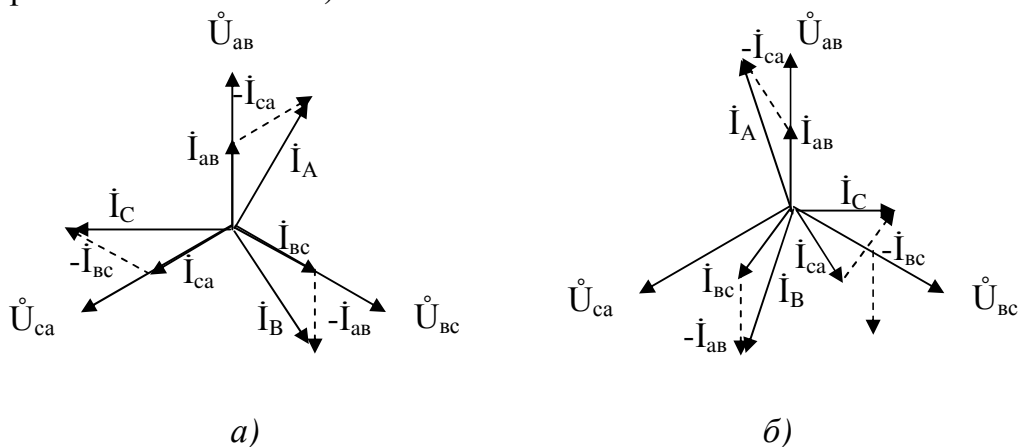


Рисунок 8.3 – Векторні діаграми напруг і струмів при симетричному (а) і несиметричному (б) навантаженні

Побудову векторної діаграми для кожного виду навантаження почати з розміщення симетричної схеми векторів лінійних напруг ($\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$), що подаються від симетричного трифазного джерела електроенергії через ЛЄП. Вектор лінійної напруги \dot{U}_{ab} заведено направляти вертикально вгору, вектор \dot{U}_{bc} відстає від нього на 120° , вектор \dot{U}_{ca} відстає від вектора \dot{U}_{bc} на 120° . Одночасно ці ж вектори є фазними напругами для трифазного приймача, з'єднаного за схемою Δ . Положення векторів фазних струмів приймача ($\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$) на векторній діаграмі визначається кутом зсуву за фазою відносно відповідної фазної напруги, який можна знайти з виразу $\cos \varphi = R_\phi Z_\phi$, і згідно з характером навантаження в фазі провести ці вектори. Для активного навантаження R вектори фазних струмів збігаються з векторами відповідних фазних напруг ($\cos \varphi_\phi = 1, \varphi_\phi = 0$), що показано на рис. 8.3, а. При активно-індуктивному навантаженні (R, L) фазні струми будуть відставати від відповідних фазних напруг на кут φ_ϕ , при активно-ємнісному (R, C) - випереджати відповідні фазні напруги. Після розміщення фазних струмів графічно знайти вектори струмів в лінійних проводах з використанням рівнянь:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ba} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ba}.$$

З векторної діаграми (див. рис.8.3,а) бачимо, що при симетричному навантаженні система векторів фазних струмів та лінійних струмів симетрична. Інколи вектори лінійних струмів зображують з'єднуючими кінці векторів відповідних фазних струмів.

При несиметричному трифазному навантаженні (спроба 3 в табл.8.1) порушується симетрія як фазних, так і лінійних струмів. Всяка зміна опору в одній з фаз приймача викликає одночасну зміну відповідного фазного струму і двох лінійних струмів (струмів в лінійних проводах, підключених до цієї фази), але не впливає на величину фазних напруг ($U_\phi = U_\Delta$) і фазних струмів в інших фазах трифазного приймача, а також на величину третього лінійного струму. Незалежність величини фазної напруги від величини опору фази приймача – одна з переваг схеми Δ порівняльно зі схемою Y без нейтрального проводу, що дає можливість використовувати схему Δ при несиметричному навантаженні.

Обрив одного з лінійних проводів (спроба 2 в табл. 8.1) порушує нормальний режим електропостачання трифазного приймача. При цьому приймачі лише цієї фази будуть знаходитись під номінальною фазною ($U_\phi = U_\Delta$). Приймачі двох інших фаз виявляться з'єднаними послідовно і будуть знаходитись під цією ж фазною напругою, струм через них буде визначатися їх еквівалентним повним опором, а напруги на цих приймачах

(фазні напруги) будуть визначатися виразом ($U_{\phi} = IZ_{\phi}$). Отже, ці приймачі опиняться під напругами, які відрізняються від номінального значення фазної напруги. В такому колі може бути резонанс напруг, що супроводжується появою підвищених напруг (більше $U_{л}$) на затискачах фаз і різним підвищенням струму в цих фазах.

Контрольні питання

- 1) Яке практичне значення має послідовність підключення лінійних проводів (А, В, С; А, С, В) до початків фаз трифазного приймача?
- 2) Які відмітні особливості трифазного симетричного електричного навантаження?
- 3) У якому разі фазні напруги на зажимах приймача можуть бути вище лінійної напруги ЛЕП?
- 4) Якщо в одній з фаз приймача відключені всі приймачі, з'єднані паралельно, то зміняться в зв'язку з цим фазні струми в двох інших фазах чи ні? Вплине це чи ні на величину струмів в лінійних проводах?
- 5) Як зміняться фазні струми симетричного трифазного навантаження при обриві одного з лінійних проводів?
- 6) Як зміниться величина струму в лінійному проводі і активна потужність симетричного трифазного навантаження, якщо при інших незмінних параметрах пере'єднати її фази зі схеми Y на схему Δ ?
- 7) Зміняться чи ні величини фазної напруги і фазного струму при зміні величини опору в фазі трифазного приймача?
- 8) Як графічно визначити лінійні струми при симетричному і не симетричному трифазному навантаженні, якщо фазні струми і кути зсуву фаз відомі?
- 9) Симетрична або несиметрична система векторів лінійних струмів має місце при рівних повних опорах фаз трифазного приймача для різнорідного електричного навантаження на фазах (R, L, C)?
- 10) Яким чином можна довести рівність $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ при будь-якому трифазному електричному навантаженні, ви користувалися векторну діаграму напруг і струмів?
- 11) Як визначити активну, реактивну та повну потужність окремих фаз трифазного симетричного і несиметричного приймача при відомих фазних параметрах навантаження?
- 12) Для яких параметрів трифазного приймача (лінійних чи фазних) використовують законом Ома?
- 13) Скільки однофазних ватметрів необхідно увімкнути в електричну схему для вимірювання активної потужності трифазного симетричного і несиметричного приймачів?

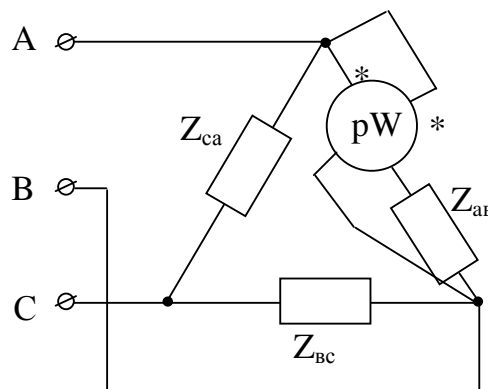
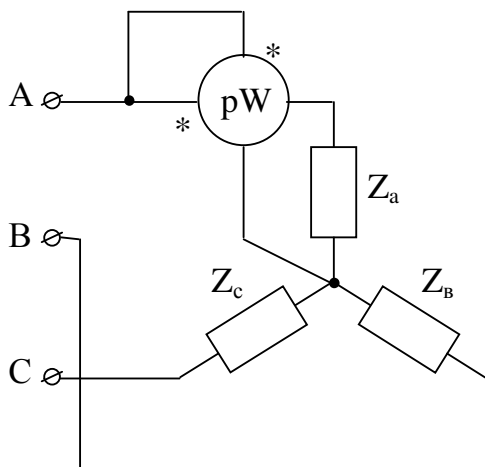
- 14) Яким чином зв'язані лінійна напруга ЛЕП та вибір схеми з'єднання фаз трифазного приймача?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9 ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ТРИФАЗНОМУ КОЛІ

Мета роботи: вивчити методи вимірювання активної потужності у трифазних колах змінного струму.

Стислі теоретичні відомості

Активна потужність трифазного кола при симетричному режимі та з'єднанні приймачів „зіркою” з доступною нейтральною точкою (рис. 9.1, а), а також при можливості включення послідовної обмотки однофазного ватметра в фазне коло приймачів, з'єднаних „трикутником” (рис 9.1, б), може бути виміряна одним приладом, що вказує величину $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$, де P_ϕ, U_ϕ, I_ϕ відповідно фазні потужність, напруга, струм; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності приймачів. Включений ватметр ураховує активну потужність однієї фази, тому для отримання активної потужності трифазної системи при симетричному режимі необхідно показ його помножити на три, тобто $P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$.



а

б

а – „зіркою”, б – „трикутником”

Рисунок 9.1 – Вимірювання активної потужності при симетричному навантаженні

При недоступних приймачах треба використовувати схему з штучною нейтральною точкою (рис 9.2) незалежно від типу з'єднання приймачів, при цьому треба виконати умову

$$R_y + R_{обм} = R_1 = R_2 ,$$

де $R_{обм}$ - опір паралельної обмотки (обмотки напруги) ватметра.

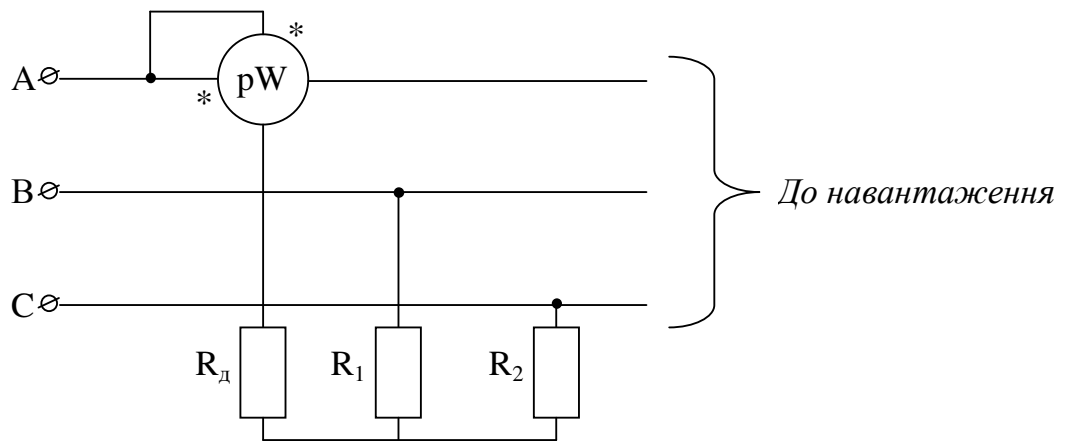


Рисунок 9.2 – Вимірювання активної потужності при симетричному режимі трифазної системи і недоступних приймачах

У трифазному колі при несиметричному режимі активну потужність вимірюють трьома однофазними (рис.9.3), двома однофазними (рис.9.4) або одним трифазним ватметром.

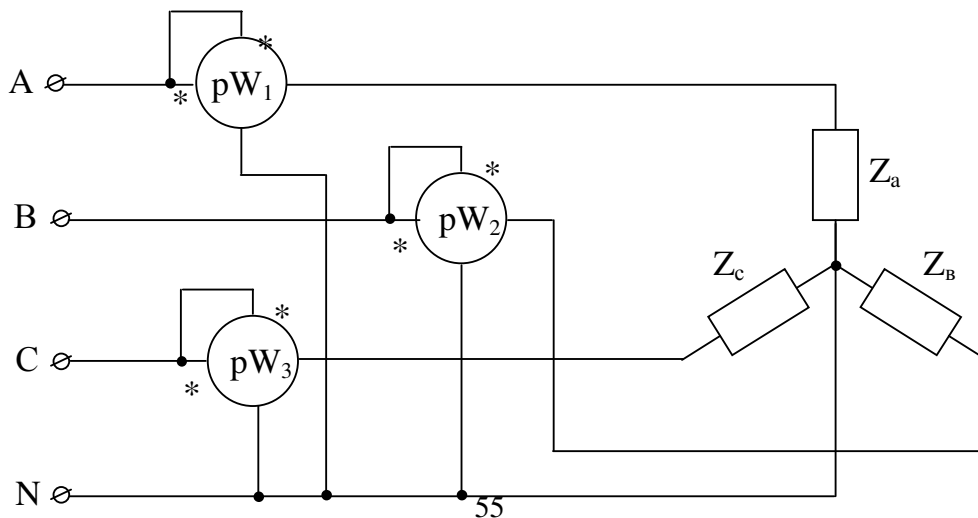


Рисунок 9.3 – Вимірювання активної потужності трьома однофазними ватметрами

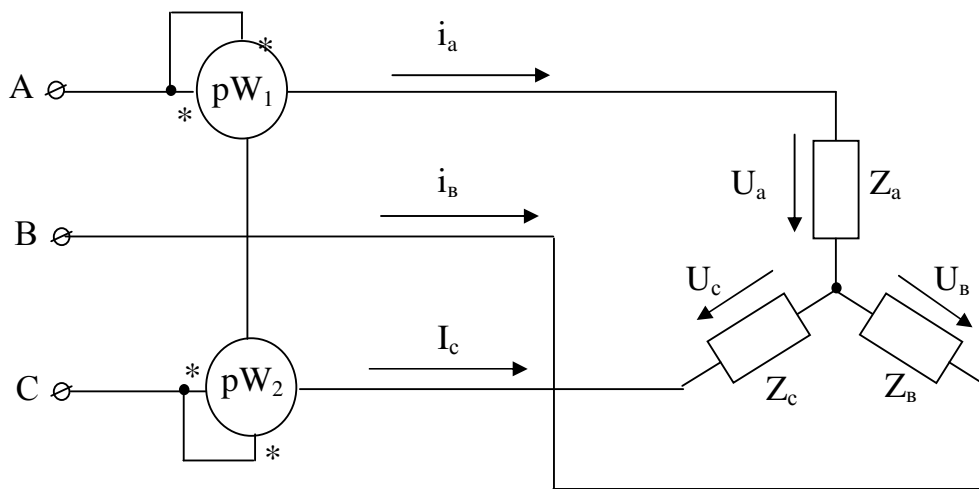


Рисунок 9.4 – Вимірювання активної потужності двома однофазними ватметрами

Активна потужність трифазного кола (див. рис. 9.3) дорівнює:

$$P = P_A + P_B + P_C .$$

Активна потужність кола (див.рис. 9.4) з двома однофазними ватметрами визначається як алгебраїчна сума показів двох ватметрів:

$$P = P_{AB} + P_{CB} .$$

Схема з двома ватметрами універсальна і широко застосовується для вимірювання потужності у трипровідних трифазних колах, тобто при з'єднанні приймачів „трикутником” і „зіркою” без нейтрального проводу

як при симетричному, так і при несиметричному навантаженні фаз. В основі методу двох ватметрів лежать наступні теоретичні положення. Миттєве значення потужності в трифазному колі можна уявити в вигляді суми миттєвих значень потужностей окремих фаз. Наприклад, для трипровідної „зірки” (див.рис. 9.4.).

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a i_a + U_b i_b + U_c i. \quad (9.1)$$

Згідно з 1 законом Кірхгофа

$$i_a + i_b + i_c = 0_1,$$

звідси

$$i_b = -(i_a + i_c). \quad (9.2)$$

Підставляючи вираз (9.2.) в рівняння (9.1.), одержимо:

$$P = U_a i_a - U_b (i_a + i_c) + U_c i_c = i_a (U_a - U_b) + i_c (U_c - U_b). \quad (9.3)$$

У цьому виразі замість фазних напруг підставимо лінійні напруги:

$$U_a - U_b = U_{ab}, \quad U_c - U_b = U_{cb},$$

тоді вираз (9.3) набуває вигляду

$$P = U_{ab} i_a + U_{cb} i_c.$$

Треба звернути увагу на те, що напруга U_{cb} зворотна лінійній напрузі U_{bc} , тобто $U_{cb} = -U_{bc}$.

Активна потужність кола є середнє значення миттєвої потужності за період

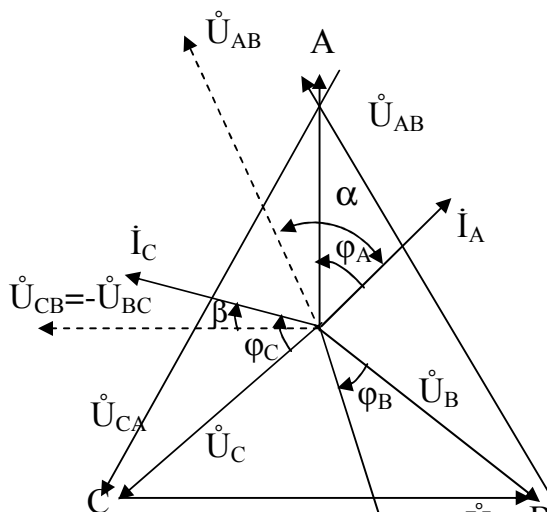
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt.$$

Підставляючи в цей раз вираз значення миттєвої потужності, після інтегрування одержимо:

$$\begin{aligned} P &= P_{AB} + P_{CB} = U_{AB} I_A \cos(\dot{U}_{AB}, \dot{I}_A) + U_{CB} I_C \cos(\dot{U}_{CB}, \dot{I}_C) = \\ &= U_{AB} I_A \cos \alpha + U_{CB} I_C \cos \beta \end{aligned} \quad (9.4)$$

На рис.9.5 наведена вектора діаграма при активно – індуктивному навантаженні, з якої бачимо, що $\alpha = \varphi_a + 30^\circ$, $\beta = \varphi_c - 30^\circ$.

Звідси отримуємо наступне: якщо характер навантаження такий, що $\varphi_a = 60^\circ$, кут α становить 90° і, отже, потужність $P_{AB} = 0$, а потужність усього навантаження P рівна P_{CB} , при значенні φ_a від 60° до 20° кут $\alpha > 90^\circ$ і $\cos \alpha$, а



отже, і потужність P_{AB} стає менше нуля ($P_{AB} < 0$); кут β не перевищує 90° при будь-якому значенні φ_c (від 0 до 90°), тому доданок P_{CB} завжди позитивний.

Якщо навантаження несе ємнісний характер, значення α і β міняються місцями. Звідси і у виразі (9.4) сума $P_{AB} + P_{CB}$ повинна роздвигатися як алгебраїчна.

За цим принципом виконується конструкція трифазного ватметра. При негативному показанні стрілки однофазних ватметрів заходять за нульову позначку. Для вимірювання негативних показань необхідно змінити в одній з обмоток ватметра напрям струму.

Опис лабораторного устаткування

Схема електричного кола для проведення експерименту наведена на рис.9.6.

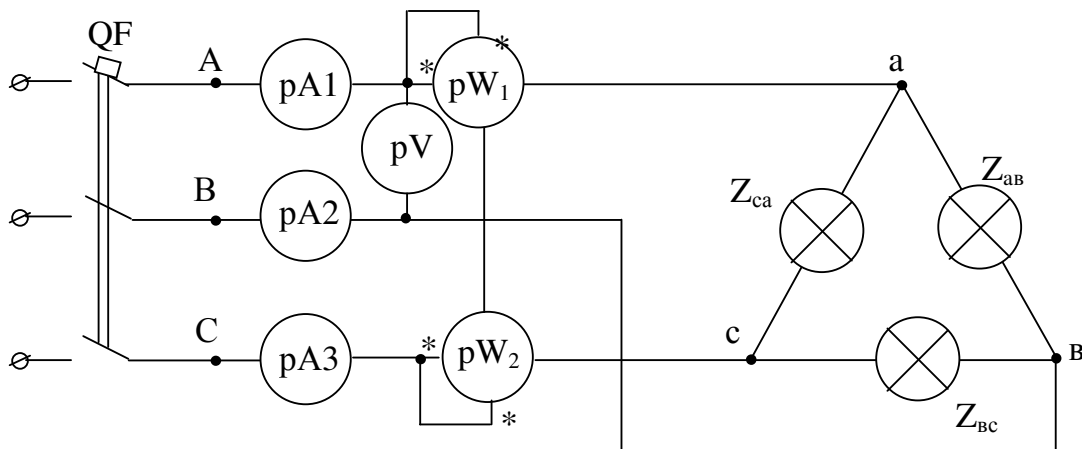


Рисунок 9.6 – Схема кола для вимірювання активної потужності

Прилади, що використовуються:

- вольтметри, pW_1 і pW_2 з межами вимірювання за струмом 5А; за напругою 300 В;
- амперметри pA_1, pA_2, pA_3 з межами вимірювання 5А;
- вольтметр pV_1 з межею вимірювання 250 В;
- трифазний кіловатметр та вимірювач коефіцієнта потужності.

Як активне навантаження використовують лампи розжарювання.

Порядок проведення експерименту

- 1) Зібрати коло, наведене на рис.9.6.
- 2) Виміряти потужності при симетричному та несиметричному активному навантаженні для двох значень лінійного струму. Навантаження змінювати ламповими реостатами. Результати занести до табл. 9.1.
- 3) У двох фазах послідовно з лампочками увімкнути індуктивність і ємність. При двох значеннях лінійного струму виміряти активну потужність і $\cos \varphi$. Результати записати в табл. 9.1.

Таблиця 9.1-Результати замірів

Характер навантаження	Виміряно						Обчислено
	I, А	U, В	P, кВт	cosφ	P ₁ , Вт	P ₂ , Вт	P, Вт
Симетричне активне							
Несиметричне активне							
Несиметричне різнорідне							

Обробка результатів вимірювань

За показаннями однофазних ватметрів обчислити активну потужність кола та порівняти її з показаннями трифазного кіловатметра.

Зробити висновки.

Контрольні питання

- 1) У яких випадках та за якими схемами можна виміряти активну потужність трифазної системи одним однофазним ватметром ?
- 2) З яких міркувань вибирають величину опорів додаткових резисторів до однофазного ватметра для утворення штучної нейтральної точки ?
- 3) Коли для вимірювання активної потужності трифазної системи можна користуватися схемою двох однофазних ватметрів ?
- 4) При яких умовах два однофазних ватметра, включених для вимірювання активної потужності трифазної системи, дають однакові показання?
- 5) Скільки зажимів має трифазний ватметр?
- 6) Як виміряти коефіцієнт потужності трифазного приймача?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Мета роботи: експериментально дослідити характер перехідного процесу при заряді та розряді конденсатора та можливість регулювання його тривалості зміною параметрів кола.

Стислі теоретичні довідки

У електричних колах можуть відбуватися включення та відключення окремих віток, короткі замикання будь-яких ділянок, різного роду переключення, раптові зміни параметрів, відключення усього кола від джерела електричної енергії взагалі або підключення до нього. У результаті таких перетворень, що називаються комутаційними або просто комутаціями, в колі виникають перехідні процеси. Вважають, що процес комутації проходить миттєво, а практична тривалість перехідних процесів в різних колах – від часток секунд до декількох секунд, теоретично ж – це безмежно великий час.

Час перехідного процесу починається з моменту комутації $t=0$. Мить часу безпосередньо перед комутацією позначають „0-“, а відразу після комутації – „0+“.

Після комутації змінюється енергія індуктивних ($W_H = \frac{LI^2}{2}$) та ємнісних ($W_E = \frac{CU^2}{2}$) елементів. Потужності джерел електричної енергії, від яких реактивні елементи отримують енергію,

$$P = \frac{dW_M}{dt} \quad \text{або} \quad P = \frac{dW_E}{dt} .$$

Із співвідношень для потужностей бачимо: для того, щоб енергія індуктивних та є ємнісних елементів могла змінитися миттєво ($dt \rightarrow 0$), джерела повинні володіти безмежно великою потужністю ($P \rightarrow \infty$).

Для існуючих джерел W_M і W_E миттєво змінитися не можуть, а отже, не можуть змінитися миттєво струм в вітці та напруга на ємності. Це й стверджується в двох законах комутації, які використовуються для розрахунку перехідних процесів.

Перший закон комутації: струм в вітці з індуктивністю не може змінитися стрибком:

$$i_L(0-) = i_L(0+).$$

Розрахувати перехідний процес – це означає визначити аналогічні вирази, згідно з якими змінюються струми та напруги під час перехідного процесу. Як приклад розглянемо коло, що представлено на рис.10.1.

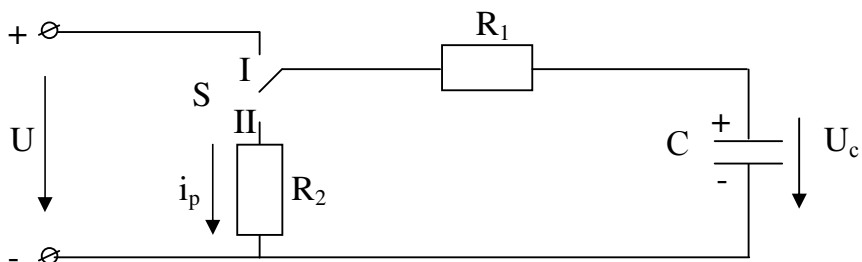


Рисунок 10.1 – Електричне коло з постійною напругою для заряду та розряду конденсатора

Заряд конденсатора

У положенні I перемикача S відбувається заряд конденсатора. Рівняння, складене за другим законом Кірхгофа для цього кола, буде відповідати будь-якій миті часу перехідного процесу:

$$iR_1 + U_c = U. \quad (10.1)$$

Ураховуючи, що $i = dq/dc = CdU_c/dt$, це рівняння можна записати:

$$R_1C \frac{du_c}{dt} + U_c = U. \quad (10.2)$$

Класичний метод розрахунку перехідних процесів полягає в інтегруванні диференційних рівнянь, що зв'язують струми та напруги кола. Рівняння (10.2) вирішується відносно напруги та конденсаторі U_c . Повний інтеграл цього рівняння розбивається як сума приватного рішення неоднорідного рівняння плюс загальне рішення однорідного. Згідно з цим струми і напруги під час перехідного процесу можуть бути представлені двома складовими: примушеною та вільною. Примушена складова U_{cnp} для нашого рівняння виходить як частинне рішення неоднорідного рівняння при $t \rightarrow \infty$ ($R_1C \frac{du_c}{dt} \rightarrow 0$):

$$U_{cnp} = U.$$

Це та напруга на конденсаторі, яка установлюється на його обкладинках після закінчення перехідного процесу (нове стає значення).

Вільна складова $U_{cсв}$ є загальне рішення однорідного диференційного рівняння $R_1 C du_c / dt = 0$

$$U_{cсв} = A e^{-\frac{1}{R_1 C} t},$$

де A – постійна інтегрування, а $\frac{1}{R_1 C} = p$ – корінь характеристичного рівняння, складеного для кола рис. 10.1.

$$R_1 C p + 1 = 0.$$

Вільні складові струмів та напруг під час перехідних процесів виникають за рахунок енергій W_M і W_E , накопичених реактивними елементами, і природно, що по закінченні перехідних процесів вони завжди прямують до нуля.

Вираз для повної напруги на конденсаторі під час перехідного процесу визначиться як сума примушеної і вільної складових:

$$U_c(t) = U_{cпр} + U_{cсв} = U + A e^{-\frac{1}{R_1 C} t}. \quad (10.3)$$

Постійну інтегрування A визначають з початкових умов – значень струмів та напруг на індуктивних та ємнісних елементах при $t=0$.

Напруга на конденсаторі в нашому колі до комутації дорівнювала нулю $U_c(0) = 0$; на основі другого закону комутації в першу мить після комутації (перехідний процес вже почався) вона теж буде дорівнювати нулю, тобто

$$U_c(0-) = U_c(0+) = 0.$$

Тоді рівняння (10.3.), що описує стан кола під час перехідного процесу, для $t = 0$ можна записати:

$$0 = U + A,$$

звідки $A = -U$

Після цього запишемо кінцеве рівняння:

$$U_c(t) = U_{cпр} + U_{cсв} = U \cdot U e^{-\frac{1}{R_1 C} t} = U(1 - e^{-\frac{1}{R_1 C} t}). \quad (10.4)$$

Величина RC , яка має розмірність часу, позначається τ і називається постійною часу RC – кола, - це час, протягом якого вільні складові струму

або напруги зменшуються в e разів порівняльно зі своїми початковими значеннями.

Величина, зворотна постійній часу, $a = 1/\tau = 1/R_1C$ називається коефіцієнтом затухання. Вільна складова напруги (або от уму) затухає тим повільніше, чим більше постійна часу τ і чим менше коефіцієнт затухання a .

Величина постійної часу, а отже й тривалість перехідного процесу, визначається лише параметрами кола. Практично перехідний процес закінчується за час, рівний (4-5) τ . Дотична, проведена до кривої $U_c(t)$ на початку координат або будь-якої іншої точки відсікає на горизонтальній осі відрізок, за масштабом часу рівний постійній часу τ .

Вираз для струму під час перехідного процесу можна отримати, диференціюючи вираз (4):

$$i_3(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{R_1C}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10.5)$$

На рис.10.2 зображені графіки $U_c(t)$ і $i_c(t)$ під час заряду конденсатора.

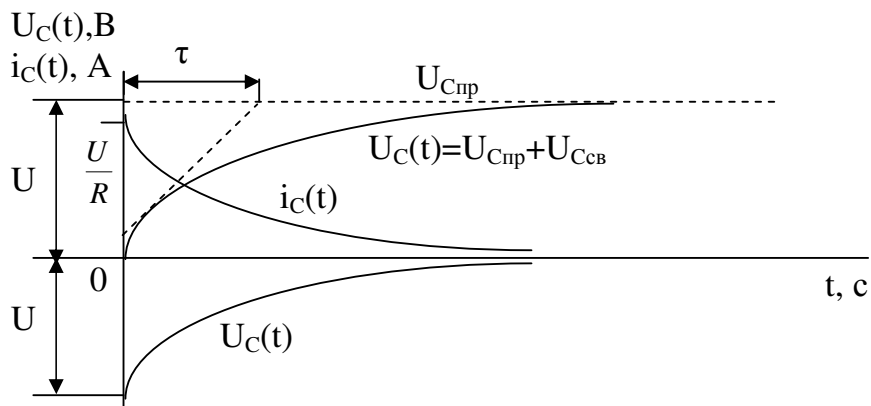


Рисунок 10.2 – Графіки зміни напруги та струму під час перехідного процесу при заряді конденсатора

Враховуючи, що в рівнянні (10.1) $U_c = \frac{1}{C} \int i dt$, можна рівняння записати: $iR + 1/C \int i dt = 0$ і вирішити відносно струму, визначивши його примушену і вільну складові.

Розряд конденсатора

Якщо після заряду конденсатора вимикач S перевести в положення II, почнеться перехідний процес розряду конденсатора. Рівняння (10.1) і (10.2) для цього випадку будуть відрізнятися лише додатковим опором R_2 :

$$i(R_1 + R_2) + U_c = U; \quad (R_1 + R_2)C \frac{dU_c}{dt} + U_c = U.$$

Примушена складова напруги в цьому разі буде дорівнювати нулю: $U_{\text{сnp}} = 0$, тому що перехідний процес скінчиться повним розрядом конденсатора, Тоді вираз для повної напруги та конденсаторі при перехідному процесі

$$U_c(t) = U_{\text{сnp}} + U_{\text{св}} = 0 + A e^{\frac{-1}{(R_1+R_2)C}t}.$$

Напруга на конденсаторі до початку перехідного процесу була рівною напрузі, прикладеній до кола, враховуючи її закон комутації:

$$U_c(0-) = U_c(0+) = U = 0 + A,$$

звідки $A = U$.

Кінцевий вираз напруги на конденсаторі під час розряду

$$U_c(t) = U e^{\frac{-1}{(R_1+R_2)C}t} = U e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10.6)$$

Постійна часу кола розряду $\tau = (R_1 + R_2)C$ більше постійної часу кола заряду, тому тривалість перехідного процесу при розряді конденсатора буде більша. Вираз для струму під час розряду

$$i_p(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} = -\frac{U}{R_1 + R_2} e^{\frac{-1}{(R_1+R_2)C}t} = -\frac{U}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10.7)$$

На рис.10.3 наведені графіки напруги і струму при розряді конденсатора.

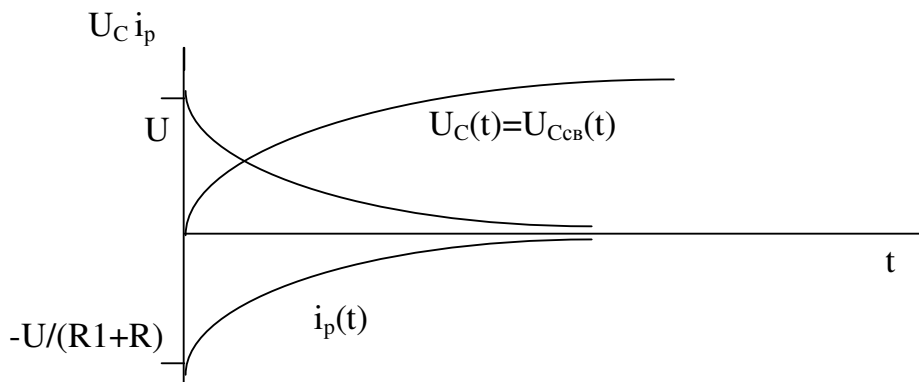


Рисунок 10.3 – Графіки струму та напруги під час перехідного процесу при розряді конденсатора

При заряді конденсатора енергія джерела перетворюється в енергію електричного поля конденсатора і в теплову на активному опорі, при розряді уся енергія електричного поля конденсатора перетворюється в теплову на активних опорах в колі розряду.

Час перехідних процесів малий, але з ним треба рахуватися в багатьох випадках електротехнічної практики.

В енергетиці – це режими, в електроприводах – режими пуску та гальмування, регулювання швидкості електродвигунів, робота різноманітних систем керування, в електроніці – розробка численних перетворюючих приладів і т. п.

Проведення експерименту та аналіз даних

- 1) Зібрати схему електричного кола (рис.10.4).

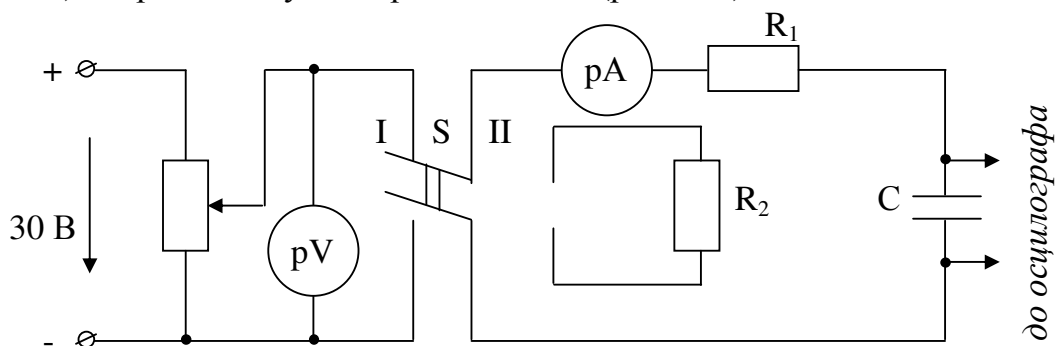


Рисунок 10.4 – Схема електричного кола для проведення експерименту

- 2) Установити перемикач S в нейтральне положення I за допомогою потенціометра і вольтметра виставити необхідну напругу джерела постачання, за вказівкою викладача установити значення опорів R₁, R₂ і ємності конденсатора C.

- 3) Для даних R₁, R₂, C визначити постійні часу кола заряду τ_3 і кола розряду τ_p і занести їх значення до графі „розрахунок” табл. 1.

- 4) Установити перемикач S в положення I і, користуючись секундоміром, виміряти значення зарядного струму в миті часу перехідного процесу, вказані в табл. 10.1. Для кожного виміряного значення струму обчислити напруги на активному опорі U_{R1} і конденсаторі U_c :

$$U_{R1} = IR_1, \quad U_c = U - U_{R1}.$$

- 5) Установити перемикач S в положення II та виміряти значення струму розряду конденсатора як в п.4. Напругу на конденсаторі визначити

як різницю між напругою джерела та сумарною напругою на двох активних опорах:

$$U_c = U - (U_{R1} + U_{R2}).$$

Дані замірів та розрахунків занести до таблиці 10.1.

б) Для значень R_1, R_2, C , використовуються вирази (4...7), розрахувати значення струму та напруги для заряду і розряду конденсатора, підставляючи в ці вирази значення часу t , вказане в табл.10.1. Отримані розрахункові значення занести в табл.10.1.

Таблиця 10.1 – Розрахункові значення

Час підрахунку даних, С	$R_1=0\text{М}, R_2=0\text{М}, C=\Phi$										Розрахунок				
	Експеримент					Розряд					Заряд		Розряд		
	U, В	$i_3, \text{А}$	$U_R, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$\tau_3, \text{с}$	$\tau_p, \text{с}$	$i_p, \text{А}$	$U_R, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$\tau, \text{с}$	$i_3, \text{А}$	$U_C, \text{В}$	$\tau_p, \text{с}$	$i_p, \text{А}$	$U_C, \text{В}$
t=0, $\tau=$															
t=0.1, $\tau=$															
t=0.3, $\tau=$															
t=0.5, $\tau=$															
t=0.7, $\tau=$															
t=1.0, $\tau=$															
t=2.0, $\tau=$															
t=3.0, $\tau=$															
t=4.0, $\tau=$															

7) В окремих координатах побудувати криві струму і напруги на ємності, отримані експериментально для двох перехідних процесів (заряду і розряду конденсатора), графічно визначити значення постійного часу τ_3 і τ_p . У цих же координатах відповідно побудувати такі самі залежності, отримані розрахунковим шляхом, порівняти їх між собою.

8) Підключити електронний осцилограф до конденсатора та змалювати екрані криві напруги при заряді та розряді послідовно змінюючи значення напруг постачання, опорів R_1, R_2 ємності C , намалювати отримані криві напруг та визначити, від чого залежить тривалість перехідного процесу.

Контрольні питання

- 1) Назвати причини виникнення перехідних процесів.
- 2) Що відбувається з реактивними елементами під час перехідних процесів? Дайте визначення двох законів комутації.

- 3) Чи виникають перехідні процеси в колах, вміщуючи лише ідеальні активні елементи?
- 4) Що таке постійна часу кола?
- 5) Від чого залежить тривалість перехідних процесів? Як їх можна змінити?

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Борисов Ю.М. Электротехника: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Н.Липатов, Ю.Н.Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
- 2 Касаткин А.С. Элетротехника / М.В.Немцов. – М.: Энергоиздат, 1983. – 440 с.
- 3 Электротехника / Под ред. В.Г.Герасимова. – М.: Высш. шк., 1983. – 480 с.
4. Иванов А.А. Электротехника. Лабораторные работы: Для неэлектротехн. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк., 1982, - 343 с.
5. Иванов И.И. Электротехника: Учеб. для вузов / В.С.Равдоник. – М.: Высш. шк., 1984. – 375 с.
6. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г.Герасимова: Для неэлектротехн. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 1987. – 288 с.

