УДК 621.3.011.7

ББК 31.211

Е 50

Рецензенти:

А.Г. Сосков, д-р. техн. наук, проф., Харківська національна академія міського господарства

О.С. Середа, к.т.н., доц., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

Е 50 Електричні кола: лабораторний практикум з електротехніки Ч.I/В.Г.Данько, Н.В. Крюкова, В.С. Марков та ін. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – 47 с.

ISBN

Подано хід виконання п’яти лабораторних робіт з розділу «Електричні кола» курсу «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка у вигляді комплексної самостійної роботи для підготовки до виконання лабораторних робіт. Також подано теоретичний матеріал, методику розрахунку електричних кіл та принципи побудови векторних діаграм.

Призначено для самостійної роботи студентів при підготовці та виконанні лабораторних, розрахунково-графічних робіт, підготовки до заліків та іспитів.

УДК 621.3.011.7

ББК 31.211

Іл.21. Табл.19. Бібліогр.:15 назв.

ISBN

© В.Г.Данько, Н.В Крюкова.,
В.С.Марков та ін., 2015

ВСТУП

В сучасних умовах, коли значна частина навчальних дисциплін, в тому числі і електротехніка, в українських вищих навчальних закладах викладається протягом одного семестру, часто порушується звична послідовність викладання: спочатку лекція, потім практичне заняття, а за ним лабораторна робота. Тому зростає роль самопідготовки студентів до практичних та лабораторних робіт. Пропонований посібник повинен допомогти у цій самопідготовці. Для кожної лабораторної роботи стисло подається лекційний матеріал, приділяється увага методам розрахунку електричних кіл, необхідних для розрахункової частини звіту з певної лабораторної роботи.

Метою лабораторних занять є закріплення теоретичних знань та набуття практичних навичок зі складання електричних схем, вимірювання струмів, напруг, потужностей. На підставі цих досліджень проводяться розрахунки електричних кіл та аналіз результатів досліджень.

Також у посібнику приділяється увага правилам техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт, порядок їхнього виконання, оформленню і змісту звіту та схемам підключення електротехнічних пристроїв.

ОПИС УНІВЕРСАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

Універсальний лабораторний стенд призначається для проведення лабораторних робіт за курсом “Електротехніка” фронтальним методом.

До складу лабораторного стенда входять:

– монтажний стенд з електровимірювальними приладами та електротехнічними елементами;

– електромашинний стенд, на якому знаходяться електричні машини постійного і змінного струму, механічне гальмо електричних машин, навантажувальний реостат *R*Н.

Розміщення приладів і виводів основних пристроїв на передній панелі монтажного стенду наведено на рис. 1.

В нижній частині стенда розміщені кнопки магнітних пускачів і клеми таких електричних джерел постачання:

– трифазного струму напругою 220/380 В (фазне та лінійне значення);

– постійного струму напругою 230 В;

– однофазного змінного струму напругою 127 В;

– регульованої змінної напруги до 220 В за допомогою лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) Т1, а також постійної – до 230 В, що утворюється за допомогою випрямляча *VA*;

– трифазного струму напругою 22/36 В (фазне та лінійне значення).

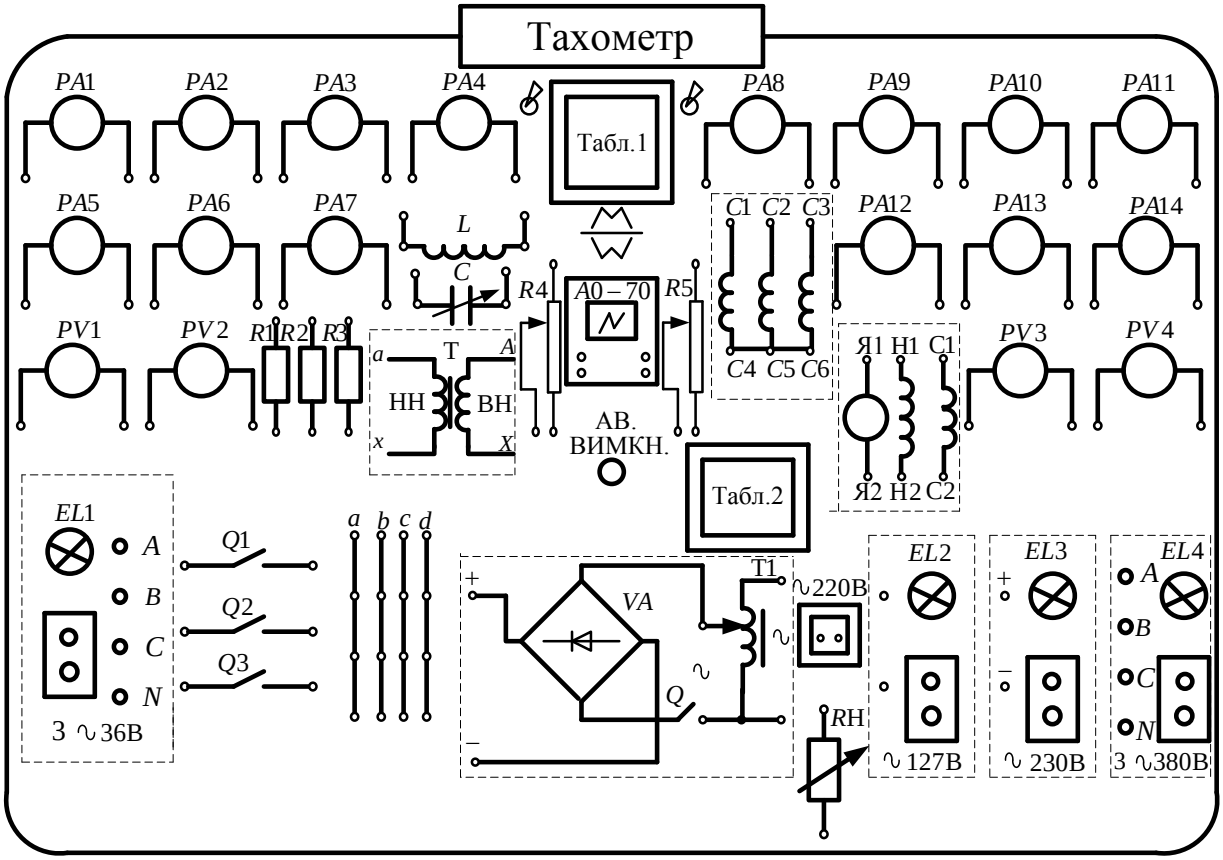


Рисунок 1

На панелі стенда розміщені:

– електровимірювальні прилади: амперметри *PA*1–*PA*14 та вольтметри *PV*1–*PV*4 постійного і змінного струму;

– постійні резистори *R*1, *R*2, *R*3;

– реостати *R*4, *R*5 (з регульованим опором);

– котушка індуктивності *L*;

– конденсатор *C*;

– однофазний трансформатор Т;

– електронно-променевий осцилограф типа ЛО–70;

– виводи обмотки статора асинхронного електродвигуна С1–С6;

– виводи обмоток машини постійного струму: якоря Я1–Я2; незалежного збудження Н1–Н2; послідовного збудження С1–С2;

– виводи навантажувального реостата *R*Н;

– чотири клеми збирання *a*, *b*, *c*, *d* – по чотири затискача у кожній;

– ключі *Q*1, *Q*2, *Q*3;

– аварійна кнопка для знімання усіх видів напруги з затискачів стенда – АВ. ВИМКН.;

– сигнальні лампочки джерел постачання *EL*1–*EL*4;

– розетка змінної напруги 220 В;

– цифровій тахометр для вимірювання частоти обертання електричних машин.

Додатково на столі стенда можуть бути розташовані переносні фазометри, ватметри, амперметри і вольтметри.

На стенді є таблички з правилами з основ електровимірювань (табл.1), а також з номінальними параметрами електрообладнання (табл.2).

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні стенди – діючі електричні і електромеханічні установки, які за певних умов можуть стати джерелами враження електричним струмом. Для створення безпечних умов проведення робіт в лабораторії та запобігання можливості псування електрообладнання, студенти повинні знати та суворо дотримуватись таких правил:

1. Перед початком виконання роботи треба переконатися в тому, що всі джерела живлення перебувають у положенні "ВИМКНЕНО", а повзунок автотрансформатора встановлено в нульове положення.

2. Категорично забороняється доторкатись до неізольованих проводів, з'єднувальних затискачів та інших частин електричних кіл, що перебувають під напругою.

3. Монтаж заданої електричної схеми і будь-які нові з'єднання повинні виконуватись **тільки при вимкнених джерелах електроенергії** !

4. Категорично забороняється вмикати установку без проведення перевірки схеми викладачем.

5. Якщо під час роботи зникає напруга в мережі, слід негайно вимкнути лабораторну установку і поставити повзунок автотрансформатора у положення, що відповідає мінімальній напрузі.

6. Розбирати схему слід тільки з дозволу керівника занять.

7. У разі виявлення будь-якої несправності в електричному пристрої, який перебуває під напругою, необхідно негайно вимкнути стенд від мережі за допомогою кнопки «аварійне вимкнення». Про цей випадок слід негайно повідомити керівнику заняття.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Для виконання робіт академічні групи студентів поділяються на підгрупи з 2 – 4 чоловік. Лабораторні роботи проводять фронтальним методом, тобто усі підгрупи одночасно виконують одну і ту саму роботу, але на різних стендах.

Для виконання лабораторної роботи слід попередньо підготувати кожному студенту протокол (чернетку) випробувань, який містить таблиці вимірювань. Перед початком проведення дослідів підгрупа повинна ознайомитись на робочому місці з експериментальною установкою, джерелами живлення, які використовуються, приймачами електроенергії і приладами.

Під час складання схеми рекомендується скласти основне коло струму з вмиканням приймачів, які підлягають дослідженню, і кіл струму амперметрів, ватметрів і фазометрів. Потім можна приєднати кола вольтметрів, ва-

тметрів і фазометрів, які вмикаються паралельно приймачам. Необхідно пам'ятати правило, що клеми приладів використовуються тільки для їхнього вмикання в схему. До цих клем нічого більше не вмикається, а усі додаткові з'єднання виконують на вільних клемах на панелі стенда.

Складену схему треба показати для перевірки; вмикати джерела живлення можна тільки з дозволу керівника.

Результати усіх первинних спостережень, вимірювань і розрахунків записують у попередньо заготовлені таблиці.

Після закінчення експерименту джерела живлення вимикають, а результати вимірювань подають керівнику занять для перевірки.

Якщо результати експерименту визнані керівником правильними, електричну схему розбирають і переходять до складання наступної схеми. Після завершення досліджень робоче місце упорядковують, провідники та прилади здають до місця їхнього зберігання.

ОФОРМЛЕННЯ І ЗМІСТ ЗВІТУ ПРО ВИКОНАНУ РОБОТУ

Звіт про лабораторну роботу оформлюється кожним студентом окремо і повинен бути акуратним, виконаним згідно з встановленою формою.

Звіт, який оформлюється на папері формату А4, починається з титульного листа, зразок якого наведено на стор.7. На наступних сторінках треба навести:

– електричні схеми експерименту;

– паспортні дані приладів і апаратів, які досліджуються, необхідні для оформлення звіту;

– формули і залежності, які використовуються для розрахунків;

– таблиці даних спостережень і результатів розрахунків згідно з вимогами, які наведені в методичних вказівках до кожної лабораторної роботи;

– графічний матеріал (графіки, діаграми, рисунки);

– результати аналізу та висновки по роботі.

Схеми креслять за допомогою інструментів згідно з ДСТУ. Умовні позначення типових елементів та їхні розміри подано в табл.1.

Графіки залежностей, які отримані, доцільно виконувати на міліметровому папері з зазначенням на осях стандартних буквених позначень величин і одиниць вимірювань.

Векторні діаграми повинні бути побудовані у вибраному масштабі.

Звіт приймає керівник в той день, коли виконується наступна робота. При цьому студент повинен проаналізувати отримані результати, відповісти на контрольні запитання і розв'язати задачі за темою проведеної роботи.

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Кафедра загальної електротехніки

Звіт з лабораторної роботи №

_____

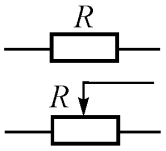
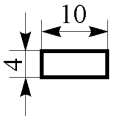
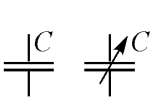
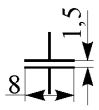
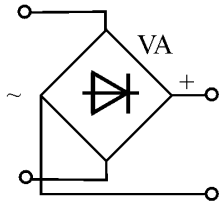
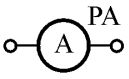
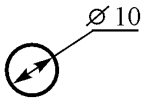
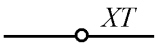
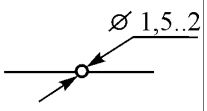
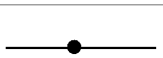
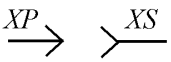
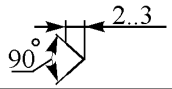
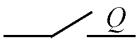
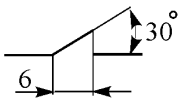
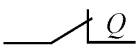
(назва роботи)

Роботу виконав:
студент _____; група_____; _____
(фамілія, ініціали) (індекс) (дата виконання)

Звіт прийняв _____ керівник _____
(дата) (посада , фамілія, ініціали)

Харків
2015 р.

Таблиця 1 – Позначення функціональних елементів електричних кіл

Найменування елемента		Позначення	Розміри,мм
Резистор	постійний		
	змінний		
Конденсатор постійної і змінної ємності			
Котушка індуктивності (дросель без магнітопроводу)			
Автотрансформатор регулювальний			
Однофазний мостовий напівпровідниковий випрямляч			
Прилади електровимірювальні: PA амперметр, PV - вольтметр, PW - ватметр, P_φ - фазометр			
З`єднання	розбірне		
	нерозбірне		
Контакти роз`ємного з`єднання (штир - *XP* і гнездо - *XS*)			
Контакти комутаційного устаткування (*Q* - у колах силових, *S* - управління, сигналізації)	замикальний		
	розмикальний		
Струм	постійний		
	змінний		

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи – закріплення теоретичних знань і одержання практичних навиків розрахунку і експериментального дослідження простих електричних кіл постійного струму з одним джерелом у разі послідовного, паралельного та змішаного з'єднання споживачів електроенергії.

1.1. Постановка задачі

Ознайомитися з правилами техніки безпеки, організацією та порядком виконання лабораторних робіт. Вивчити будову універсального лабораторного стенда. Визначити опори резисторів шляхом вимірювання струмів та напруг, які на них подаються. Дослідити електричні кола у разі послідовного, паралельного і змішаного з'єднання приймачів за допомогою вимірювань струмів, напруг та потужностей. Розрахувати параметри, які подані в таблицях, у стовпчиках «Обчислене». Для перевірки теоретичних знань користуватись контрольними запитаннями.

1.2. Теоретичні положення

Електричне коло – це сукупність джерел електричної енергії та її споживачів, з'єднаних між собою таким чином, що утворюються шляхи для проходження електричного струму. Умовне позначення електричного кола називається електричною схемою.

Електричне коло характеризують наступні параметри: електричний струм, електрична напруга, електрорушійна сила (ЕРС), потужність, опір.

Електричний струм, незмінний за величиною і за напрямом, називається *постійним струмом*.

Електричні величини позначають прописними літерами: струм I (вимірюється в амперах [А]), ЕРС E (вимірюється в вольтах [В]), напруга U (вимірюється в вольтах [В]), потужність P (вимірюється в ватах [Вт]), опір R (вимірюється в омах [Ом]).

Закон Ома : електричний струм на ділянці електричного кола (без ЕРС) прямо пропорційний напрузі на ділянці та зворотно пропорційний опору ділянки

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

1-й закон Кірхгофа (для вузла): алгебраїчна сума струмів віток, які сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю.

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = 0,$$

де m – кількість віток, які сходяться у вузлі.

2-й закон Кірхгофа (для контуру): алгебраїчна сума ЕРС в контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі падінь напруги на опорах цього контуру

$$\sum_{k=1}^{n} E_k = \sum_{k=1}^{m} I_k R_k \ ,$$

де *n, m* – відповідно кількість ЕРС та опорів у контурі

Якщо напрям обходу контура співпадає з напрямом ЕРС, то ЕРС беруться зі знаком “+”, якщо вони зустрічні до напряму обходу контура, то зі знаком “–“. Аналогічно і для падінь напруг.

Вітка – ділянка електричного кола, на якій усі елементи з’єднані послідовно та по них тече один і той же струм.

Вузол – точка електричного кола, в котрій сходяться три та більше віток.

Контуром електричного кола називається будь-який замкнений шлях по віткам електричного кола. Вузол та контур називаються «незалежними», якщо до їх складу входить хоч одна нова вітка.

З’єднання елементів, що входять до складу однієї вітки і по яких тече один і той же струм, називається *послідовним* (рис.1.1,*в*). З’єднання елементів, що знаходяться під однією і тією ж напругою, називається *паралельним* (рис.1.1, *г*). Або можна сказати, що елементи у вітках, які приєднуються до однієї пари вузлів називаються *паралельними. Змішане* з’єднання елементів складається з послідовного та паралельного з’єднань елементів (рис.1.1, *д*).

Еквівалентні перетворення – це заміна групи опорів одним еквівалентним опором R_e або іншою групою опорів таким чином, що напруги і струми в місцях приєднання групи залишаються незмінними.

При *послідовному* з’єднанні опорів

$$R_e = R_1 + R_2 + \ldots + R_n = \sum_{k=1}^{n} R_k \ .$$

При *паралельному* з’єднанні опорів

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n} \quad \Rightarrow \quad R_e = \frac{1}{\sum\limits_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}} .$$

Для двох опорів при *паралельному* з’єднанні

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

Для трьох опорів при *паралельному* з’єднанні

$$R_{123} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} .$$

Закон Джоуля – Ленца: кількість електричної енергії *W*, що перетворюється у теплову на ділянці кола з опором R, дорівнює

$$W = RI^2 t,$$

що дає формулу для потужності $P = \frac{W}{t} = RI^2$.

Баланс потужностей: алгебраїчна сума потужностей усіх джерел енергії дорівнює арифметичній сумі потужностей усіх приймачів. Рівняння для балансу потужностей

$$\sum_{k=1}^{n} E_k I_k = \sum_{k=1}^{m} R_k I_k^2,$$

де $P_{\text{пр}} = R_k I_k^2$ — це потужність, яку споживає приймач – опір R_k (за законом Джоуля – Ленца); $P_{\text{дж}} = \pm E_k I_k$ – потужність джерела (зі знаком «+», якщо напрями E_k і I_k співпадають, зі знаком «–», якщо вони зустрічні).

1.3. Об’єкт дослідження

Базова частина схеми (рис. 1.1, *а*) містить джерело живлення, автотрансформатор (ЛАТР) Т1, за допомогою якого регулюється напруга, що подається до кола, і випрямляч *VA*, який здійснює випрямляння цієї напруги, а також вимірювальні прилади, які необхідні для проведення експерименту.

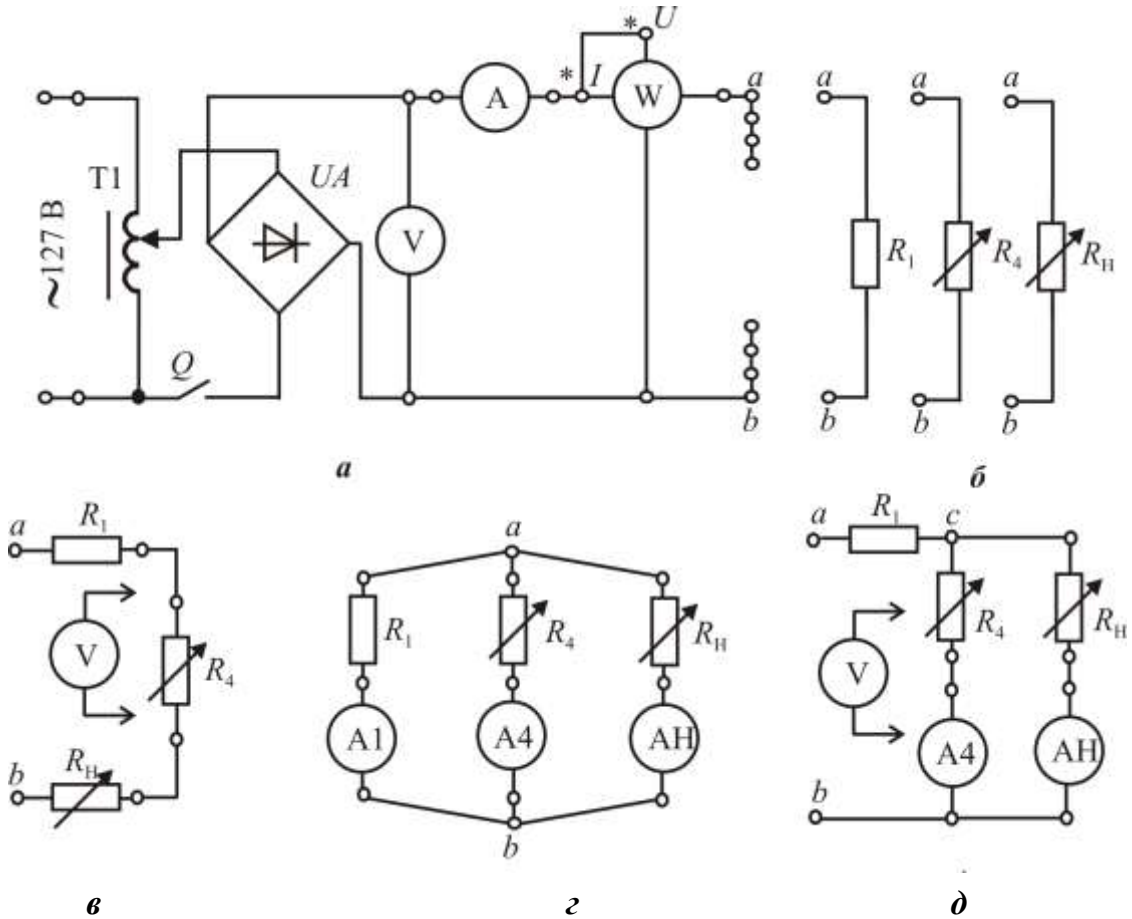


Рисунок 1.1

Закінчується базова частина схеми клемними збірками *a* і *b*. Об'єктами досліджень є окремо взяті резистори R_1, R_4 і R_H (рис. 1.1, *б*), а також кола з послідовним, паралельним та змішаним їх з'єднанням (рис.1.1, *в, г, д*).

Вольтметром вимірюється значення напруги. Він має великій внутрішній опір, тому в електричну схему завжди підключається паралельно до ділянки кола, на якій вимірюється напруга. Вимір наруги на лабораторному стенді може відбуватися при приєднанні вольтметра в будь-який час без зміни параметрів електричної схеми (рис.1.1).

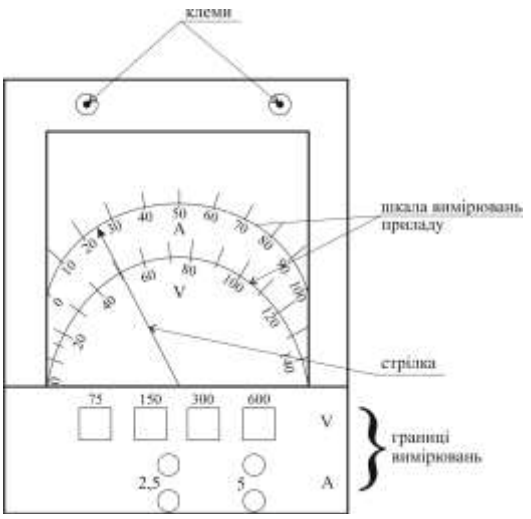


Рис.1.2 Електровимірювальний прилад

Амперметром вимірюється значення струму. Він має малий внутрішній опір, тому приєднується завжди послідовно до ділянки кола, на якому вимірюється струм (рис.1.1).

Ватметр змірює значення потужності. До його складу входять дві котушки: струму та напруги. Початки котушок з'єднані між собою і маркіруються зірочкою *. Вихід котушки напруги приєднується паралельно до ділянки кола, котушки струму приєднується послідовно (рис.1.1).

Ціни поділок приладів (відповідно вольтметра, амперметра, ватметра):

$$C_V = \frac{U_N}{N};\ C_A = \frac{I_N}{N};\ C_W = \frac{I_N U_N}{N};$$

де U_N – границя вимірювань напруги; I_N – границя вимірювань струму; N– кількість поділок приладу (рис.1.2).

Визначення показань приладів:

– напруга за вольтметром $U = C_V n$;

– струм за амперметром $I = C_A n$;

– потужність за ватметром $P = C_W n$;

де n – відхилення стрілки приладу в поділках.

1.4. Порядок виконання експерименту

1.4.1. Визначте опори резисторів непрямим способом.

Складіть базову частину схеми (рис. 1.1, *а*). Приєднайте по черзі резистори R_1, R_4 і R_H (рис. 1.1, *б*).

Автотрансформатор Т1 перед кожним вмиканням і вимиканням джерела поставте в нульове положення.

Подайте напругу від джерела живлення і за допомогою ЛАТРа Т1 підвищуйте її кожного разу до необхідного значення, орієнтуючись на наступне.

Під час вимірювання опору резистора R_1 встановіть значення струму $I = 1$ А і проведіть вимірювання відповідного значення напруги U.

Таблиця 1.1

Зміряне		Обчислене
U, В	I, А	Величина опору, Ом
		R_1 =
		R_4 =
		$R_н$ =

У реостатах R_4 і $R_н$ у початковому положенні необхідно забезпечити максимальний опір, після чого слід виставити задані викладачем опори. Для цього необхідно спочатку довести напругу U до значення, чисельно рівного опору, а потім переміщенням повзуна реостата встановити значення струму $I = 1$ А. До закінчення роботи одержані положення повзунів реостатів повинні залишатись незмінними. Дані вимірювань слід занести у табл. 1.1.

1.4.2. Проведіть дослідження електричного кола з послідовним з'єднанням резисторів. Підключіть до клем a і b базової частини схеми (рис. 1.1, *а*) ділянку кола, зображену на рис. 1.1, *в*. Встановіть напругу U на вході за вказівкою викладача (рекомендовано 100 В). Вимірте струм I і потужність P, а також за допомогою переносного вольтметра падіння напруги U_1, U_4 і $U_н$ на резисторах R_1, R_4 і $R_н$. Дані вимірювань внесіть у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Задане	Зміряне					Обчислене	
U	I	P	U_1	U_4	$U_н$	$U_1+U_4+U_н$	P
В	А	Вт	В	В	В	В	Вт

1.4.3. Проведіть дослідження електричного кола з паралельним з'єднанням резисторів R_1, R_4 і $R_н$. Підключіть до клем a і b базової частини схеми (рис. 1.1, *а*) ділянку кола, яка подана на рис. 1.1, *г*. Встановіть напругу U на вході за вказівкою викладача (рекомендовано 50 В). Вимірте струми I, I_1, I_4 і $I_н$, а також потужність P та дані вимірювань занесіть у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Задане	Зміряне					Обчислене	
U	I	P	I_1	I_4	$I_н$	$I_1+I_4+I_н$	P
В	А	Вт	А	А	А	А	Вт

1.4.4. Проведіть дослідження електричного кола зі змішаним з'єднанням резисторів R_1, R_4 і $R_н$. Для цього підключіть до клем a і b базової частини схеми (рис. 1.1, *а*) ділянку кола, яка подана на рис. 1.1, *д*. Встановіть напругу U на вході за вказівкою викладача (рекомендовано 100 В).

Виміряйте струми I_1, I_4 і $I_н$, потужність P, а також переносним вольтметром напруги U_1, U_4 і $U_н$ на резисторах R_1, R_4 і $R_н$. Дані вимірювань занесіть у табл.1.4.

Таблиця 1.4

Задане	Зміряне						Обчислене		
U	I_1	P	U_1	$U_4=U_н$	I_4	$I_н$	U_1+U_4	$I_4+I_н$	P
В	А	Вт	В	В	А	А	В	А	Вт

1.4.5. За результатами експериментів перевірте виконання законів Кірхгофа.

1.5. Обробка результатів експерименту

1.5.1. За результатами вимірювань табл. 1.1 розрахуйте величини опорів резисторів, користуючись законом Ома, а саме $R = U / I$.

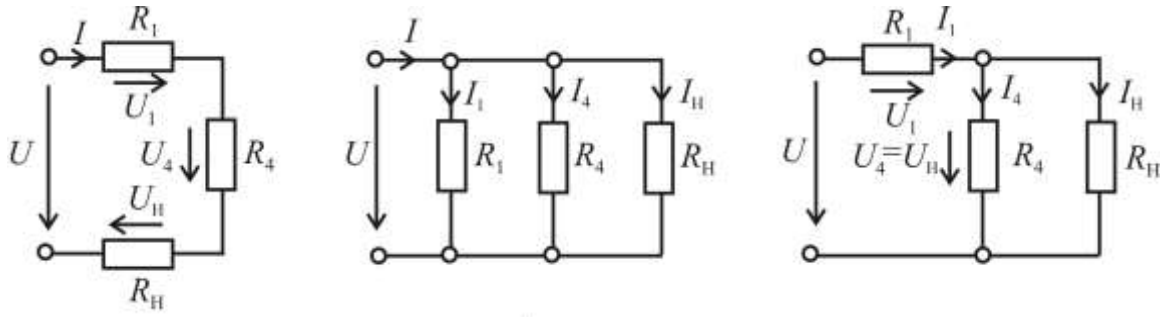
1.5.2. За результатами вимірювань табл. 1.2–1.4 розрахуйте вказані суми напруг та струмів приймачів на основі законів Кірхгофа і порівняйте результати з відповідними величинами, які надходять від джерела.

Розрахуйте також по виміряним напрузі й струму джерела потужність, яка надходить від нього за формулою $P = UI$. Порівняйте результати зі значеннями потужності, що виміряні.

1.5.3. По заданій напрузі джерела живлення (брати з табл. 1.2–1.4) і опорам резисторів (брати з табл.1.1) розрахуйте струми, напруги та потужності послідовного, паралельного й змішаного з'єднань резисторів згідно рис.1.1, *в*, *г*, *д* та відповідним розрахунковим схемам на рис. 1.3, *а*, *б*, *в*.

Дані розрахунків занесіть у табл. 1.5.

Розрахунок *послідовного* з'єднання приймачів. Еквівалентний опір кола дорівнює $R_е = R_1 + R_4 + R_н$.



а *б* *в*

Рисунок 1.3

Струм у колі $I = \dfrac{U}{R_е}$.

Потужності, які споживаються у колі, визначаємо як:

$$P_1 = R_1 I^2;\ \ P_4 = R_4 I^2;\ \ P_н = R_н I^2;\ \ P = P_1 + P_4 + P_н.$$

Розрахунок *паралельного* з'єднання приймачів:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_4 = \frac{U}{R_4}; \quad I_н = \frac{U}{R_н}; \quad I = I_1 + I_4 + I_н;$$

$$P_1 = R_1 I_1^2; \quad P_4 = R_4 I_4^2; \quad P_н = R_н I_н^2; \quad P = P_1 + P_4 + P_н.$$

Для випадку зі *змішаним* з'єднанням резисторів

$$I_1 = \frac{U}{R_е},$$

де еквівалентний опір кола визначається як $R_е = R_1 + \frac{R_4 \cdot R_н}{R_4 + R_н}$.

Таким чином, напруги, струми та потужності розрахуємо як:

$$U_4 = U_н = \frac{R_4 \cdot R_н}{R_4 + R_н} I_1; \quad I_4 = \frac{U_4}{R_4}; \quad I_н = \frac{U_н}{R_н};$$

$$P_1 = R_1 I_1^2; \quad P_4 = R_4 I_4^2; \quad P_н = R_н I_н^2; \quad P = P_1 + P_4 + P_н.$$

Перевірте результати розрахунків за законами Кірхгофа, а також за рівнянням балансу потужностей.

Порівняйте результати експерименту (див. табл. 1.2–1.4) з результатами розрахунків (табл. 1.5).

1.5.4. Оформіть роботу. Звіт повинен містити титульний лист, схеми експериментів (рис. 1.1), табл. 1.1–1.5, розрахунки даних до табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Схема з'єднання споживачів R_1, R_4, $R_н$	Задане				Обчислене										
	U	R_1	R_4	$R_н$	U_1	U_4	$U_н$	I	I_1	I_4	$I_н$	P_1	P_4	$P_н$	P
	В	Ом	Ом	Ом	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт
Послідовне															
Паралельне															
Змішане															

Контрольні запитання

1. Що називається віткою, вузлом, контуром у електричному колі?

2. Яке з'єднання елементів називається: послідовним, паралельним, змішаним, і як визначається еквівалентний опір кола при цих з'єднаннях?

3. Який струм називають постійним та якими параметрами він характеризується?

4. Сформулюйте закони Ома, Кірхгофа та Джоуля-Ленца.

5. Напишіть рівняння балансу потужностей електричного кола.

6. Поясніть принцип вмикання електровимірювальних приладів: амперметра, вольтметра, ватметра.

7. Як визначити ціну поділки вимірювальних приладів: амперметра, вольтметра, ватметра?

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МОСТОВОЮ СХЕМОЮ

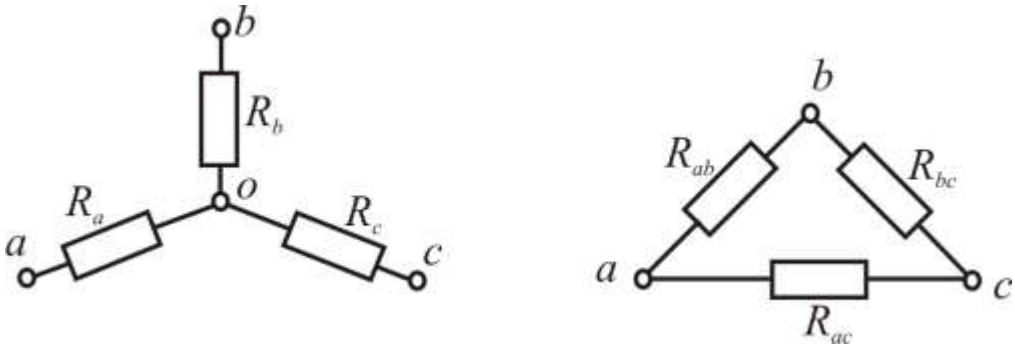
Мета роботи – закріплення теоретичних знань і здобуття практичних навиків розрахункового і експериментального дослідження мостових електричних кіл постійного струму з одним джерелом живлення.

2.1. Постановка задачі

Шляхом безпосередніх вимірювань визначити розподіл струмів у вітках і напруг по ділянкам складного кола постійного струму з одним джерелом живлення, складеного за мостовою схемою, а потім перевірити отримані результати розрахунковим шляхом.

2.2 Теоретичні положення

Приєднання трьох опорів R_{ab}, R_{bc}, R_{ac} до вузлів *а*, *в*, *с* таким чином, що вони утворюють сторони замкненого трикутника, називається з'єднанням "*трикутник*" (рис. 2.1, *а*). Приєднання трьох опорів кола R_a, R_b та R_c до вузлів *а*, *в*, *с* таким чином, що вони мають вигляд трипроменевої зірки зі спільним вузлом *о* у центрі, називається з'єднанням "*зірка*". (рис. 2.1, *б*).



а *б*

Рисунок 2.1

Перетворення "трикутника" опорів R_{ab}, R_{bc}, R_{ac} в еквівалентну "зірку", що має опори R_a, R_b, R_c, виконується за наступними виразами:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ac}}{R_{ab}+R_{ac}+R_{bc}};$$

$$R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_{ab}+R_{ac}+R_{bc}};$$

$$R_c = \frac{R_{ac}R_{bc}}{R_{ab}+R_{ac}+R_{bc}}.$$

Таким чином, опір будь-якої вітки еквівалентної "зірки" дорівнює добутку двох опорів "трикутника", що примикають до того ж вузла, поділеному на суму всіх трьох опорів "трикутника".

Перетворення "зірки" опорів R_a, R_b та R_c, в еквівалентний "трикутник" з опорами R_{ab}, R_{bc}, R_{ac} , виконується наступним чином:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c};$$

$$R_{bc} = R_c + R_b + \frac{R_c R_b}{R_a};$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a R_c}{R_b}.$$

Після застосування еквівалентного перетворення "трикутника" у "зірку" або "зірки" у "трикутник" електрична схема зводиться до схеми з послідовним або паралельним з'єднанням елементів. Потім крок за кроком спрощують електричну схему (згортують), замінюючи групи опорів одним еквівалентним за допомогою формул послідовного та паралельного перетворень, доки вся схема зведеться до одного еквівалентного опору $R_{\text{е}}$.

Струм, який проходить через еквівалентний опір, знаходиться за законом Ома

$$I = \frac{E}{R_{\text{е}}},$$

де ЕРС E дорівнює напрузі U на затискачах джерела електричної енергії.

Якщо струм у діагоналі мостової схеми відрізняється від нуля, то така схема називається *розбалансованою*, мостова схема кола постійного струму, у якій струм у діагоналі моста дорівнює нулю, називається *збалансованою*.

Струм у діагоналі мостової схеми буде дорівнювати нулю за умови наступного співвідношення між опорами цієї схеми (рис. 2.2)

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_3}{R_5}.$$

Розрахунок збалансованої мостової схеми не потребує перетворення "трикутника" у "зірку" або "зірки" у "трикутник", струм крізь R_2 не проходить.

2.3. Об'єкт дослідження

Схема електричного кола подана на рис. 2.2. Живлення кола постійним струмом здійснюється від мережі змінного струму через автотрансформатор Т1 і діодний мост *VA*, який випрямляє змінний струм, тобто перетворює його на постійний . В якості споживачів електроенергії використовуються резистори R_1, R_2, R_3 та реостати R_4 і R_5.

2.4. Порядок виконання експерименту

2.4.1. Складіть схему (рис. 2.2). Вузли схеми *a*, *b*, *c*, *d* розмістіть на клемних збірках відповідно *a*, *b*, *c*, *d*. Автотрансформатор Т1 перед вмиканням джерела живлення поставте в нульове положення.

2.4.2. Подайте напругу від джерела живлення. За допомогою автотрансформатора *T*1 встановіть на вході кола величину напруги *U*, задану викладачем (рекомендується 100 В).

2.4.3. Шляхом зміни опорів реостатів R_4 і R_5 збалансуйте схему, тоб-

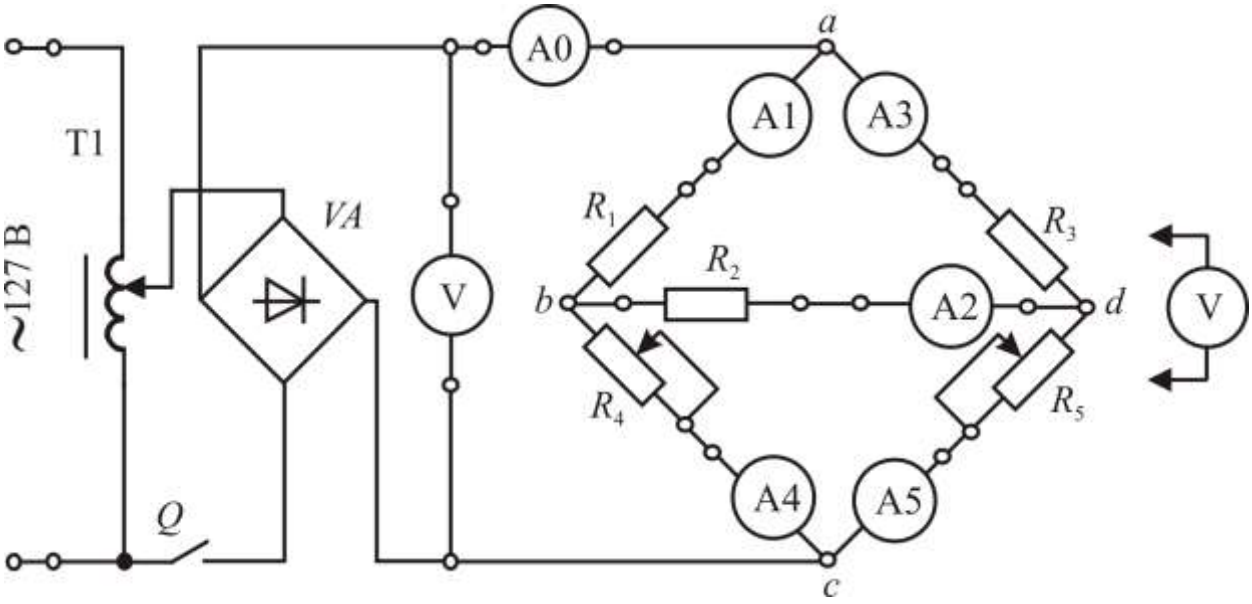


Рисунок 2.2

то добийтесь нульового значення струму I_2 в діагоналі моста, яка утворена віткою з резистором R_2. За допомогою амперметрів зробіть заміри струмів віток, а за допомогою переносного вольтметра – напруги поміж вузлами: U_{ad}, U_{dc}, U_{ab}, U_{bc}, U_{db}. Результати вимірювань занесіть у відповідну графу "Зміряне" табл.2.1.

2.4.4. Розбалансуйте схему за допомогою змінювання опорів реостатів R_4 і R_5 так, щоб струм I_2 був порівняним зі струмами в інших ділянках кола, і повторіть вимірювання. Результати вимірювань занесіть у відповідну графу "Зміряне" табл.2.1.

Таблиця 2.1

Стан схеми		Параметри											
		U_0	I_0	U_{ad}	U_{dc}	U_{ab}	U_{bc}	U_{db}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
		В	А	В	В	В	В	В	А	А	А	А	А
Збалансовано	Зміряне												
	Обчислене												
Розбалансовано	Зміряне												
	Обчислене												

2.4.5. Перевірте згідно законів Кірхгофа взаємовідповідність отриманих результатів.

2.5. Обробка результатів експерименту

2.5.1. Для ряду контурів і вузлів запишіть за законами Кірхгофа рівняння і по експериментальним даним (табл. 2.1.) перевірте виконання цих законів.

2.5.2. По даним вимірювань (табл. 2.1), вирахуйте опори резисторів:

$$R_1 = \frac{U_{ab}}{I_1};\ R_2 = \frac{U_{db}}{I_2};\ R_3 = \frac{U_{ad}}{I_3};\ R_4 = \frac{U_{bc}}{I_4};\ R_5 = \frac{U_{dc}}{I_5}.$$

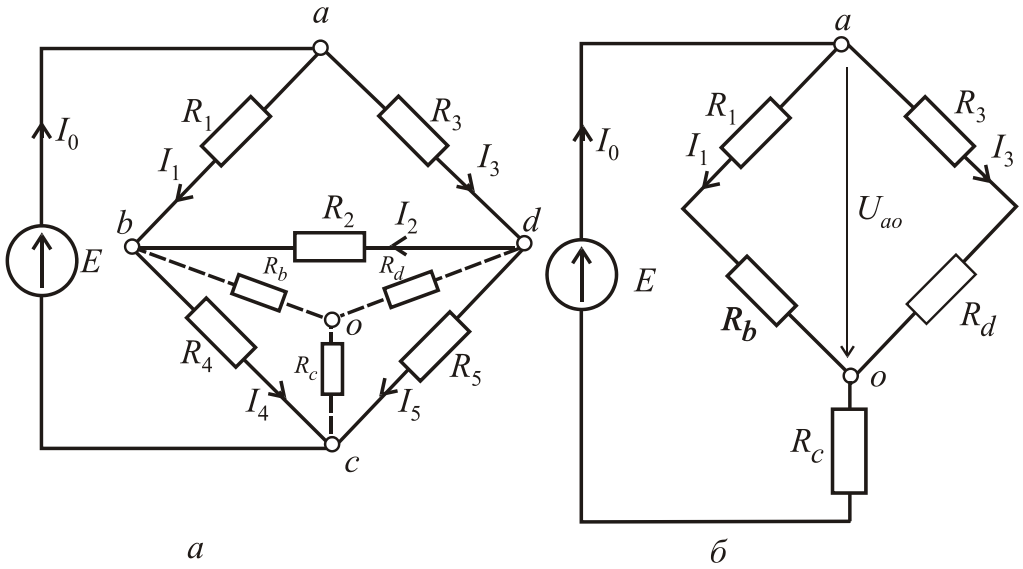
і результати занесіть в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Стан схеми	Опори резисторів, Ом				
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Збалансовано					
Розбалансовано					

2.5.3. Для збалансованої схеми перевірте справедливість умови балансу мостової схеми, яка виявляється відношенням: $R_1/R_4 = R_3/R_5$.

2.5.4. Для двох станів електричного кола по заданій напрузі джерела U_0 (табл. 2.1) і розрахованим параметрам кола (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 з табл. 2.2) розрахуйте струми та напруги в усіх вітках методом еквівалентних перетворювань (у тому числі, з використанням перетворення "трикутника" опорів в "зірку"). Дані розрахунків занесіть у відповідні графи "Обчислене" табл. 2.1. Перетворення "трикутника" опорів в "зірку" показано на рис. 2.3, *а*.



а *б*

Рисунок 2.3

Опори еквівалентної зірки (рис.2.3, *а*) розраховуються наступним чином:

$$R_b = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4 + R_5};\ R_c = \frac{R_5 \cdot R_4}{R_2 + R_4 + R_5};\ R_d = \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_4 + R_5}.$$

Еквівалентний опір кола визначаємо з перетвореної схеми (рис.2.3, *б*)

$$R_{oa} = \frac{(R_1 + R_b) \cdot (R_3 + R_d)}{R_1 + R_b + R_3 + R_d};\ R_e = R_{oa} + R_c.$$

Для зручності будемо вважати, що ЕРС на рис. 2.3, *а*, *б* дорівнює U_0.

Визначаємо струми з перетвореної схеми (рис.2.3, *б*):

$$I_0 = \frac{U_0}{R_e} = \frac{E}{R_e};\ U_{oa} = R_{oa} I_o;\ I_1 = \frac{U_{oa}}{R_1 + R_b};\ I_3 = \frac{U_{oa}}{R_3 + R_d}.$$

З початкової схеми кола (рис.2.3, *а*) знаходимо за законами Кірхгофа інші струми, що залишилися невизначеними:

$$I_3 R_3 + I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0\ ;\ I_2 = \frac{I_1 R_1 - I_3 R_3}{R_2};$$

$$I_4 = I_1 + I_2;\ I_5 = I_3 - I_2.$$

2.5.5. Зробіть перевірку за допомогою рівняння балансу потужності

$$U_0 I_0 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5.$$

2.5.6. Порівняйте результати експерименту з розрахованими даними і зробіть відповідні висновки.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закони Кірхгофа.
2. В чому суть метода еквівалентних перетворювань?
3. Наведіть формули еквівалентного перетворення "трикутник"–"зірка".
4. Наведіть формули еквівалентного перетворення "зірка"–"трикутник".
5. Як розрахувати електричне коло за допомогою еквівалентних перетворень "трикутник"–"зірка" або "зірка"–"трикутник"?
6. Що таке збалансована та розбалансована мостова схема? Наведіть умови балансу мостової схеми.
7. Напишіть рівняння балансу потужностей електричного кола.

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ В РАЗІ ПОСЛІДОВНОГО З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ

Мета роботи – закріплення теоретичних знань і здобуття практичних навиків розрахункового та експериментального дослідження приймачів електроенергії і електричного кола синусоїдного струму у разі послідовного з'єднання приймачів.

3.1. Постановка задачі

За допомогою джерела синусоїдної напруги провести дослідження:

а) приймачів електроенергії: резистора, котушки індуктивності і конденсатора шляхом визначення параметрів їх схем заміщення;

б) електричного кола з послідовним з'єднанням зазначених приймачів.

3.2. Теоретичні положення

Під *змінним струмом* розуміють струм, значення і напрям якого періодично змінюються. Найбільш поширеною формою змінного струму є *синусоїдна*. Основним джерелом синусоїдного змінного струму є генератори змінного струму.

Синусоїдні напруга, струм та ЕРС в аналітичній формі мають наступний вигляд

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u);\ i = I_m \sin(\omega t + \psi_i);\ e = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$$

де u, i, e – миттєві значення напруги, струму та ЕРС;

$U_m,\ I_m,\ E_m$ – амплітудні (максимальні) значення напруги струму та ЕРС;

$\omega t + \psi_i,\ \omega t + \psi_u,\ \omega t + \psi_e$ – відповідно фази струму, напруги, ЕРС;

ψ_i, ψ_u, ψ_e – початкові фази відповідно струму, напруги, ЕРС.

Синусоїди струму та напруги приведено на рис. 3.1.

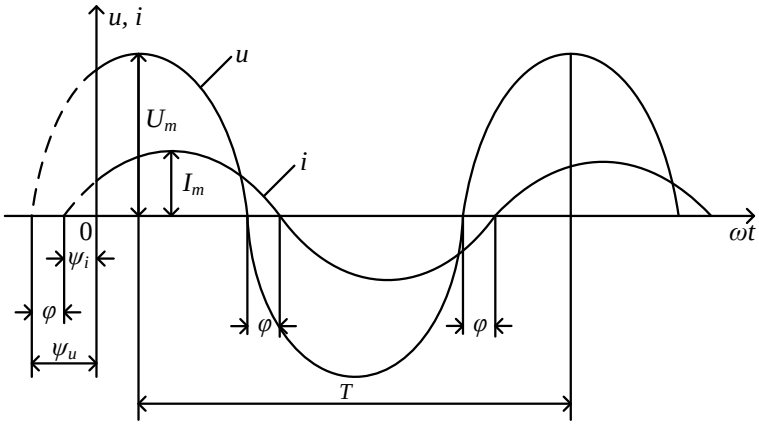


Рисунок 3.1

T – період – проміжок часу, за який відбувається повний цикл змінення синусоїдальної функції. *Частота* струму $f = \frac{1}{T}$ — число періодів за одиницю часу (за секунду). *Кутова частота* визначається за формулою $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$.

Різниця початкових фаз напруги і струму називається *фазовим зсувом* φ або *кутом зсуву фаз*

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Залежно від навантаження електричного кола синусоїдного струму значення фазового зсуву може бути наступним:

$\varphi = 0°$ – активне навантаження;

$\varphi = +90°$ – індуктивне навантаження;

$\varphi = -90°$ – ємнісне навантаження;

$0° < \varphi < +90°$ – активно-індуктивне навантаження;

$-90° < \varphi < 0°$ – активно-ємнісне навантаження.

R – активний опір кола із змінним синусоїдним струмом; *реактивний опір* $X = X_L - X_C$, (X_L – індуктивний опір, X_C – ємнісний опір); *повний опір* – *Z*:

$$X_L = \omega L; \qquad X_C = \frac{1}{\omega C};$$

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

$$R = Z\cos\varphi; \quad X = Z\sin\varphi.$$

Усі опори в колі змінного струму змірюються в омах, [Ом].

Діюче значення синусоїдного змінного струму дорівнює значенню постійного струму, енергетична дія якого дорівнює енергетичної дії змінного струму за той же проміжок часу. Діючі значення синусоїдних струму, напруги та ЕРС дорівнюють:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Закон Ома для кіл змінного синусоїдного струму

$$I = \frac{U}{Z}.$$

1-й закон Кірхгофа для кіл змінного синусоїдного струму: алгебраїчна сума **миттєвих значень** струмів у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^{n} i_k = 0 \text{ або для векторів } \sum_{k=1}^{n} \underline{I}_k = 0.$$

2-й закон Кірхгофа для кіл змінного синусоїдного струму: алгебраїчна сума миттєвих значень ЕРС, діючих у замкненому контурі, дорівнюють алгебраїчній сумі **миттєвих значень** падінь напруги на ділянках цього контуру

$$\sum_{k=1}^{n} e_k = \sum_{k=1}^{m} Z_k i_k \text{ або для векторів } \sum_{k=1}^{n} \underline{E}_k = \sum_{k=1}^{m} \underline{Z}_k \underline{I}_k .$$

Активна потужність P змірюється у ватах [Вт], *реактивна потужність* Q – у вольт-амперах реактивних [вар], *повна потужність* S – у [В·А].

Для джерела електричної енергії активна, реактивна та повна потужності відповідно визначаються за такими формулами:

$$P = UI\cos\varphi; \quad Q = UI\sin\varphi; \quad S = UI .$$

Для навантаження потужності визначаються так:

$$P = RI^2; \quad Q = XI^2; \quad S = ZI^2 = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Для електричного кола з послідовним з'єднанням елементів *R, L, C* відповідно до другого закону Кірхгофа $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$.

Векторна діаграма напруг для послідовного з'єднання елементів *R, L, C* наведена на рис. 3.2.

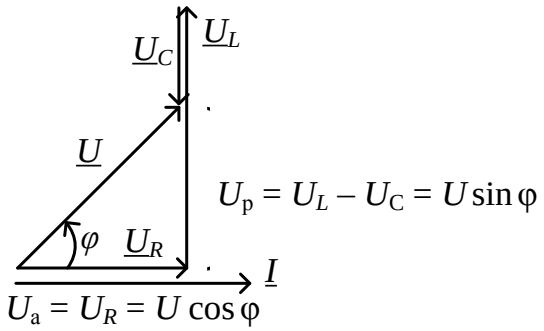


Рисунок 3.2

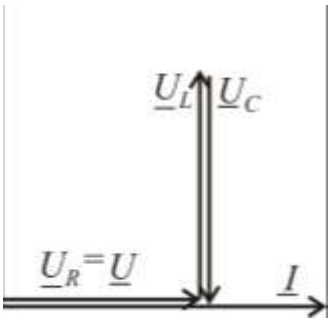


Рисунок 3.3

У колах змінного синусоїдного струму з послідовним з'єднанням елементів *R, L, C* може виникати *резонанс напруг*. Необхідною і достатньою умовою резонансу напруг є умова $\boldsymbol{X_L = X_C}$. Повний опір кола при цьому $Z = R$ і опір кола буде чисто активним. Співвідношення між напругами на ідеальних реактивних елементах $U_L = U_C$. Фазовий зсув у випадку резонансу дорівнює нулю $\varphi = 0$. Векторна діаграма резонансу напруг приведена на рис.3.3.

3.3 Об'єкт дослідження

В усіх дослідах, які проводяться, використовується базова частина живлення схеми з електровимірювальними приладами (рис. 3.4, *а*). Як регулювальне джерело змінної напруги використовують лабораторний автотрансформатор Т1 (ЛАТР), який увімкнено в мережу змінної напруги 127 В. З виходу ЛАТРа напруга подається на клемові збірки *a* і *b*.

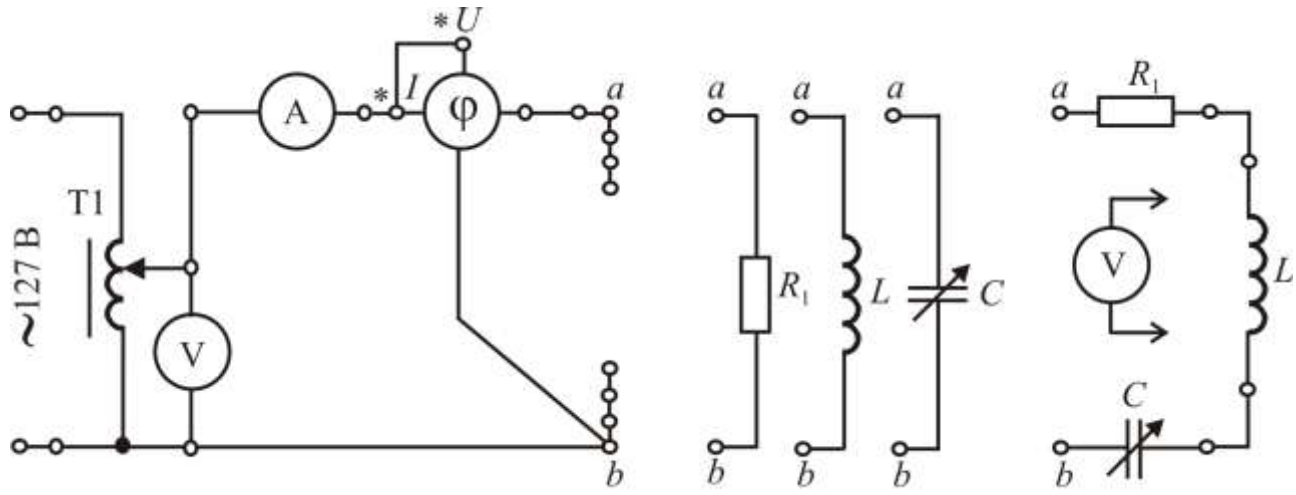
Об'єктами досліджень є окремо взяті приймачі: резистор R_1, котушка індуктивності L і конденсатор C зі змінною ємністю, які наведені на

рис. 3.4,*б*, а також електричне коло, яке утворено їх послідовним з'єднанням у відповідності з рис. 3.4, *в*.

Фазометр використовують для визначення фазового зсуву між струмом та напругою в електричному колі (рис. 3.4.). Фазометр підключають аналогічно ватметру (див. стор.12) Після вимикання напруги фазометр не обов'язково виставляється в нульове положення. Фазовий зсув вимірюється при проходженні струму через прилад; проміжок вимірювання складає: $-90^\circ \le \varphi \le +90^\circ$.

3.4. Порядок виконання експерименту

3.3.1. Складіть базову частину схеми (рис. 3.4, *а*). ЛАТР Т1 поставте в нульове положення.



а *б* *в*

Рисунок 3.4

3.3.2. Проведіть індивідуальне дослідження приймачів електроенергії R_1, L, C (див. рис. 3.4, *б)*.

За допомогою ЛАТРа доведіть напругу U до заданої величини (рекомендовано 100 В), здійсніть вимірювання струму I і фазового зсуву φ між струмом та напругою. Запишіть результати у табл. 3.1. Конденсатор випробують у двох положеннях перемикача, які записуються у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Назва приймача електроенергії		Зміряне			Обчислене		
		U	I	φ	Z	R	X
		В	А	град	Ом	Ом	Ом
Резистор $R1$							
Котушка індуктивності L							
Конденсатор C	положення C №...						
	положення C №…						

3.3.4. Зробіть дослідження послідовного з'єднання приймачів: резистора R_1, котушки індуктивності L і конденсатора C. З'єднайте їх за схемою рис.3.4, *в*.

Дослід проводять два рази при використанні тих положень перемикача конденсатора C, які були записані у табл. 3.1, за вказівкою викладача. Зміни положень перемикача проводять при вимкненій напрузі.

Встановіть величину напруги U за вказівкою викладача (рекомендовано 100 В) і проведіть вимірювання струму I та фазового зсуву φ і результати запишіть у табл. 3.2. Напругу на окремих приймачах (U_{R_1} – резистора, $U_К$ – котушки, U_C – конденсатора) вимірюйте вольтметром.

Таблиця 3.2

Послідовно з'єднані приймачі при різних положеннях конденсатора C	Зміряне					
	U	I	φ	U_{R_1}	$U_К$	U_C
	В	А	градус	В	В	В
R_1, L, C №....						
R_1, L, C №....						

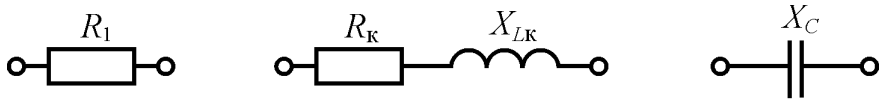
3.5. Обробка результатів експерименту

3.5.1. Використайте дані вимірювань з табл. 3.1 і визначте повний Z, активний R і реактивний X та ємнісний X_C опори випробуваних приймачів:

$$Z = U / I; \qquad R = Z\cos\varphi; \qquad X = Z\sin\varphi; \qquad X_C = |\mathrm{Z}\sin\varphi|.$$

На цій основі зобразіть прості схеми заміщення цих приймачів. Якщо при цьому одна з двох величин R або X незмірно менша другої, то меншою з них можна знехтувати.

Типові схеми заміщення резистора, котушки індуктивності й конденсатора наведені на рис. 3.5, *а*, *б*, *в*, відповідно.



а *б* *в*

Рисунок 3.5

3.5.2. Використайте схеми заміщення приймачів і зобразіть схему заміщення електричного кола при їх послідовному з'єднанні.

По заданій вхідній напрузі кола U з табл. 3.2, а також опорам ідеальних елементів приймача – з табл. 3.1, проведіть розрахунок кола з послідовним з'єднанням приймачів для одного положення n конденсатора C, яке використовувалось.

Результати внесіть у табл. 3.3, де, поряд з вже раніше згаданими величинами, означені:

R_1 – активний опір резистора R_1;

$R_К$, $X_{Lк}$ – активний і реактивний опори котушки індуктивності L;

$X_С$ – ємнісний опір конденсатора C;

R, X, Z – активний, реактивний та повний опори всього кола;

$U_{Rк}$, $U_{Lк}$ – активна і реактивна складові напруги котушки, що визначаються як падіння напруги на ній;

P, Q – активна і реактивна потужності всього кола.

Таблиця 3.3

Задане					Обчислене											
U	R_1	$R_К$	$X_{Lк}$	X_C	R	X	Z	I	φ	U_{R1}	$U_{Rк}$	$U_{Lк}$	$U_К$	$U_С$	P	Q
В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	А	град	В	В	В	В	В	Вт	вар

Опори – активний, реактивний та повний розраховують таким чином:

$$R = R_1 + R_К; \quad X = X_{Lк} - X_C; \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Тоді діюче значення струму у колі за законом Ома дорівнює $I = U / Z$.

Кут зсуву фаз між напругою та струмом у градусах $\varphi = \text{arctg}\dfrac{X}{R}$.

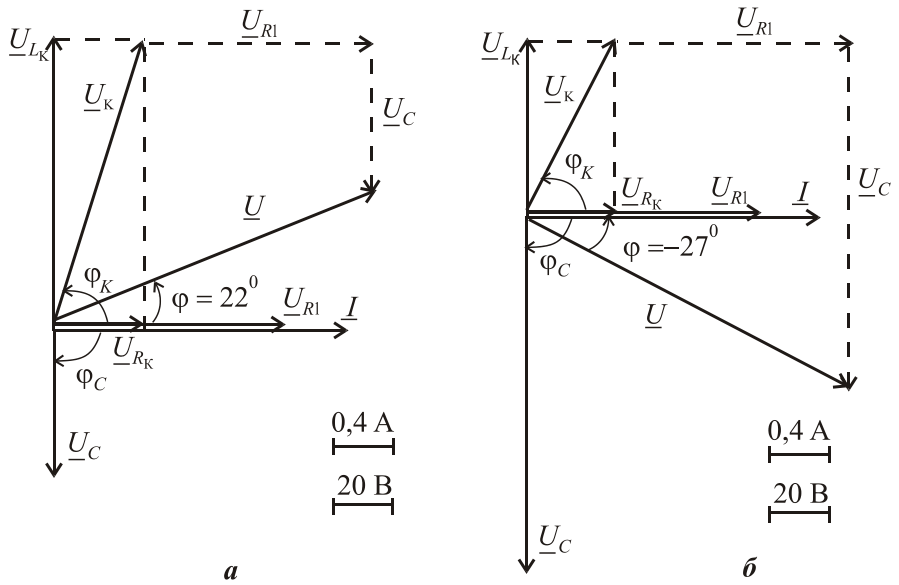
Діючі значення напруг на елементах кола визначаються як:

$$U_{R_1} = R_1 I; \; U_{R_К} = R_К I; \; U_{L_К} = X_{L_K} I; U_К = \sqrt{U_{L_К}^2 + U_{R_К}^2}; \; U_C = X_C I.$$

Активна та реактивна потужність: $P = RI^2$; $Q = XI^2$.

Порівняйте дані розрахунків (табл. 3.3) і вимірювань (табл. 3.2). Якщо вони достатньо близькі, то робота проведена вірно.

3.5.3. Побудуйте векторну діаграму електричних величин в масштабі для кола з послідовним з'єднанням приймачів за даними табл. 3.3. Приклади діаграм для активно-індуктивного (кут зсуву фаз φ>0) та активно-ємнісного (кут зсуву фаз φ<0) навантаження наведено на рис. 3.6 *а,б*.



а *б*

Рисунок 3.6

Контрольні запитання

1. Що називається змінним електричним струмом, зокрема, синусоїдним струмом?

2. Якими величинами характеризуються синусоїдні струм і напруга?

3. Якими опорами характеризуються кола змінного струму і як вони пов’язані між собою?

4. Що таке фазовий зсув? Який характер може мати навантаження і як це пов’язано зі значенням фазового зсуву?

5. Що розуміють під діючим значенням періодичних електричних величин і як визначаються діючі значення синусоїдних струму, напруги та ЕРС?

6. Запишіть закон Ома для кола змінного синусоїдного струму.

7. Сформулюйте закони Кірхгофа для кіл синусоїдного струму.

8. Якими потужностями характеризуються енергетичні процеси в електричних колах синусоїдного струму і як визначають ці потужності?

9. Які співвідношення між напругами у колі з послідовним з’єднанням елементів *R, L, C.* Наведіть приклад векторної діаграми для такого кола.

10. Які співвідношення основних електричних величин при резонансі напруг. Наведіть приклад векторної діаграми при резонансі напруг.

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ В РАЗІ ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ

Мета роботи – закріплення теоретичних знань і відпрацювання практичних навичок розрахункового і експериментального дослідження приймачів електроенергії і електричного кола синусоїдного струму в разі їх паралельного з'єднання.

4.1. Постановка задачі

Використайте джерело синусоїдної напруги і проведіть дослідження:

а) приймачів електроенергії: резистора, котушки індуктивності і конденсатора при їх індивідуальному живленні з метою визначення параметрів схем заміщення;

б) електричного кола з паралельним з'єднанням приймачів.

4.2. Теоретичні положення

Провідності визначаються за формулами:

– активна провідність $G = \frac{1}{R}$;

– реактивні провідності: $B_L = \frac{1}{X_L}$; $B_C = \frac{1}{X_C}$; $B = B_L - B_C$;

– повна провідність $Y = \frac{1}{Z}$, усі провідності змірюються у сименсах [См].

Повний Z, активний R і реактивний X опори приймачів визначаються за формулами:

$$Z = U / I; \quad R = P / I^2; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2},$$

повна Y, активна G і реактивна B провідності приймачів визначаються за формулами:

$$Y = I / U; \quad G = P / U^2; \quad B = \sqrt{Y^2 - G^2}.$$

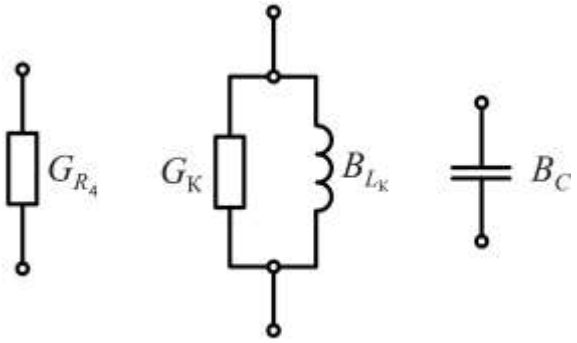
Якщо за цих умов одна з двох величин R або X, G або B незмірно менша за другу, то меншою з них можна знехтувати.

Кут зсуву фаз φ між напругою і струмом для кожного приймача визначається через опори або провідності:

$$\varphi = \text{arctg}\left[(X_L - X_C)/R\right] \text{ або } \varphi = \text{arctg}\left[(B_L - B_C)/G\right],$$

де X_L і B_L – індуктивні опор і провідність; X_C і B_C – ємнісні опор і провідність.

Типові схеми заміщення резистора, котушки індуктивності й конденсатора наведені на рис. 4.1.



а *б* *в*

Рисунок 4.1

Індуктивна провідність вітки з котушкою дорівнює

$B_{L_К} = \frac{X_{L_К}}{Z_К^2} = \frac{X_{L_К}}{R_К^2 + X_{L_К}^2}$, а $B_C = \frac{X_C}{Z_C^2} = \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} = \frac{X_C}{X_C^2} = \frac{1}{X_C}$ – ємнісна провідність вітки з конденсатором у разі знехтування активним опором ($R_C = 0$). Загальна реактивна провідність двох паралельних віток, в одну з яких увімкнено котушку, а у другу – конденсатор, буде дорівнювати $B = B_L - B_C$. Активна провідність вітки дорівнює $G = \frac{R}{Z^2} = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2}$. Повна провідність паралельних віток дорівнює $Y = \sqrt{B^2 + G^2}$.

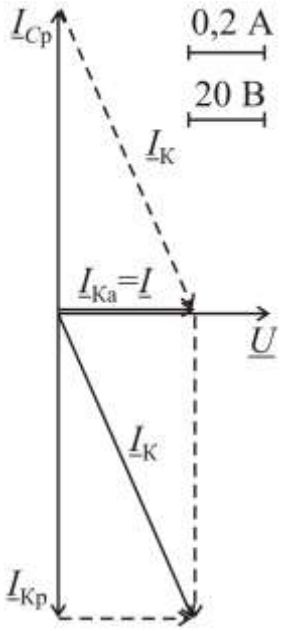


Рисунок 4.2

Режим резонансу струмів може спостерігатися у колі змінного струму з паралельним з'єднанням котушок індуктивності та конденсаторів.

Режим резонансу струмів виникне при умові, що індуктивна провідність вітки з котушкою буде дорівнювати ємнісній провідності вітки з конденсатором $B_L = B_C$, тобто $B = 0$ і $Y = G$.

Векторна діаграма резонансу струмів подана на рис. 4.2. Реактивні складові струмів котушки і конденсатора дорівнюють одна іншій за модулем $I_{Cр} = I_{Кр}$, таким чином, вони компенсують одна одну. Фазовий зсув між струмом та напругою при резонансі струмів, як і при резонансі напруг, дорівнює нулю φ=0.

4.3. Об’єкт дослідження

В усіх проведених дослідах використовується схема з електровимірювальними приладами, яка зображена на рис. 4.3. Регулювальне джерело змінної напруги це – лабораторний автотрансформатор Т1 (ЛАТР), який увімкнено у мережу змінної напруги ~ 127 В. З виходу ЛАТРа напруга подається на клемові збірки *a* і *b*, до яких підключені вітки з приймачами.

Об’єктами досліджень є окремо взяті приймачі: реостат R_4, котушка індуктивності *L* і конденсатор *C* з регулювальною ємністю, а також електричне коло, яке утворено їх паралельним з’єднанням. Необхідні варіанти кола забезпечуються за допомогою комутації ключів *Q*1, *Q*2 і *Q*3.

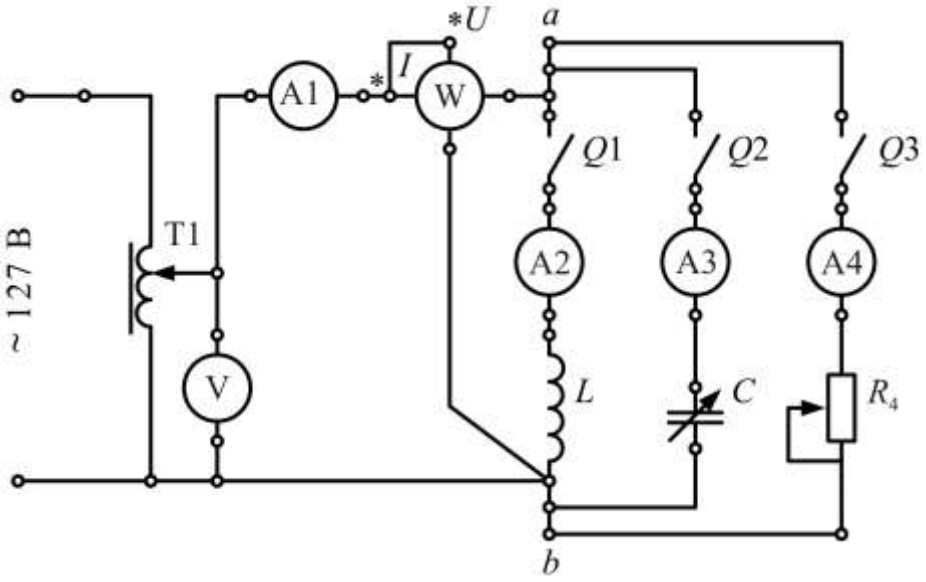


Рисунок 4.3

4.4. Порядок виконання експерименту

4.4.1. Складіть схему за рис. 4.3. ЛАТР Т1 поставте в нульове положення.

4.4.2. Проведіть по черзі індивідуальне дослідження приймачів електроенергії. Для цього залиште замкненим ключ тільки одного приймача. За допомогою ЛАТРа доведіть напругу *U* до заданої величини (100 В) і проведіть вимірювання струму *I* та активної потужності *P*. Результати запишіть в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Назва приймача електроенергії		Зміряне			Обчислене						
		U	*I*	*P*	*Z*	*R*	*X*	*Y*	*G*	*B*	φ
		В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	См	См	См	град
Котушка індуктивності *L*											
Конденсатор	положення *C* №…										
	положення *C* №…										
Реостат R_4											

Конденсатор випробують у двох положеннях перемикача, які записуються в табл. 4.1 (не рекомендуються обирати середні положення ручки перемикача конденсатора).

При випробуваннях реостата R_4 його повзун встановіть так, щоб струм виявився на 30–50 % менший за величину, яка була одержана для котушки індуктивності (положення повзуна далі зберігати незмінним).

4.4.3. Досліджуйте паралельне з'єднання приймачів для тих варіантів з табл. 4.2, які будуть задані викладачем. Конкретний варіант отримується відповідною комутацією ключів $Q1$–$Q3$ за схемою на рис. 4.3. Дослід проводять два рази з використанням тих положень перемикача C, які були записані в табл. 4.1. Встановіть величину напруги U за вказівкою викладача (рекомендовано 100 В).

Проведіть вимірювання за схемою рис. 4.3 і результати запишіть в табл. 4.2, де позначено U, I, P – спільні напруга, струм і активна потужність, які отримуються від джерела; $I_К$, I_C, I_{R_4} – струми котушки індуктивності, конденсатора і резистора.

Таблиця 4.2

Паралельно з'єднані приймачі за різних положень $C_п$	Зміряне					
	U	I	P	$I_К$	$I_С$	I_{R_4}
	В	А	Вт	А	А	А
L, C №…, R_4						
L, C №…, R_4						

4.5. Обробка результатів експериментів і оформлення роботи

4.5.1. За схемами заміщення приймачів зобразіть спільну схему заміщення електричного кола в разі паралельного з'єднання цих приймачів. За вхідною напругою кола U, яка задається з табл. 4.2, і параметрами ідеальних елементів приймачів з табл. 4.1 проведіть розрахунок кола з паралельним з'єднанням приймачів для тих варіантів з табл. 4.2, які досліджувались експериментально. Результати розрахунків внесіть в табл. 4.3, де поряд зі вже згаданими раніше означені:

– повний опір котушки індуктивності $Z_К = \sqrt{R_К^2 + X_{L_К}{}^2}$,

де $R_К$, $X_{Lк}$, активний, реактивний опори котушки індуктивності L;

– діючи значення струмів у вітках:

$$I_К = \frac{U}{Z_К};\ I_C = \frac{U}{X_C};\ I_{R_4} = \frac{U}{R_4},$$

де X_C – ємнісний опір конденсатора C; R_4 – активний опір резистора R_4;

– початкова фаза струму $I_{\text{К}}$ $\psi_{i_{\text{К}}} = -\varphi_{\text{К}}$, де кут зсуву фаз $\varphi_{\text{К}} = \text{arctg}\dfrac{X_{L_{\text{К}}}}{R_{\text{К}}}$,

якщо прийняти ψ_U=0.

– активна та реактивна складові струму I:

$$I_{\text{а}} = I_{R4\text{а}} + I_{\text{Ка}},\ \text{де}\ I_{\text{Ка}} = I_{\text{К}}\cos\psi_{i_{\text{К}}},$$

$$I_{\text{р}} = I_{\text{Кр}} + I_{C\text{р}},\ \text{де}\ I_{\text{Кр}} = I_{\text{К}}\sin\psi_{i_{\text{К}}};$$

– діюче значення струму джерела $I = \sqrt{I_{\text{а}}^2 + I_{\text{р}}^2}$;

– кут зсуву $\varphi = -\psi_i$; де $\varphi = -\text{arctg}\dfrac{I_{\text{р}}}{I_{\text{а}}}$.

Таблиця 4.3

Задане						Обчислене									
Положення C	U	$R_{\text{К}}$	$X_{L\text{к}}$	X_C	R_4	$Z_{\text{К}}$	$\varphi_{\text{К}}$	$I_{\text{К}}$	I_C	I_{R_4}	I	φ	S	P	Q
	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	град	А	А	А	А	град	В·А	Вт	вар
№…															
№…															

При розрахунках також можна замість опорів використати провідності відповідних приймачів з табл. 4.4:

$$I_{\text{К}} = Y_{\text{К}}U;\qquad I_C = B_C U;\qquad I_{R4} = G_{R4}U;\qquad I = UY;$$

$$Y = \sqrt{(G_{R4} + G_{\text{К}})^2 + (B_{L_{\text{К}}} - B_C)^2};$$

$$\varphi = \text{arctg}\frac{B}{G} = \text{arctg}\frac{B_{L_{\text{К}}} - B_C}{G_{R4} + G_{R_{\text{К}}}}.$$

Повна, активна і реактивна потужності усього кола відповідно:

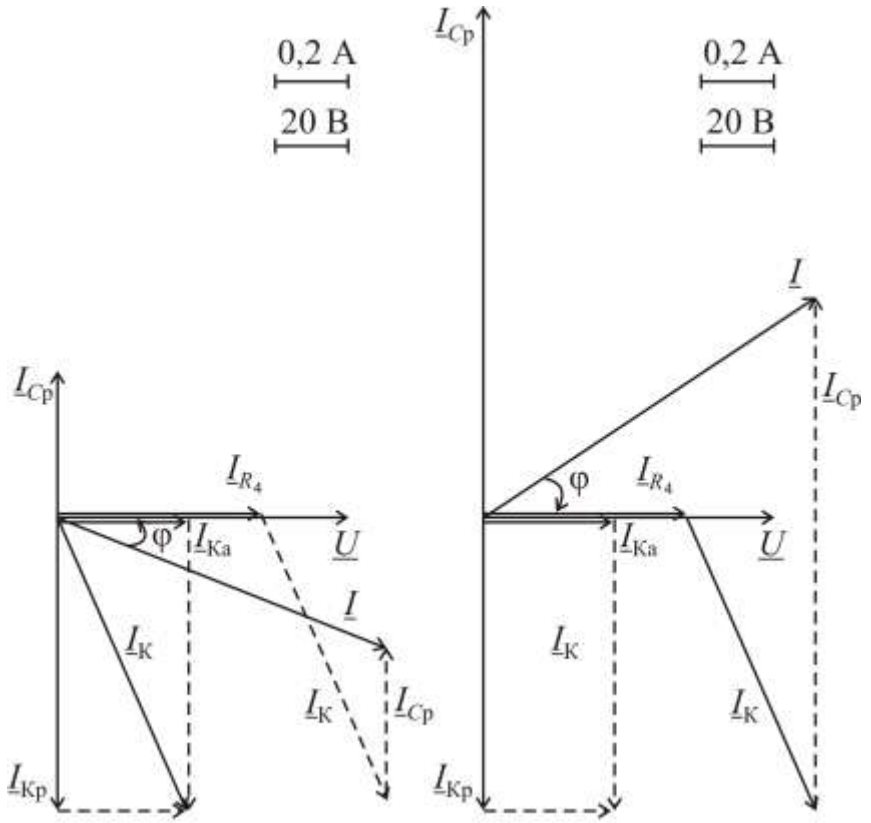
$S = UI$; $\qquad P = S\cos\varphi$; $\qquad Q = S\sin\varphi$.

Таблиця 4.4

Задане					Обчислене										
Положення C	U	$G_{\text{К}}$	$B_{L\text{к}}$	B_C	Y_K	$\varphi_{\text{К}}$	$I_{\text{К}}$	$\varphi_{\text{С}}$	I_C	Y	I	φ	S	P	Q
	В	См	См	См	См	град	А	град	А	См	А	град	В·А	Вт	вар
№…															
№…															

Порівняйте дані розрахунків з табл. 4.3 і дані вимірювань з табл. 4.2 та переконайтесь в вірогідності досліджень, які проведені.

4.5.2. Побудуйте векторні діаграми електричних величин для кола з паралельним з'єднанням приймачів для $B_{Lк} > B_C$ та $B_{Lк} < B_C$. Приклади побудови векторних діаграм наведені на рис.4.4 *а*, *б* .



а *б*

Рисунок 4.4

Контрольні запитання

1. Як визначаються параметри схеми заміщення приймачів за результатами вимірювання напруги, струму і активної потужності?
2. Як проводиться розрахунок кола синусоїдного струму в разі паралельного з'єднання приймачів?
3. Як визначають активну, реактивну і повну провідності приймача електроенергії, якщо задані його опори?
4. Який порядок побудови векторної діаграми для кола синусоїдного струму з паралельним з єднанням приймачів?
5. Які умови виникнення резонансу струмів і які співвідношення основних електричних величин у цьому режимі?
6. Сформулюйте закон Ома для кола змінного синусоїдного струму.
7. Сформулюйте закони Кірхгофа для кіл змінного синусоїдного струму.
8. Як розраховують активну, реактивну і повну провідності електричного кола в разі паралельного з'єднання приймачів?

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи – закріплення теоретичних знань про роботу трифазних кіл змінного струму при різних способах з'єднання приймачів і різному характері навантаження; отримання практичних навичок розрахунку і виміру струмів, напруг і активних потужностей в елементах трифазного кола.

5.1. Постановка задачі

Навчитися збирати трифазні схеми і проводити виміри фазних і лінійних струмів, напруг, а також активної потужності у разі сполучення приймачів "зіркою" та "трикутником". Перевіряти експериментально основні співвідношення фазних і лінійних струмів і напруг при різних способах з'єднання приймачів у випадках симетричного і несиметричного навантажень.

Після виконання експериментів необхідно провести розрахунок кіл, що досліджуються і зіставити дослідні та розрахункові дані. Перевірити виконання законів Кірхгофа в трифазних колах.

5.2. Теоретичні положення
Основні параметри трифазного кола

На рис. 5.1 показано схему трифазного електричного кола, в якому фази джерела сполучені за схемою "зірка", а приймача – за схемою "зірка" (рис. 5.1, *а*, *б*) або "трикутник" (рис. 5.1, *в*). Джерело та приймачі з'єднуються трифазною лінією електропередачі (ЛЕП), яка утворена трьома лінійними (*A– a, B – b, C – c*) і нейтральним (***N*** **–** ***n***) проводами.

Трифазні приймачі можуть підключатися до ЛЕП такими способами:

– "зіркою" з нейтральним (нульовим) проводом (рис. 5.1, *а*);

– "зіркою" без нейтрального (нульового) проводу (рис. 5.1, *б*);

- "трикутником" (рис. 5.1, *в*).

На рис. 5.1 позначені комплексні опори фаз приймачів :

$\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ – при з'єднанні зіркою,

$\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ – при з'єднанні трикутником.

У загальному випадку для фазного навантаження $\underline{Z}_{\text{ф}} = Z_{\text{ф}} \cdot e^{j\varphi_{\text{ф}}}$,

де $Z_{\text{ф}}$ – повний опір фази приймача, а $\varphi_{\text{ф}}$ – кут зсуву фаз між фазною напругою приймача $U_{\text{фп}}$ та струмом фази $I_{\text{ф}}$. Кут зсуву визначає характер навантаження у фазі.

На рис. 5.1 прийнята наступна система позначень струмів:

$\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ – фазні струми при з'єднанні "зіркою" ($\underline{I}_{\phi Y}$);

$\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ – фазні струми при з'єднанні "трикутником" ($\underline{I}_{\phi\Delta}$);

$\underline{I}_N$ – струм у нейтральному проводі;

$\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ – лінійні струми при будь-якому способі з'єднання навантаження ($\underline{I}_{лY}$ або $\underline{I}_{л\Delta}$).

При з'єднанні «зіркою» без нейтрального проводу між нейтральною точкою навантаження ***n*** і нейтральним проводом ***N – n*** при несиметрії може виникнути напруга зміщення нейтралі $\underline{U}_N$.

На приймачах встановлюється фазна напруга ($U_{\phi п}$):

$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ або $U_{\phi Y}$ – для з'єднань Y и Y ;

$\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$ або $U_{\phi\Delta}$ – для з'єднання Δ .

Цю напругу не слід плутати із згадуваною вже фазною напругою джерела. Конкретні співвідношення напруг можна встановити за рис. 5.1, а саме:

$\underline{U}_a = \underline{U}_A, \underline{U}_b = \underline{U}_B, \underline{U}_c = \underline{U}_C$ для Y ;

$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N,\ \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N,\ \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N$ для Y ;

$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB};\ \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC};\ \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$ для Δ.

Активна потужність трифазного навантаження складається з активних потужностей фаз. Для кожної фази приймача потужність визначається відомим виразом

$$P_\phi = U_{\phi п} I_\phi \cos\varphi_\phi .$$

Розрізняють фазні і лінійні струми та напруги. Напруги між лінійними проводами (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}) називають - лінійними, а між лінійними проводами і нейтральним ***N – n*** (U_A, U_B, U_C) – фазними.

Фазні напруги джерела утворюють трифазну симетричну систему:

$$\underline{U}_A = U_\phi \cdot e^{j0^\circ};\quad \underline{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j120^\circ};\quad \underline{U}_C = U_\phi \cdot e^{j120^\circ},$$

тобто мають однакове діюче значення U_ϕ і зміщені по фазі одна відносно одної на третину періоду Т або, в кутовій мірі, на кут $120°$, що і показано на рис. 5.2.

Лінійні напруги джерела пов'язані з фазними на основі другого закону Кірхгофа :

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B;\ \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C;\ \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A,$$

і утворюють свою симетричну систему з діючим значенням $U_Л$. Ця система показана також на рис. 5.2 і зміщена по фазі відносно системи фазних напруг на кут $30°$.

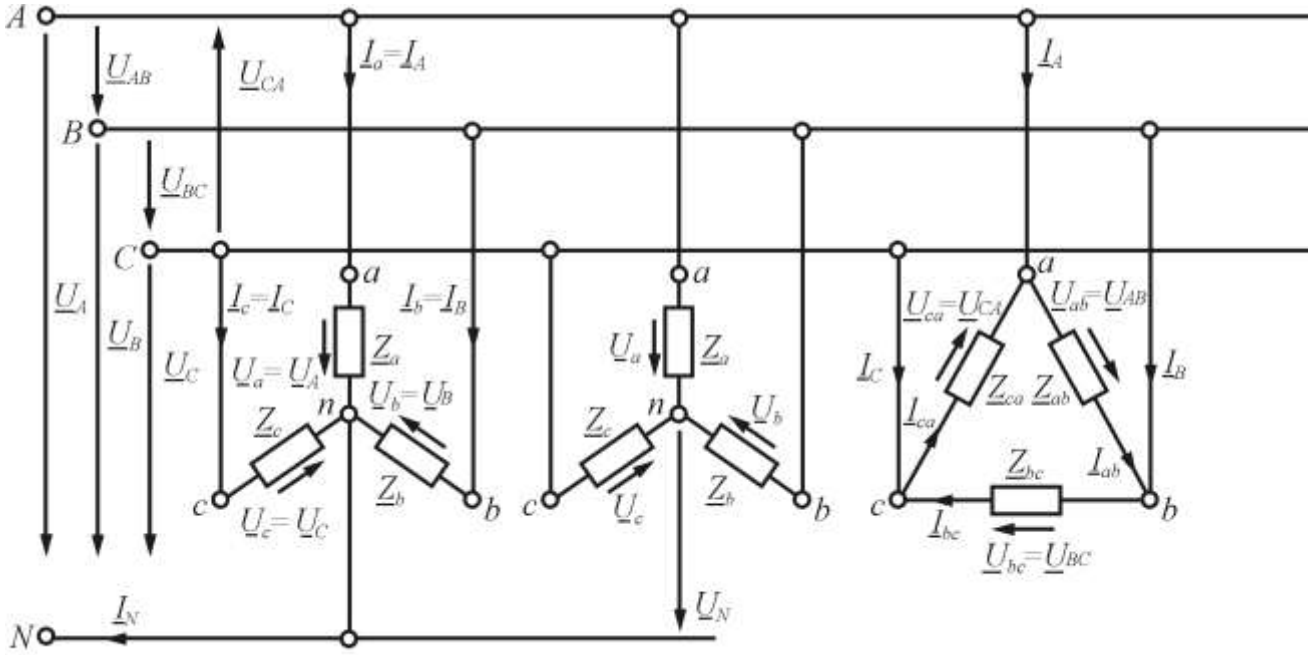


Рисунок 5.1 Схема трифазного електричного кола

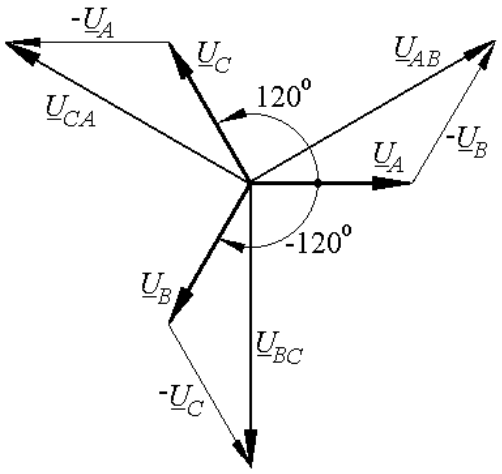


Рисунок 5.2

З векторної діаграми геометрично виходить співвідношення $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$, або $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$. Систему фазних і лінійних напруг джерела вважатимемо завжди симетричною, тобто

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0; \;\; \underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0.$$

Симетричне навантаження

Якщо комплексні опори фаз споживачів рівні між собою, то навантаження в цьому випадку буде симетричним. Тобто повинні бути рівні і модулі фазних опорів $Z_ф$ і кути зсуву фаз $\varphi_ф$, що визначають характер навантаження в кожній фазі.

$\underline{Z}_ф = Z_ф \cdot e^{j\varphi_ф} = \underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ – при з'єднанні Y і Y ;

$\underline{Z}_ф = Z_ф \cdot e^{j\varphi_ф} = \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$ – при з'єднанні Δ.

При цьому діючі значення фазних струмів також рівні між собою, відповідно рівні між собою і діючі значення лінійних струмів. Отже, розрахунок досить проводити тільки для однієї з фаз.

На рис. 5.3, *а* представлена векторна діаграма струмів і напруг для з'єднання фаз "зірка" при симетричному навантаженні. Фазні напруги на навантаженні $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$, як і фазні напруги джерела $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$, що утворюють їх, та лінійні напруги джерела $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ відповідно, являють собою симетричні системи. З врахуванням того, що $U_N = 0$, між лінійними напругами і струмами та напругами і струмами фаз приймача встановлюються наступні співвідношення:

$$U_{ф\mathrm{Y}} = \frac{U_л}{\sqrt{3}}; \qquad I_{л\mathrm{Y}} = I_{ф\mathrm{Y}} = \frac{U_{ф\mathrm{Y}}}{Z_ф} = \frac{U_л}{\sqrt{3}Z_ф}.$$

Струм в нейтральному проводі $\boldsymbol{N-n}$ $\underline{I}_N = 0$.

На рис. 5.3, *б* представлено векторну діаграму струмів та напруг для з'єднання фаз "трикутником" при симетричному навантаженні. Лінійні та фазні струми утворюють симетричні системи, тобто

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0; \qquad \underline{I}_{ab} + \underline{I}_{bc} + \underline{I}_{ca} = 0.$$

Між лінійними напругами і струмами, та напругами й струмами фаз приймача встановлюються в цьому випадку наступні співвідношення:

$$U_{ф\Delta} = U_{фп}; \quad I_{л\Delta} = \sqrt{3}I_{ф\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_{ф\Delta}}{Z_ф} = \frac{\sqrt{3}U_л}{Z_ф}.$$

Отже, при перетворенні приймача з "зірки" на "трикутник" лінійні струми і споживана потужність зростають в три рази:

$$P_{\mathrm{Y}} = 3P_{ф\mathrm{Y}} = 3U_{ф\mathrm{Y}}I_{ф\mathrm{Y}}\cos\varphi_ф = 3\frac{U_л}{\sqrt{3}}\frac{U_л}{\sqrt{3}Z_ф}\cos\varphi_ф = \frac{U_л^2}{Z_ф}\cos\varphi_ф;$$

$$P_\Delta = 3P_{ф\Delta} = 3U_{ф\Delta}I_{ф\Delta}\cos\varphi_ф = 3U_л\frac{U_л}{Z_ф}\cos\varphi_ф = 3\frac{U_л^2}{Z_ф}\cos\varphi_ф.$$

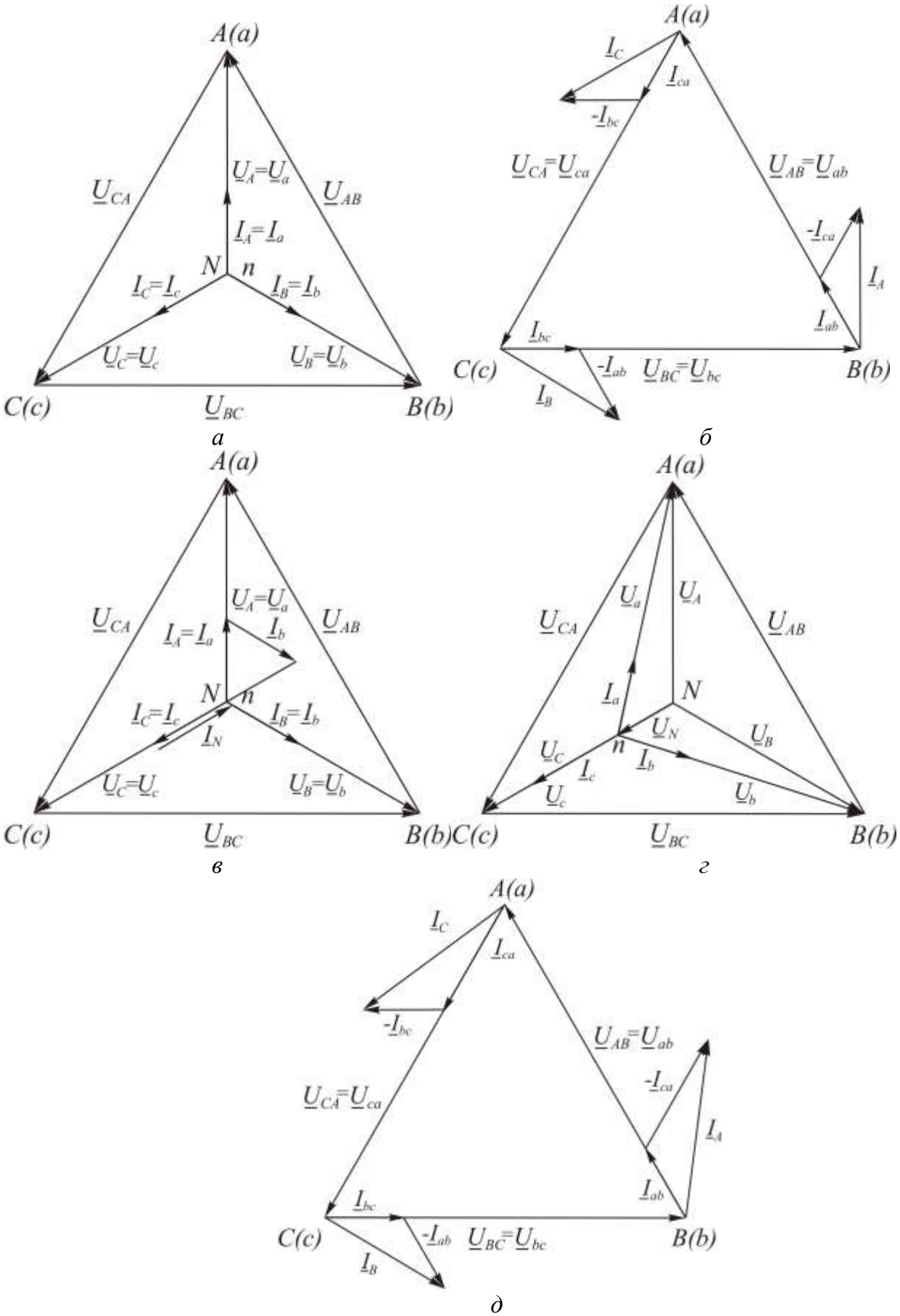

A(a)
$\underline{U}_{CA}$
$\underline{U}_{AB}$
$\underline{U}_A=\underline{U}_a$
$\underline{I}_A=\underline{I}_a$
N
n
$\underline{I}_C=\underline{I}_c$
$\underline{I}_B=\underline{I}_b$
$\underline{U}_C=\underline{U}_c$
$\underline{U}_B=\underline{U}_b$
C(c)
$\underline{U}_{BC}$
B(b)
а
A(a)
$\underline{I}_C$
$\underline{I}_{ca}$
$-\underline{I}_{bc}$
$\underline{U}_{CA}=\underline{U}_{ca}$
$\underline{U}_{AB}=\underline{U}_{ab}$
$-\underline{I}_{ca}$
$\underline{I}_A$
$\underline{I}_{ab}$
$\underline{I}_{bc}$
C(c)
$-\underline{I}_{ab}$
$\underline{U}_{BC}=\underline{U}_{bc}$
B(b)
$\underline{I}_B$
б
A(a)
$\underline{U}_{CA}$
$\underline{U}_{AB}$
$\underline{U}_A=\underline{U}_a$
$\underline{I}_A=\underline{I}_a$
$\underline{I}_b$
N
n
$\underline{I}_C=\underline{I}_c$
$\underline{I}_B=\underline{I}_b$
$\underline{I}_N$
$\underline{U}_C=\underline{U}_c$
$\underline{U}_B=\underline{U}_b$
C(c)
$\underline{U}_{BC}$
B(b)
в
A(a)
$\underline{U}_a$
$\underline{U}_A$
$\underline{U}_{CA}$
$\underline{U}_{AB}$
$\underline{I}_a$
N
$\underline{U}_N$
$\underline{U}_B$
$\underline{U}_C$
n
$\underline{I}_b$
$\underline{I}_c$
$\underline{U}_c$
$\underline{U}_b$
C(c)
$\underline{U}_{BC}$
B(b)
г
A(a)
$\underline{I}_C$
$\underline{I}_{ca}$
$-\underline{I}_{bc}$
$\underline{U}_{AB}=\underline{U}_{ab}$
$\underline{U}_{CA}=\underline{U}_{ca}$
$-\underline{I}_{ca}$
$\underline{I}_A$
$\underline{I}_{ab}$
$\underline{I}_{bc}$
C(c)
$-\underline{I}_{ab}$
$\underline{U}_{BC}=\underline{U}_{bc}$
B(b)
$\underline{I}_B$
д

Рисунок 5.3

Несиметричне навантаження

Якщо фазні опори приймача не рівні між собою, то навантаження є несиметричним, тобто $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$ – при з'єднанні "зіркою", $\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} \neq \underline{Z}_{ca}$ – при з'єднанні "трикутником".

У разі з'єднання фаз приймача у "зірку" з нейтральним проводом (рис.5.3, *в*), або в "трикутник" (рис. 5.3, *д*) несиметрія навантаження на фазні напруги не впливає.

Але у разі з'єднання фаз приймача "зіркою" без нейтрального проводу (рис. 5.3, *г*) фазна напруга на приймачі змінюється по відношенню до фазної напруги джерела, оскільки виникає напруга зміщення нейтралі, яка визначається за формулою

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_a\underline{U}_A + \underline{Y}_b\underline{U}_B + \underline{Y}_c\underline{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

де $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$, $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$, $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ – комплексні повні провідності фаз приймача.

Тому при несиметричному навантаженні з'єднаному за схемою "зірка" без нейтрального проводу $\underline{U}_N \neq 0$, що приводить до того, що система фазних напруг приймачів $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ буде несиметричною. Векторна діаграма струмів та напруг для цього випадку наведена на рис. 5.3, *г*.

Струм фази визначається за законом Ома для кола змінного струму

$$\underline{I}_{\text{ф}} = \frac{\underline{U}_{\text{фп}}}{\underline{Z}_{\text{ф}}},$$

де $\underline{U}_{\text{фп}}$ – напруга, прикладена до фази приймача, що визначається залежно від способу з'єднання фаз і наявності несиметрії.

Складання фазних струмів для визначення лінійного струму, а також струму у нейтральному проводі проводиться у векторній або у комплексній формах з урахуванням прийнятого напряму струмів.

При з'єднанні "зіркою" з нейтральним проводом:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_b, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_c,$$

а струм у нейтральному проводі $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$.

При з'єднанні "трикутником" лінійні струми пов'язані з фазними на основі першого закону Кірхгофа (рис. 5.3 *б, д*):

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

При несиметричному навантаженні потужність кожної фази визначається відповідно до своєї фазної напруги, струмів і коефіцієнтів навантаження. Потужність споживана трифазною мережею дорівнює сумі фазних потужностей.

При з’єднанні "зіркою"

$$P_Y = U_a I_a \cos\varphi_a + U_b I_b \cos\varphi_b + U_c I_c \cos\varphi_c .$$

При з’єднанні "трикутником"

$$P_\Delta = U_{ab} I_{ab} \cos\varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \cos\varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \cos\varphi_{ca} .$$

5.3 Об’єкт дослідження

Об’єктом експериментального дослідження є симетричне або несиметричне навантаження при з’єднанні фаз приймача "зіркою" (без нейтрального проводу і з ним), або "трикутником".

При включенні в кожну з фаз резисторів *R*1, *R*2, *R*3, рівних між собою за значенням, ми маємо симетричне навантаження. Несиметричне навантаження створюватиметься шляхом зміни значення фазного опору однієї з фаз (наприклад, паралельним підключенням іншого резистора *R*4).

Схема електричного кола у разі з’єднання приймачів "зіркою" зображена на рис. 5.4. Коло, що досліджується, вмикається до трифазної мережі *A, B, C, N* з лінійною напругою 36 В. Вимірювання напруг здійснюється за допомогою переносного вольтметра *PV*.

Напруги: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – лінійні (між відповідними лініями *A, B* і *C*); U_A, U_B, U_C – фазні джерела (між *A, B* і *C* та нейтральним проводом ***N*** – ***n***); U_a, U_b, U_c – фазні на навантаженні (між началами фаз *a, b, c* та нейтральною точкою навантаження *n*); U_N – напруга зміщення нейтралі (між точками *N* і *n*).

При з’єднанні навантаження за схемою "зірка" лінійні струми I_A, I_B, I_C дорівнюють відповідним фазним струмам I_a, I_b, I_c. Тому амперметрами *PA*1, *PA*2 і *PA*3 вимірюються лінійні і фазні струми. Амперметром *PA*4 – струм I_N у нейтральному проводі.

Ватметри *PW*1 і *PW*2 вимірюють активні потужності навантажень фаз *A* і *C* – P_a і P_c.

В разі симетричного навантаження потужності усіх фаз однакові і дорівнюють потужності $P_Ф$, яка споживається будь-яким фазним навантаженням. Тому активна потужність трифазного симетричного навантаження:

$$P_S = 3P_Ф.$$

У разі з’єднання приймачів "трикутником" схема електричного кола подана на рис. 5.5. Тут також в якості приймачів електричної енергії використовуються резистори *R*1, *R*2, *R*3. Коло підключають до трифазної симетричної мережі *A, B, C, N* з лінійною напругою 36 В.

Вимірювання лінійних напруг U_{AB}, U_{BC} , U_{CA} здійснюється за допомогою переносного вольтметра *PV* (між відповідними лініями *A, B* і *C*). При з’єднанні трифазного навантаження за схемою "трикутник" ці ж напруги одночасно є фазними і позначаються U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}.

Лінійні струми I_A, I_B, I_C та фазні струми I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} вимірюються відповідними амперметрами *PA*1 – *PA*3, та *PA*4 – *PA*6.

Ватметри *PW*1 і *PW*2 за схемою, яка зображена на рис. 5.5, вимірюють активну потужність трифазного навантаження у цілому, тобто $P_S = P_1 + P_2$ (за методом "двох ватметрів").

5.4. Порядок виконання експерименту

5.4.1. Змірте лінійні і фазні напруги джерела. Результати вимірювань занесіть в табл. 5.1.

5.4.2. Складіть схему електричного кола у разі з'єднання приймачів "зіркою" згідно рис. 5.4.

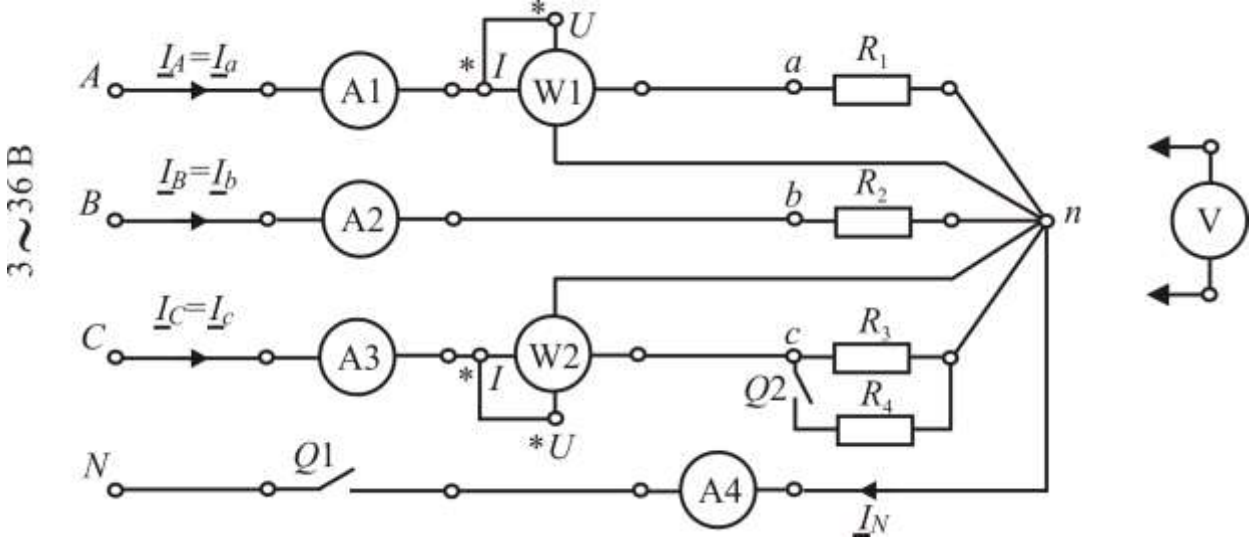


Рисунок 5.4 Схема електричного кола у разі з'єднання приймачів "зіркою"

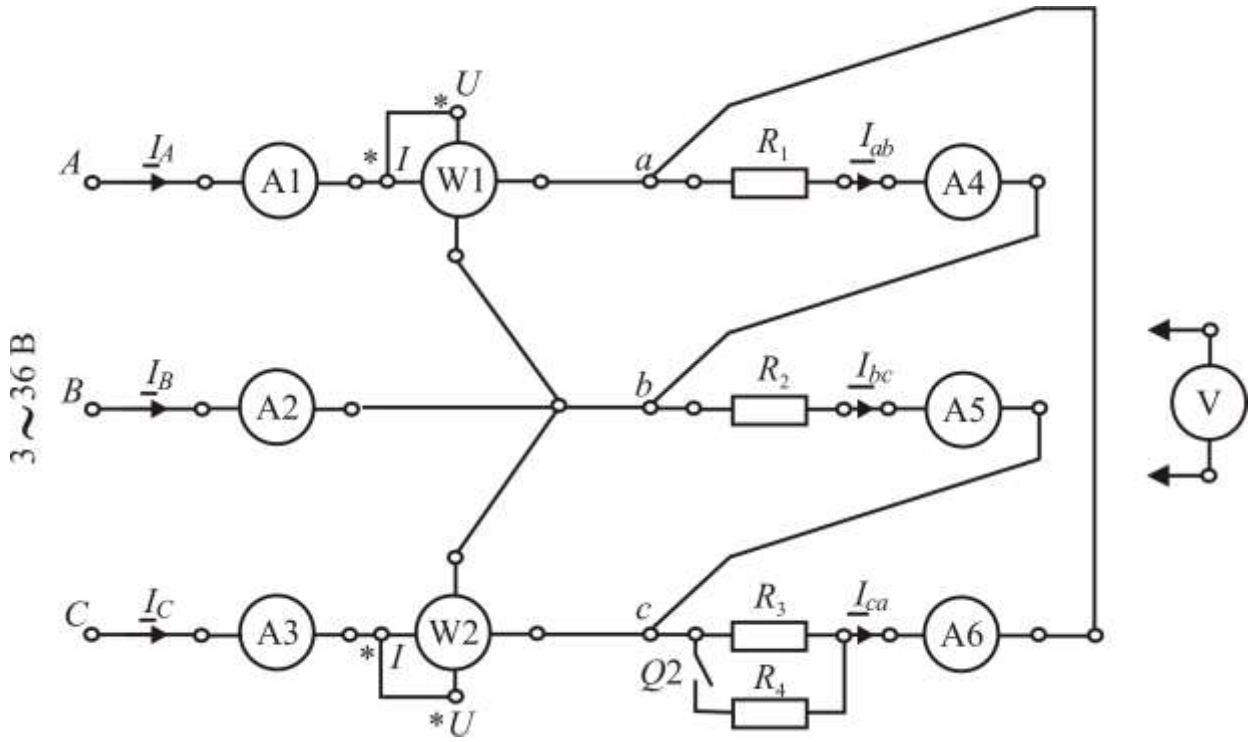


Рисунок 5.5 Схема електричного кола у разі з'єднання приймачів "трикутником"

Таблиця 5.1

Напруга джерела, В								Співвідношення напруг лінійне/фазне
Зміряні						Середні значення		
U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C	$U_{Лср}$	$U_{Фср}$	$U_{Лср}/U_{Фср}$
В	В	В	В	В	В	В	В	-

5.4.3. Проведіть дослідження симетричного навантаження без нейтрального проводу (у фази ввімкнені однакові резистори $R1$, $R2$ і $R3$, а ключ $Q1$ повинен перебувати у розімкненому стані). Змірте фазні напруги U_a U_b, U_c споживачів $R1$, $R2$, $R3$ і переконайтесь в тому, що вони дорівнюють відповідним фазним напругам джерела U_A, U_B, U_C, а напруга зміщення нейтралі U_N дорівнює нулю. Ці дані, а також зміряні струми і потужності, запишіть у табл. 5.2.

5.4.4. Проведіть дослідження симетричного навантаження з нейтральним проводом (у фази ввімкнено резистори $R1$, $R2$ і $R3$, а ключ $Q1$ повинен перебувати у замкненому стані). Необхідно також провести вимірювання, що і в попередньому пункті і переконатись, що в разі симетричного навантаження нейтральний провід не дає яких-небудь змін (будь-які зміни можливі завдяки несиметрії напруг у мережі живлення). Результати внесіть в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Задане		Зміряне												Обчислене		
Характер навантаження	Спосіб з'єднання	Напруга, В				Струм, А				Потужність, Вт				Опори фаз, Ом		
		U_a	U_b	U_c	U_N	I_a	I_b	I_c	I_N	P_a	P_b	P_c	P_S	Z_a	Z_b	Z_c
Симетричне $R1$, $R2$, $R3$	Y															
	Y-															
Несиметричне $R1$, $R2$, $R34$	Y															
	Y-															

5.4.5. Проведіть дослідження несиметричного навантаження без нейтрального проводу. У фази ввімкнено резистори $R1$, $R2$, $R3$, $R4$. Ключ $Q1$ повинен перебувати у розімкненому стані, а ключ $Q2$ у замкненому. Змірте фазні напруги U_a U_b, U_c споживачів. Ці дані, а також зміряні струми і потужності, запишіть у табл.5.2.

5.4.6. Проведіть дослідження несиметричного навантаження з нейтральним проводом. У фази ввімкнено резистори $R1$, $R2$, $R3$, $R4$. Ключ $Q1$ повинен

перебувати у замкненому стані, і ключ *Q*2 теж у замкненому. Необхідно провести ти ж вимірювання, що і в попередньому пункті. Результати треба внести у табл. 5.2.

5.4.7. Складіть схему електричного кола у разі з'єднання приймачів "трикутником" згідно рис. 5.5.

5.4.8. Проведіть дослідження трифазного кола при симетричному навантаженні та з'єднанні приймачів "трикутником". Для цього змірте величини, які вказані в табл. 5.3 та запишіть отримані результати.

5.4.9. Проведіть дослідження трифазного кола при несиметричному навантаженні та з'єднанні приймачів "трикутником". Для цього змірте величини, які вказані в табл. 5.3 та запишіть отримані результати.

Таблиця 5.3

Задане	Зміряне												Обчислене		
Характер навантаження трьох фаз	Напруга, В			Струм, А						Потужність, Вт			Опори фаз, Ом		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	P_1	P_2	P_S	Z_{ab}	Z_{bc}	Z_{ca}
Симетричне *R*1, *R*2, *R*3															
Несиметричне *R*1, *R*2, *R*34															

5.5. Обробка результатів експерименту і оформлення роботи

5.5.1. Розрахуйте середні значення лінійних і фазних напруг джерела – $U_{Лср}$ і $U_{Фср}$ та їх співвідношення по даним табл. 5.1. і порівняйте з теоретичним значенням ($\sqrt{3}$).

5.5.2. По даним табл. 5.2 розрахуйте опори фаз Z_a, Z_b, Z_c трифазного навантаження по закону Ома: повний опір фази $Z_Ф = U_Ф/I_Ф$, де $U_Ф$, $I_Ф$ – фазні напруги і струми на навантаженні відповідних фаз. Далі зважайте на те, що в усіх випадках резисторів $Z_Ф = R_Ф$ (активний опір).

5.5.3. Використовуючи значення фазних опорів (табл. 5.2.) та фазних напруг джерела (табл. 5.1.), обчисліть фазну напругу і фазні струми приймачів, а також активні потужності кожної фази і сумарну активну потужність трифазного кола для симетричного і несиметричного навантаження у разі з'єднання приймачів за схемою "зірка". Занесіть результати розрахунків у табл. 5.2. Зіставте експериментальні і розрахункові дані.

5.5.4. Побудуйте в масштабі векторні діаграми напруг і струмів для симетричного і несиметричного навантаження при з'єднанні приймачів за схемою "зірка".

5.5.5. Розрахуйте середні значення лінійних і фазних струмів у разі симетричного навантаження, якщо з'єднання приймачів – за схемою "трикут-

ник", і їх співвідношення $I_Л/I_Ф$ за даними табл. 5.3, і порівняйте з теоретичним значенням $\sqrt{3}$.

5.5.6. За даними табл. 5.3 розрахуйте опори фаз Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} трифазного навантаження по закону Ома: повний опір фази $Z_Ф = U_Ф/I_Ф$, де $U_Ф$, $I_Ф$ – фазні напруги і струми на навантаженні відповідних фаз. В усіх випадках для резисторів $Z_Ф = R_Ф$ (активний опір).

5.5.7. Використовуючи значення фазних опорів і лінійних напруг, обчисліть фазні напруги, фазні і лінійні струми для симетричного і несиметричного навантаження, у разі з'єднання приймачів за схемою "трикутник", а також активну потужність кожної фази і сумарну активну потужність трифазного кола. Занесіть результати розрахунків у табл. 5.3. Порівняйте експериментальні і розрахункові дані.

5.5.8. Побудуйте в масштабі векторні діаграми напруг і струмів для симетричного і несиметричного навантаження при з'єднанні приймачів за схемою "трикутник".

Контрольні запитання

1. Яке навантаження трифазного кола називається симетричним, а яке несиметричним?
2. Як три однофазних приймача з'єднати "зіркою" або "трикутником"?
3. Які напруги і струми називаються фазними, лінійними і де вони знаходяться у колі?
4. Які існують залежності між діючими значеннями лінійних і фазних напруг і струмів в разі симетричного навантаження при з'єднанні приймачів "зіркою"?
5. Яке співвідношення між лінійними і фазними струмами і напругами в разі симетричного навантаження при з'єднанні фаз "трикутником"?
6. Який порядок будування векторних діаграм для різних варіантів трифазного навантаження, яке з'єднано за схемою "зірка" ?
7. Яку роль відіграє нейтральний провід при з'єднанні приймачів "зіркою" ?
8. Що таке зміщення нейтралі, в яких випадках воно виникає і як його розрахувати?
9. Від чого залежіть кут зсуву фаз між струмами і напругами приймачів?
10. Як будується векторна діаграма напруг та струмів при з'єднанні трифазного навантаження "трикутником"?
11. Як вимірюється потужність у трифазній мережі?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимов В.Г. Электротехника: программир. учеб. пособ. для неэлектротехнич. спец. вузов / В.Г. Герасимов, Х.Э. Зайдель, В.В. Коген-Далин и др.; под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш.шк., 1983. – 480 с.

2. Трегуб А.П. Электротехника / А.П.Трегуб; под ред. Е.В. Кузнецова. – К.: Вища шк., 1987. – 600 с.

3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.

4. Расчет электрических цепей : учеб. пособ. / В.Г Данько, .И.Милых , А.К. Черкасов. – К.: УМК ВО, 1992. – 124 с.

5. Електротехніка : навч. посіб. / В.Г. Данько, В.І. Мілих, А.К.Черкасов, В.Ф.Болюх. – К: НМК ВО, 1990. – 264 с.

6. Данько В.Г. Расчет линейных электрических цепей : учеб. пособ./ В.Г. Данько, Ф.Т.Карпенко, В.И. Милых, А.К.Черкасов. – Х.: ХПИ, 1992. – 88 с.

7. Касаткин А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, В.М. Немцов. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 440 с.

8. Милых В.И. Электрические цепи : учеб. пособ. / В.И. Милых. – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 159 с.

9. Розрахунок електричних кіл постійного та синусоїдного струмів: Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи з курсу «Електротехніка» / за ред. В. І. Мілих. – Х.: НТУ «ХПІ», 2004. – 44 с.

10. Розрахунок електричних кіл. Методичні вказівки до розрахунково-графічних робіт з курсу «Електротехніка» для студентів усіх неелектротехнічних спеціальностей / В.Г. Данько, І.В. Поляков, А.К. Черкасов; за ред. В.Г. Данька. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – 55 с.

11. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка: підручник / В. І. Мілих. – К.: Каравела, 2005. – 376 с.

12. Мілих В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін; за ред. В. І. Мілих. – К. : Каравела, 2007. – 688 с.

13. Долбня В.Т. Електроніка і мікросхемотехніка : навч. посіб. / В.Т. Долбня, Ю.Д. Сакара, Т.В. Миланіч. – Х. : НТУ "ХПІ", 2006. – 204 с.

14. Розрахунок електричних кіл. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи з курсу «Електротехніка»/ за ред. В.Г. Данька. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – 55 с.

15. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки : навч.посіб. / В.Ф. Болюх, В.Г. Данько. – Х.: ХНАДУІ, 2008. –232 с.

ЗМІСТ

1. Лабораторна робота № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 9

2. Лабораторна робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З МОСТОВОЮ СХЕМОЮ 16

3. Лабораторна робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ В РАЗІ ПОСЛІДОВНОГО З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ 21

4. Лабораторна робота №4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ В РАЗІ ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ 28

5. Лабораторна робота №5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ 34

6. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 45

Д Л Я П Р И М І Т О К