

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ**  
**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**  
**ЧАСТИНА 1**

Київ 2010

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

## **ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

### **ЧАСТИНА 1**

для студентів напрямку підготовки 6.050802 «Електронні пристрої та системи»  
спеціальностей «Електронні системи» та «Електронні прилади та пристрої»  
всіх форм навчання

*Затверджено Методичною радою НТУУ «КПІ»*

Київ 2010



## З М І С Т

<b>ВСТУП</b>	4
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ОЗНАЙОМЧЕ ЗАНЯТТЯ</b>	6
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ВИКОРИСТАННЯ ЗАКОНІВ ОМА ТА КІРХГОФА</b>	18
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. ЕКВІВАЛЕНТНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ СКЛАДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА</b>	26
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ РІВНОВАГИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ</b>	33
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАНСУ</b>	41
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ФАЗ ДЖЕРЕЛА ТА ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ</b>	49
<b>ЛІТЕРАТУРА ДЛЯ ПІДГОТОВКИ</b>	57

## **ВСТУП**

Лабораторні роботи є одним з видів занять для засвоєння дисципліни «Теорія електричних кіл». Основними завданнями лабораторних занять є: засвоєння техніки електротехнічного експерименту: навчання грамотному оформленню результатів вимірювань: практична перевірка положень, викладених у теоретичній частині курсу; придбання навичок роботи з персональним комп'ютером при дослідженні та обробці результатів експериментів.

Під час виконання лабораторних робіт студенти повинні оволодіти основами практичного використання кіл постійного та змінного струму, раціонального монтажу, вимірювання електричних величин, навчитися аналізувати властивості електричних схем при зміні їх параметрів.

Для успішного виконання лабораторних робіт до початку заняття необхідно:

- прочитати опис чергової лабораторної роботи, повторити необхідні розділи теоретичного курсу з конспекта лекцій, методичних вказівок та рекомендованої літератури, виконати необхідні попередні розрахунки, підготувати усні відповіді на контрольні запитання;

- підготувати бланк звіту, який повинен містити титульний аркуш, мету та порядок виконання роботи, схеми досліджень, таблиці для занесення експериментальних даних, результати попередніх розрахунків.

Під час лабораторної роботи студент повинен:

- одержати дозвіл викладача на виконання лабораторної роботи (за результатами тестування);

- ознайомитись з робочим місцем, вимірювальними приладами, джерелами енергії, вимикачами та ін.;

- скласти електричне коло та запросити викладача для його перевірки;

- провести необхідні виміри, результати вимірювань показати

викладачеві. Лабораторна робота вважається виконаною після того, як викладач перевірів і затвердив результати вимірювань та зробив запис у журналі реєстрації виконання лабораторних робіт;

- по закінченні роботи відключити джерела живлення, вимірювальну апаратуру та розібрати електричне коло;

- оформити та захистити звіт з лабораторної роботи та здати його викладачеві.

Звіт з лабораторної роботи складає кожен студент. Для проведення наступної роботи потрібно захистити звіт з попередньої роботи. Тільки після захисту звіту студент допускається до нової роботи. У кінці опису кожної лабораторної роботи є контрольні питання, які дають можливість студенту підготуватися до роботи.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### ОЗНАЙОМЧЕ ЗАНЯТТЯ

**МЕТА РОБОТИ:** Ознайомлення з лабораторним стендом (джерелами живлення, набірним полем, комплектуючими елементами та ін.), вимірювальними приладами.

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. За допомогою мультиметра (тестера) виміряти опір елементів 01 - 08 і отримані значення порівняти з номінальними, вказаними на корпусах. У випадку великої розбіжності (більше 10 %) з'ясувати причину.

2. Зібрати схему згідно рис.1.1.

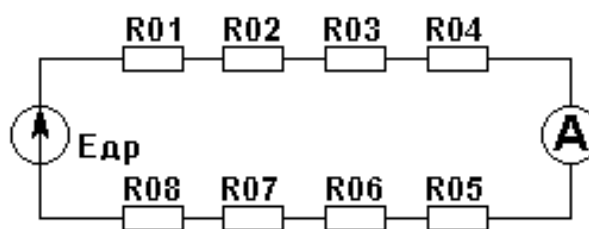


Рис. 1.1

3. Підключити схему до регульованого джерела напруги (ДР). Змінюючи вихідну напругу джерела  $E_{др}$ , встановити струм у колі 10 мА.

4. Виміряти напругу на окремих резисторах та, використовуючи закон Ома, визначити фактичні опори елементів  $R_{01} - R_{08}$  і провідності  $G_{01} - G_{08}$ . Результати звести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Елемент	$R_{01}$	$R_{02}$	$R_{03}$	$R_{04}$	$R_{05}$	$R_{06}$	$R_{07}$	$R_{08}$
$U$ , [В]								
$R$ , [Ом]								
$G$ , [См]								

5. Встановити напругу на виході регульованого джерела в межах  $E_{др} = 15 \dots 20\text{В}$ . Виміряти  $E_{PC}$  холостого ходу регульованого та нерегульованого джерел напруги  $E_{дрх.х.}$ ,  $E_{днх.х.}$  при струмі навантаження  $I_n = 0$ . Зняти та побудувати вольт-амперні характеристики регульованого та нерегульованого джерел напруги, використовуючи схему, яка наведена на рис. 1.2. У якості навантаження  $R_n$  використовувати блок змінного опору.

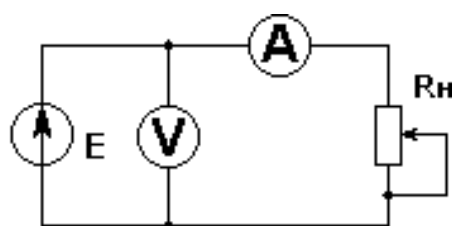


Рис. 1.2.

Результати вимірювань звести до табл. 1.2.

Таблиця. 1.2

$I_n, \text{мА}$	0									
$E_{др}, \text{В}$										
$I_n, \text{мА}$	0									
$E_{дн}, \text{В}$										

За даними табл. 1.2. обчислити внутрішній опір регульованого і нерегульованого джерел напруги в робочій точці, вказаній викладачем.

6. Зібрати з елементів № 01 - 08 на набірному полі коло, топологію якого вибрати самостійно. Схему кола спочатку накреслити на папері та узгодити з викладачем. Елементи кола встановлюються у гнізда набірного поля так, щоб їх розміщення відповідало відображеному за допомогою умовних позначень на схемі.

У кожній гілці передбачити одну або декілька перемичок для забезпечення можливості підключення амперметра.



Підключити до кола джерело  $ДР$ . Встановити напругу  $E_{др} = 10$  В. Використовуючи вимірювальну апаратуру виміряти струми у гілках та напруги поміж вузлами. Результати вимірювань занести до табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Елемент	$ДР$	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$	$R5$	$R6$	$R7$	$R8$
Струм, мА									
Напруга, В									

Правильність вимірювання струмів перевірити за першим законом Кірхгофа та оцінити для кожного вузла похибку вимірювання за формулою:

$$\delta I = \left| \sum I / I_{\max} \right| \cdot 100\%,$$

де  $I_{\max}$  - найбільший із струмів даного вузла. При  $\delta I > 5\%$  з'ясувати причину і при необхідності повторити вимірювання.

7. Зробити висновки по роботі.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Електричне коло і його елементи: джерела і приймачі електричної енергії.
2. Електрична енергія, напруга, струм, одиниці вимірювання. Позитивний напрям струмів, напруг.
3. Джерело електричної енергії: а) ідеальні джерела  $ЕРС$  і струму; б) реальні джерела  $ЕРС$  і струму.
4. Еквівалентні схеми джерел енергії.
5. Вольт-амперні характеристики джерел  $ЕРС$  і струму.
6. Опір і провідність, одиниці вимірювання.
7. Закон Ома.
8. 1-й закон Кірхгофа.
9. 2-й закон Кірхгофа.

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

**Лабораторний стенд** включає в себе пульт, набір елементів, з'єднувальні провідники і спеціальний лабораторний стіл.

**Пульт** складається із джерела енергії, електронного ключа, набірної поля і регульованих пасивних елементів. Джерело енергії і електронний ключ розміщені у лівій частині пульта в трьох об'ємних блоках, які знаходяться один під одним.

**Блок постійної напруги** має регульоване джерело стабілізованої напруги (*ДР*) 0 ... 25В, струм до 1А і джерело нерегульованої напруги (*ДН*)  $20 \pm 1,6$ В, струм до 1А. На лицевій панелі блока знаходяться (зліва направо): вихід *ДР*, тумблер і індикаторна лампа живлення, вихід *ДН*, вольтметр і амперметр, які контролюють вихідні параметри *ДР*, а, також, ручка регулювання напруги *ДР*. Обидва джерела мають пристрої електричного захисту, який вимикає джерело при перенавантаженні. При спрацьовуванні захисту засвічується сигнальна лампа. **Після усунення причин перенавантаження джерел слід натиснути кнопку “ЗАЩИТА” ДР або ДН відповідно.**

**Електронний ключ** використовується при дослідженні перехідних процесів у 2-му циклі лабораторних робіт.

**Блок змінної напруги** являє собою стабілізоване джерело, що забезпечує напругу 5 ... 25В і струм до 1А при частоті 0,1 ... 8 кГц. На лицевій панелі зліва направо розміщені: тумблер і контрольна лампа живлення, кнопка і контрольна лампа електричного захисту блока. Вмикання блока у роботу після спрацювання захисту виконується кнопкою “ЗАЩИТА”, після усунення причини перевантаження.

**Блок трифазної напруги 50Гц** являє собою трифазне джерело із незалежними фазами, напруга яких регулюється ступенево в діапазоні 0 ... 10В через 1В. Допустимий струм кожної фази 1А. На лицевій панелі блока розміщені: тумблер і сигнальна лампа контролювання вмикання блока;

тумблери і лампи контролю наявності напруг джерел фаз *A*, *B*, *C*; ручки ступеневого регулювання вихідних напруг окремих фаз; кнопки вмикання джерел фаз *A*, *B*, *C* після спрацювання захисту.

**Набірне поле**, розміщене у центрі пульта, являє собою панель із 67 пар гнізд для підключення елементів кіл, що досліджуються. Відповідні гнізда, з'єднані поміж собою електрично, утворюють вузли. Конструкція наборного поля дозволяє швидко та з мінімальною кількістю похибок зібрати електричне коло, конфігурація якого буде аналогічна принциповій схемі. Така наочність при збиранні кола грає винятково важливу роль, особливо на початковій стадії вивчення теорії електричних кіл.

На рис. 1.6. а, б наведений приклад побудови електричного кола на наборному полі (а) за його принциповою схемою (б).

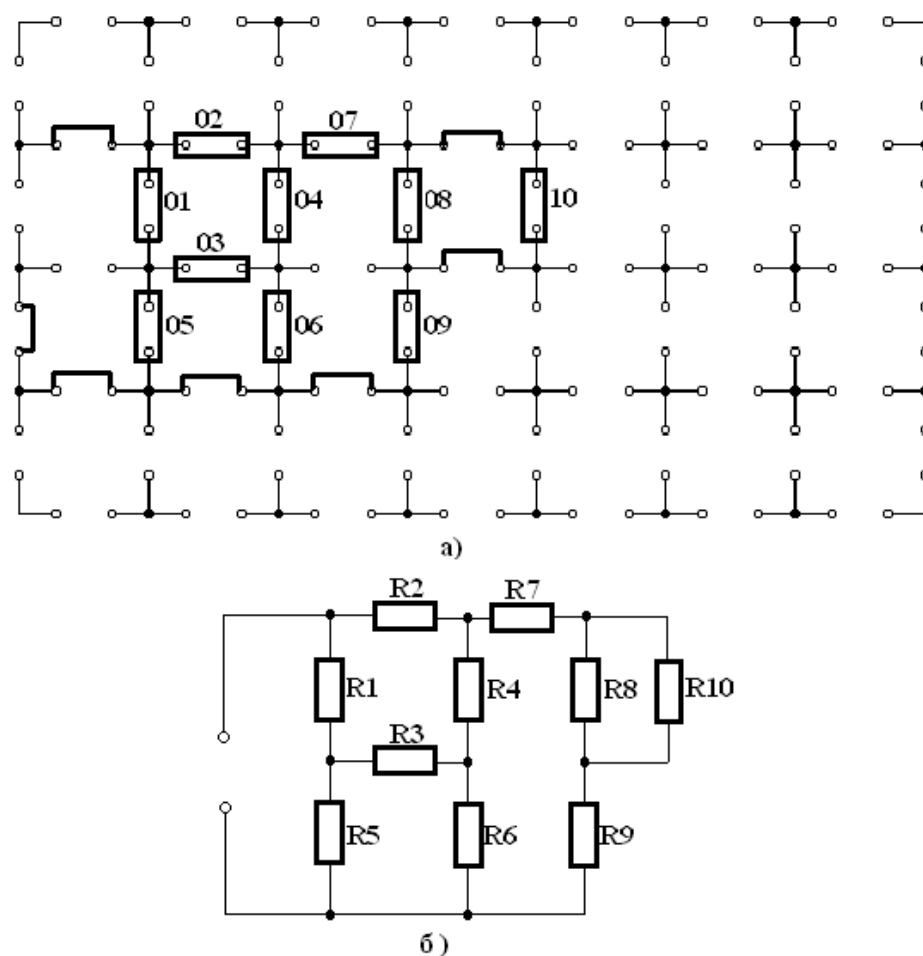


Рис. 1.6.

Справа від набірного поля знаходяться блоки пасивних елементів.

**Блок змінного опору** дозволяє змінювати опір в межах 1 – 999 Ом із ступенем регулювання 0,1 Ом. Допустима потужність розсіяння резисторів – 5 Вт.

**Блок змінної ємності** забезпечує на виході зміну ємності від 0,01 до 9,99мкФ із ступінню регулювання 0,01мкФ.

**Блок змінної індуктивності** дозволяє отримати на виході індуктивність у діапазоні від 0,1 до 99,9мГ із ступінню регулювання 0,1мГ при допустимому струмі 0,2А.

**Набір з'єднувальних проводів** призначений для підключення до набірних джерел енергії, пасивних елементів, що регулюються, вимірювальних пристроїв і т. п.

**Перемички** використовуються для з'єднання гнізд однієї пари.

**УВАГА!** Вимірювальні пристрої, які знаходяться в стенді призначені тільки для контролю роботи джерел. При виконанні експериментів використовується набір пристроїв класу не нижче 1,5. Пристрої, які живляться електроенергією змінного струму 220В, 50Гц підключаються до розеток, розміщених у заглибленні на задній стороні пульта.

## **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ**

Звіт містить титульний лист і такі розділи:

1. Мета роботи.
2. Порядок і методика виконання досліджень.
3. Принципові схеми досліджуваних кіл.
4. Графіки знятих залежностей, осцилограми струмів і напруг.
5. Формули і розрахунки.
6. Висновки по роботі.

## ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

**Електричне коло** - сукупність з'єднаних поміж собою джерел енергії та навантажень, по яких може протікати електричний струм. Електромагнітні процеси в електричному колі можна описати за допомогою понять “струм”, “напруга”, “електрорушійна сила (ЕРС)”, “опір”, “індуктивність”, “ємність”.

**Електрична схема** - графічне зображення електричного кола за допомогою умовних зображень елементів.

**Гілка електричного кола** - ділянка з послідовно з'єднаних елементів з одним і тим же струмом.

**Вузол електричного кола** - місце або точка з'єднання трьох чи більше гілок.

**Джерела електричної енергії** - це джерела струму (або напруги), як то: хімічні (гальванічні елементи, акумулятори); термоелектричні (термогенератор); фотоелектричні (сонячні батареї); атомні та ін., у яких відбувається процес перетворення хімічної, теплової, світлової, молекулярно-кінетичної, механічної та інших видів енергії в електричну.

**Приймачі електричної енергії (навантаження)** – це, наприклад, електричні лампи, електронагрівальні прилади, електродвигуни та інші пристрої, у яких електрична енергія перетворюється у світлову, теплову, механічну або інші види енергії.

**Електричний струм  $I$  у провідному середовищі** – це впорядкований рух електричних зарядів. У металах та вакуумі це переміщення електронів, а у електролітах та газах – позитивних катіонів (+) та негативних іонів (-). Струм вимірюють в амперах (А). Позитивний напрям відліку струму  $I$  співпадає з позитивним напрямом нормалі до поперечного перерізу провідника при обчисленні за формулою [1 ... 4]

$$I = \int_s \vec{\delta} d \vec{s},$$

де  $\vec{\delta}$  - густина струму;  $d\vec{s}$  - елемент площі поперечного перерізу провідника.

Позитивний напрям струму обирається довільно та позначається на схемі стрілкою. Якщо в результаті розрахунку струм має додатне значення, то його дійсний напрям співпадає з обраним позитивним напрямом. У протилежному випадку – навпаки.

**Електрична напруга  $U$**  - це скалярна величина, яка дорівнює лінійному інтегралу від напруженості електричного поля. Напруга вимірюється у вольтах (В). Позитивний напрям напруги співпадає з позитивним напрямом струму. Якщо позитивний напрям напруги на схемі обрано від точки 1 до точки 2, то напруга буде додатною, якщо потенціал точки 1 більше потенціалу точки 2:  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 > 0$ , а у протилежному випадку напруга буде від'ємною.

Таким чином,

$$U_{12} = -U_{21}.$$

Нехай через ділянку електричного кола (приймач) під дією прикладеної напруги  $U$  проходить електричний заряд  $q$ . Елементарна робота, що здійснюється при цьому (елементарна енергія, яка надходить до приймача), буде дорівнювати:

$$dw = u \cdot dq = u \cdot i \cdot dt.$$

**Миттєва потужність** – швидкість, з якою електрична енергія надходить у коло в дану мить:

$$p(t) = dw/dt = u \cdot (dq/dt) = u \cdot i.$$

Миттєва потужність величина алгебраїчна:  $p(t) > 0$ , якщо  $u(t)$  та  $i(t)$  мають однакові знаки. При цьому енергія надходить від джерела енергії до приймача. Якщо напруга та струм мають різні знаки, то  $p(t) < 0$ . При цьому енергія повертається від даної ділянки кола до джерела.

Електрична енергія, що надходить до приймача за проміжок часу від  $t_1$  до  $t_2$ , виражається наступним інтегралом:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt.$$

**Ідеальне джерело ЕРС (напруги)** – це активний елемент електричного кола з двома виводами, напруга на яких не залежить від струму, що проходить через джерело і відповідає ЕРС цього джерела. Припускається, що внутрішній опір такого джерела дорівнює нулю, а тому при проходженні через нього струму не виникає спад напруги. ЕРС  $E$  вимірюється у вольтах (В).

**Ідеальне джерело струму** - це такий активний елемент, струм якого не залежить від напруги на його виводах. Внутрішній опір такого джерела нескінченно великий. Струм  $J$ , вимірюється в амперах (А).

**Ідеальний резистивний елемент** відображає здатність реального об'єкта перетворювати електричну енергію в інші види енергії безповоротно, наприклад, у тепло. Опір  $R$ , вимірюється в омах (Ом).

Реальні джерела електричної енергії можна подати у вигляді ідеального джерела ЕРС з послідовно ввімкненим внутрішнім опором, або – у вигляді ідеального джерела струму з паралельно ввімкненим внутрішнім опором.

**Перший закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю

$$\sum I = 0.$$

У цьому рівнянні однакові знаки мають струми з однаковими позитивними напрямками відносно вузлової точки. Перший закон Кірхгофа може бути застосований не лише до вузлів, але і до довільної замкненої поверхні (перерізу).

**Другий закон Кірхгофа:** у будь-якому замкненому контурі алгебраїчна сума напруг на всіх ділянках з опорами, що ввійшли до даного контуру, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що входять до даного контуру:

$$\sum RI = \sum E.$$

У цьому рівнянні додатними приймаються струми та ЕРС, позитивні

напрями яких співпадають з довільно обраним напрямом обходу контуру, що розглядається.

Для струму ділянки електричного кола, що містить послідовно з'єднані джерела ЕРС та навантаження, при заданій різниці потенціалів на кінцях цієї ділянки справедлива формула узагальненого закону Ома:

$$I_{ab} = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum E}{R_{ab}} = \frac{U_{ab} + \sum E}{R_{ab}},$$

де  $I_{ab}$  - струм ділянки електричного кола з позитивним напрямом від точки  $a$  до точки  $b$ ;  $U_{ab}$  - різниця потенціалів або напруга між точками  $a$  та  $b$  ділянки кола;  $\sum E$  - алгебраїчна сума ЕРС, які діють на цій ділянці електричного кола, причому ЕРС, напрям дії якої співпадає з позитивним напрямом струму, береться з додатнім знаком, а в протилежному випадку - з від'ємним знаком;  $R_{ab}$  - сумарний опір ділянки електричного кола.

Якщо в результаті розрахунків отримано від'ємне значення струму, то це означає, що дійсний напрям струму не співпадає з обраним позитивним напрямом (протилежний довільно обраному позитивному напрямку).

Зовнішня характеристика джерела електроенергії являє собою залежність напруги  $U$  на вихідних затискачах від струму  $I$ , що проходить через джерело:  $U = f(I)$ . Зовнішня характеристика, є вольтамперною характеристикою (ВАХ) джерела.

Джерело, що має прямолінійну ВАХ, є лінійним. ВАХ реального лінійного джерела являє собою похилу пряму, що проходить через дві крайні точки:

при  $I = 0$ ,  $U = U_0 = E$  - це напруга холостого ходу (ЕРС джерела);

при  $U = 0$ ,  $I = I_k$  - це струм короткого замикання .

Рівняння ВАХ має вигляд

$$U = U_0 - IR_{вн} \quad \text{або} \quad I = \frac{U_0 - U}{R_{вн}},$$

де  $R_{вн} = \frac{U_0}{I_k}$  - внутрішній опір джерела енергії.



ВАХ ідеального джерела ЕРС являє собою горизонтальну пряму  $U = U_0 = E$ , а ВАХ ідеального джерела струму - вертикальну пряму  $I = I_k = J$ . Внутрішній опір ідеального джерела ЕРС дорівнює нулю  $R_{вн} = 0$ ; внутрішній опір ідеального джерела струму дорівнює нескінченності  $R_{вн} = \infty$ .

Електричне коло залежно від опору навантаження  $R_H$  може перебувати в різних режимах: холостого ходу, короткого замикання, номінальному режимі та режимі узгодженого навантаження.

**Режим холостого ходу** – режим, при якому навантаження відключене від джерела ( $R_H = \infty$ ). Струм навантаження відсутній  $I = 0$ . Напруга на вихідних затискачах джерела  $U = U_0 = E$  (напруга холостого ходу). Цю обставину використовують для виміру ЕРС джерела. Потужність, що надходить до навантаження та потужність, що виробляється джерелом,  $P_H = 0$ ,  $P_{дж} = 0$ .

**Режим короткого замикання** – режим, при якому затискачі джерела замкнуті накоротко ( $R_H = 0$ ). Струм через джерело сягає максимального значення, яке дорівнює струму короткого замикання і обмежується лише внутрішнім опором джерела  $I = I_k = \frac{U_0}{R_{вн}} = \frac{E}{R_{вн}}$ , а напруга на його затискачах  $U = 0$ . Потужність, що надходить до споживача  $P_H = 0$ . Уся енергія, що виробляється джерелом, перетворюється в тепло всередині нього

$$P_{дж} = I_k^2 R_{вн} = U_0^2 / R_{вн} = E^2 / R_{вн} = P_{вн}.$$

Це може призвести до його перегріву і пошкодженню.

**Номінальний режим** – режим при якому опір навантаження  $0 < R_H < \infty$ . В цьому режимі напруга на навантаженні

$$0 < U = IR_H < U_0 = E.$$

Струм навантаження  $I$  (струм джерела) визначається з рівняння ВАХ:

$$I = \frac{U_0 - U}{R_{вн}} = \frac{U_0}{R_H + R_{вн}} < I_k.$$

Напруга на затискачах джерела (напруга на навантаженні)

$$U = IR_{\text{вн}} = \frac{U_0 R_H}{R_H + R_{\text{вн}}} = \frac{U_0}{1 + \frac{R_{\text{вн}}}{R_H}} < U_0.$$

Енергія, що виробляється джерелом частково надходить до навантаження, а частково розсіюється у внутрішньому опорі  $R_{\text{вн}}$ .

Потужність навантаження

$$P_H = UI = I^2 R_H = \frac{U_0^2 R_H}{(R_H + R_{\text{вн}})^2}.$$

Потужність, яка розсіюється у внутрішньому опорі джерела

$$P_{\text{вн}} = I^2 R_{\text{вн}} = \frac{U_0^2 R_{\text{вн}}}{(R_H + R_{\text{вн}})^2}.$$

Потужність джерела

$$P_{\text{дж}} = P_H + P_{\text{вн}} = \frac{U_0^2 R_H}{(R_H + R_{\text{вн}})^2} + \frac{U_0^2 R_{\text{вн}}}{(R_H + R_{\text{вн}})^2} = \frac{U_0^2}{R_H + R_{\text{вн}}}.$$

Коефіцієнт корисної дії джерела:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{дж}}} = \frac{R_H}{R_H + R_{\text{вн}}}.$$

**Режим узгодженого навантаження** має місце при  $R_H = R_{\text{вн}}$ , що є умовою узгодження опору навантаження з внутрішнім опором джерела.

В цьому режимі від джерела до навантаження надходить максимальна можлива потужність

$$P_{H\text{max}} = \frac{U_0^2}{4R_{\text{вн}}},$$

а потужність джерела

$$P_{\text{дж}} = U_0 I = \frac{U_0^2}{2R_{\text{вн}}}.$$

Коефіцієнт корисної дії у режимі узгоджувального навантаження:

$$\eta = \frac{P_{H\text{max}}}{P_{\text{дж}}} = \frac{1}{2}.$$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ВИКОРИСТАННЯ ЗАКОНІВ ОМА ТА КІРХГОФА

**МЕТА РОБОТИ:** виробити навички використання законів Ома та Кірхгофа при експериментальному дослідженні електричних кіл.

#### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати електричне коло на набірному полі згідно заданого варіанту (рис. 2.1), використовуючи при цьому резистори вказані в табл. 2.1

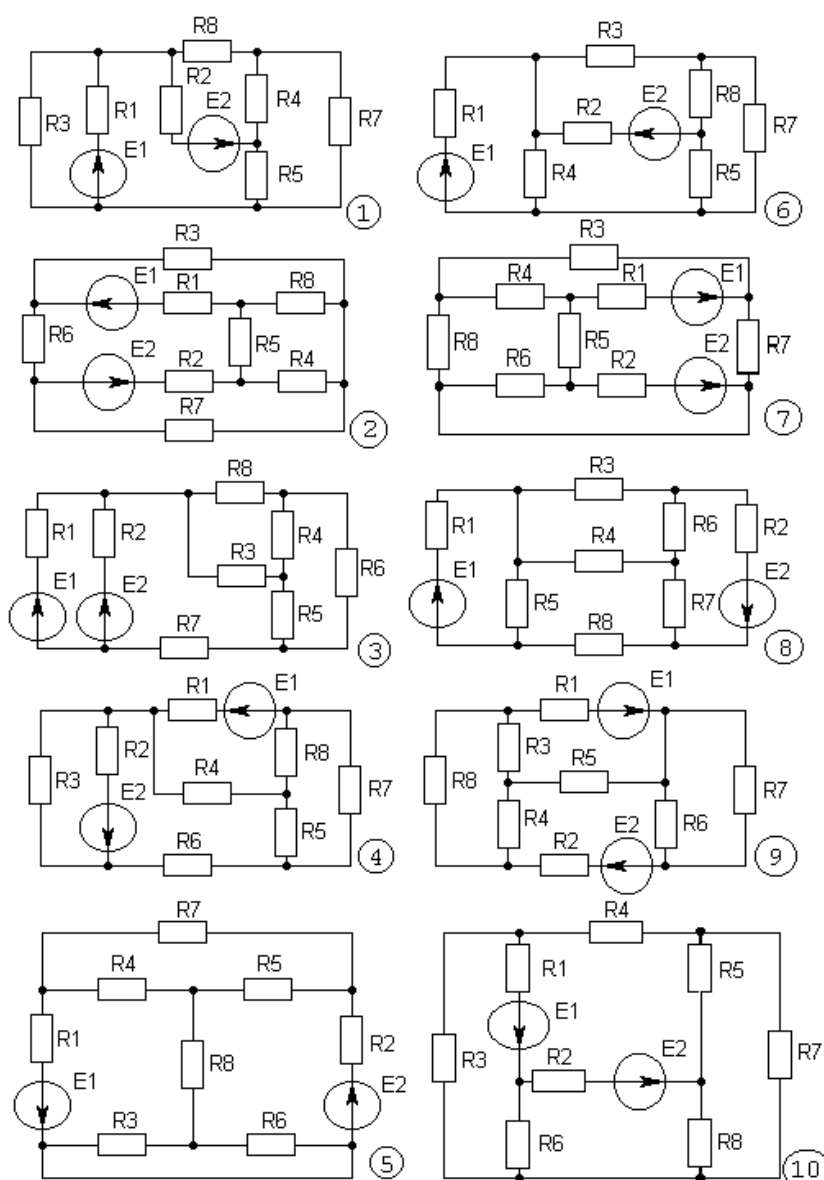


Рис. 2.1.

Таблиця 2.1

Варіант	Елементи схем								
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$E_2, В$
	Номери елементів набірною поля								
1	01	03	04	05	06	07	08	02	18
2	03	01	04	05	06	07	08	02	22
3	03	02	04	05	06	07	08	01	20
4	01	04	03	05	06	07	08	02	18
5	02	03	05	04	06	07	03	01	20
6	01	03	04	06	05	07	08	02	22
7	01	03	04	05	07	06	08	02	22
8	08	02	04	05	06	07	01	03	20
9	03	08	04	05	06	07	01	02	22
10	01	02	04	05	06	07	08	03	20

**ПРИМІТКА.** У якості джерел  $E_1$  і  $E_2$  у всіх варіантах схем застосовуються відповідно ДН і ДР.

У кожній гілці зібраної схеми передбачити одну або декілька перемичок для забезпечення можливості підключення амперметра. Вказати на схемі номінальні значення опорів резисторів.

2. Визначити кількість вузлів та гілок електричного кола. Пронумерувати вузли схеми. Заповнити табл. 2.2.

Задатись довільно розрахунковими напрямками струмів у гілках та вказати їх на схемі.

Таблиця 2.2.

Кіл-ть вузлів	Кіл-ть гілок	1 - а гілка	2 - а гілка	3 - я гілка	4 - а гілка	5 - а гілка	6 - а гілка	7 - а гілка	8 - а гілка	9 - а гілка

3. Виміряти струм у гілках. Визначити дійсний напрям струму, виходячи з технічних особливостей застосованих вимірювальних приладів та полярності їх підключення. Результати вимірювань занести до табл. 2.3. При цьому знак «+» ставиться перед результатом вимірювань, якщо розрахунковий (обраний) і

дійсний напрям струму співпадають, а знак « - » - в протилежному випадку.  
 (Знак «+» перед результатом можна опустити).

Таблиця 2.3

<b>Гілка</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Струм, мА</b>									

4. Перевірити правильність вимірювань і визначення напрямів струмів по п.3, склавши для кожного вузла схеми рівняння за першим законом Кірхгофа. Оцінити для кожного вузла похибку вимірювання:

$$\delta I = \left| \frac{\sum I}{I_{\max}} \right| \cdot 100\%,$$

де  $I_{\max}$  - найбільший із струмів даного вузла. При  $\delta I > 5\%$  з'ясувати причину і при необхідності повторити вимірювання.

5. Виміряти значення і напрям напруги на елементах кола з урахуванням обраних позитивних напрямів струмів. Результати звести до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

<b>Елемент</b>	<i>ДН</i>	<i>ДР</i>	<i>R<sub>1</sub></i>	<i>R<sub>2</sub></i>	<i>R<sub>3</sub></i>	<i>R<sub>4</sub></i>	<i>R<sub>5</sub></i>	<i>R<sub>6</sub></i>	<i>R<sub>7</sub></i>	<i>R<sub>8</sub></i>
<b>Напруга,В</b>										

6. Вибрати систему незалежних контурів. Перевірити правильність визначення значень та напрямів напруг, склавши для всіх незалежних контурів рівняння за другим законом Кірхгофа. Обчислити для кожного контуру величину похибки вимірювання напруг  $\delta U$  за формулою

$$\delta U = \left| \frac{\sum U}{U_{\max}} \right| \cdot 100\%.$$

При  $\delta U > 5\%$  з'ясувати причину і при необхідності повторити вимірювання.

7. Перевірити виконання балансу потужностей в досліджуваному колі за даними п. п. 3, 5.

**ПРИМІТКА.** При розрахунках використовувати фактичні значення опорів резисторів, отримані в лабораторній роботі №1.

8. Визначити похибку балансу:

$$\delta P = \frac{|P_{\Pi} - P_{Д}|}{(P_{\Pi} + P_{Д})/2} \times 100\%,$$

де  $P_{\Pi}$ ,  $P_{Д}$  - сума потужностей, відповідно, приймачів і джерел енергії.

Допустимим вважати значення  $\delta P \leq 5\%$ .

9. Прийняти потенціал одного із вузлів схеми таким, що дорівнює нулю. Виміряти вольтампером, з урахуванням знаку, потенціали інших вузлів одного із контурів, який містить обидва джерела ЕРС. Результати вимірювань занести до табл.2.5. Побудувати потенціальну діаграму дослідженого кола.

Таблиця 2.5

<b>Вузол</b>								
<b>Потенціал, В</b>								

10. Використовуючи дані п.3, розрахувати потенціали тих самих вузлів та нанести їх на графік потенціальної діаграми. Порівняти отримані результати.

11. Зробити висновки по роботі, звернувши увагу на можливі причини відміни значень  $\delta I$ ,  $\delta U$  та  $\delta P$  від нуля.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Схема електричного кола. Вузол, гілка, контур. Система незалежних (головних) контурів.
2. Граф схеми (топологічна схема кола), дерево графу, гілки дерева, хорди.
3. Закони Кірхгофа та їх застосування для розрахунку розгалужених кіл.
4. Закон Ома для ділянки кола з ЕРС (узагальнений закон Ома).
5. Що таке потенційна діаграма?

6. Як визначити напругу між двома вузлами електричного контуру за допомогою потенційної діаграми?
7. Що прийнято за умовно позитивні напрямки струму, ЕРС, напруги?
8. Як по заданій потенційній діаграмі скласти схему електричного кола?
9. Як по заданій потенційній діаграмі визначити струм, що протікає по ділянці кола?
10. Що таке потенціал, напруга?
11. Що спільного і яка різниця між вимірюванням потенціалу й напруги?
12. Сформулюйте принцип балансу потужностей. Як його використовують для перевірки розрахунків?

## ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

**Електричне коло** - сукупність з'єднаних поміж собою джерел енергії та навантажень, по яким може протікати електричний струм. Електромагнітні процеси в електричному колі можна описати за допомогою понять “струм”, “напруга”, “ЕРС”, “опір”, “індуктивність”, “ємність”.

**Електрична схема** - графічне зображення електричного кола за допомогою умовних зображень елементів.

**Гілка електричного кола** - ділянка з послідовно з'єднаних елементів з одним і тим же струмом.

**Вузол електричного кола** - місце або точка з'єднання трьох чи більше гілок.

**Контур** - замкнений шлях, що проходить по декількох гілках, при цьому кожен вузол у контурі, що розглядається, зустрічається не більше одного разу.

**Замкнутий контур** – замкнутий шлях вздовж електричного кола (схеми заміщення), на якому жодний елемент не повторюється.

**Система незалежних (головних) контурів** - сукупність контурів схеми, у якій кожний наступний контур має хоча би одну нову вітку.

**Перший закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю

$$\sum I = 0.$$

При цьому, якщо, наприклад, струми, які направлені до вузла, беруться додатніми, тоді струми, які направлені від вузла будуть від'ємними і навпаки. Тобто, у цьому рівнянні однакові знаки мають струми з однаковими позитивними напрямками відносно вузлової точки. Перший закон Кірхгофа може бути застосований не лише до вузлів, але і до довільної поверхні (перерізу), яка розсікає схему.

**Другий закон Кірхгофа:** у будь-якому замкненому контурі алгебраїчна сума *спадів напруг* на всіх ділянках з опорами, що ввійшли до даного контуру, дорівнює алгебраїчній сумі *ЕРС*, що входять до даного контуру:

$$\sum RI = \sum E.$$

У цьому рівнянні додатними приймаються струми та *ЕРС*, позитивні напрями яких співпадають з довільно обраним напрямом обходу контуру, що розглядається.

З наведеного рівняння також витікає інша формулювання другого закону Кірхгофа: алгебраїчна сума *напруг* уздовж будь-якого замкненого контура дорівнює нулю  $\sum U_k = 0$ , де  $U_k$  - напруга (а не спад напруги!) на  $k$  – тій ділянці замкненого контура.

Нехай електричне коло містить  $n$  вузлів та  $l$  гілок. На основі першого закону Кірхгофа можна скласти  $(n - 1)$  взаємно незалежних рівнянь. Тоді число незалежних рівнянь, які можна скласти за другим законом Кірхгофа, становить  $l - n + 1$ . Загальне число рівнянь складатиме  $(n - 1) + (l - n + 1) = l$ .

Якщо електричне коло містить джерела струму, то кількість невідомих струмів (а також і рівнянь) зменшується на кількість цих джерел. При цьому меншу кількість рівнянь потрібно скласти за другим законом Кірхгофа.

Для струму ділянки електричного кола, що містить послідовно з'єднані джерела *ЕРС* та навантаження, при заданій різниці потенціалів на кінцях цієї



ділянки справедлива формула узагальненого закону Ома:

$$I_{ab} = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \sum E}{R_{ab}} = \frac{U_{ab} + \sum E}{R_{ab}},$$

де  $I_{ab}$  - струм ділянки електричного кола з позитивним напрямом від точки  $a$  до точки  $b$ ;  $U_{ab}$  - різниця потенціалів або напруга між точками  $a$  та  $b$  ділянки кола;  $\sum E$  - алгебраїчна сума ЕРС, діючих на цій ділянці електричного кола, причому ЕРС, напрям дії якої співпадає з позитивним напрямом струму, береться з додатнім знаком, а в протилежному випадку - з від'ємним знаком;  $R_{ab}$  - сумарний опір ділянки електричного кола.

Якщо в результаті розрахунків отримано від'ємне значення струму, то це означає, що дійсний напрям струму не співпадає з обраним позитивним напрямом (протилежний довільно обраному позитивному напрямку).

**Потенційна діаграма** – це графік розподілу потенціалів уздовж будь-якої ділянки електричного кола (або замкненого контура). Потенційна діаграма будується в прямокутній системі координат. Для кола постійного струму у довільному масштабі по осі абсцис відкладаються значення опорів ділянок (кожний наступний із кінця попереднього), а по осі ординат – потенціали точок, що позначають межі ділянок, з урахуванням їх знака. Точка, що прийнята за початок відліку має нульовий потенціал і розміщується у початку координат. Точки, що відповідають потенціалам, з'єднуються між собою ламаною лінією. Потенційна діаграма, яка побудована для замкненого кола, є графічною ілюстрацією другого закону Кірхгофа. Її можна побудувати як за даними вимірювань, так і за результатами розрахунків, якщо відомі значення струмів, ЕРС та опорів.

З потенційної діаграми можна визначити напругу між будь-якими двома точками як різницю ординат цих точок. Тангенс куту нахилу відрізка ламаної лінії, що відповідає ділянці з опором, до осі абсцис, пропорційний струму на цій ділянці.

**Баланс потужностей** – у електричному колі алгебраїчна сума

потужностей джерел енергії дорівнює сумі потужностей навантажень.

При протіканні струмів по резистивним елементам в останніх виділяється тепло. Згідно з законом збереження енергії кількість енергії, що виділяється за одиницю часу в резистивних елементах у вигляді теплоти, повинна дорівнювати кількості енергії, що віддається в коло джерелами енергії за той самий час.

Якщо фактичний напрямок струму, що протікає через джерело  $EPC$ , збігається з напрямком джерела, джерело віддає в одиницю часу енергію (потужність), що дорівнює  $EI$ . Якщо ж фактичний напрямок струму джерела зустрічний напрямку  $EPC$ , то джерело споживає енергію (наприклад, при зарядці акумулятора).

Якщо в колі є джерела струму, при складанні енергетичного балансу необхідно врахувати енергію, що віддається джерелами струму.

Нехай джерело струму  $J$  спрямоване від вузла  $b$  до вузла  $a$ . Тоді, енергія, яку джерело струму віддає в одиницю часу в електричне коло, дорівнює

$$JU_{ab} = JU_J,$$

де  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U_J$  - різниця потенціалів між вузлами  $a$  і  $b$ , до яких під'єднане джерело струму.

Загальний вигляд рівняння енергетичного балансу електричного кола

$$\sum I^2 R = \sum EI + \sum J_k U_{J_k},$$

де  $k$  – кількість джерел струму.

Баланс потужностей використовується для перевірки вірності розрахунків. Похибка балансу потужностей визначається за формулою:

$$\delta P = \frac{|P_H - P_D|}{(P_H + P_D)/2} \times 100\%,$$

де  $P_D$  - потужність джерел енергії;  $P_H$  - потужність навантажень.

Допустимою величиною  $\delta P$  при розрахунках прийнято величину  $\delta P < 0,5\%$ , а при проведенні експериментальних досліджень  $\delta P < 5\%$ .

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

## ЕКВІВАЛЕНТНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ СКЛАДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

**МЕТА РОБОТИ:** вивчити еквівалентні перетворення паралельних активних гілок і схем з'єднання пасивних елементів трьохпроменевою зіркою та трикутником. Виробити навички застосування еквівалентних перетворень для спрощення розрахунків розгалужених електричних кіл.

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати електричне коло (рис. 3.1) згідно варіанту завдання (табл. 3.1) на набірному полі.

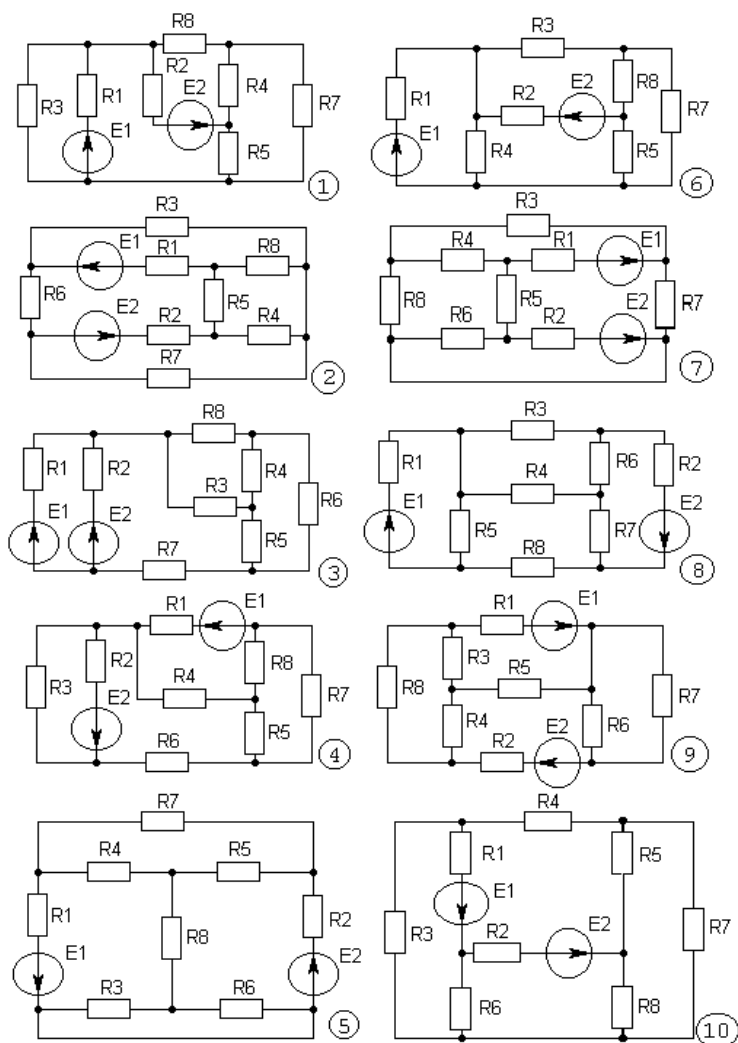


Рис. 3.1.

Таблиця 3.1

Варіант	Елементи схем									
	$E_1$	$E_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$
1	ЕДН#	23	01#	02	05#	06	03	07	08	04
2	12	ЕДН#	01	02#	06	07	04	05	03	08
3	ЕДН#	15	01#	02	03	05	05	04	08	07
4	18	ЕДН#	01	02#	03#	06	05	04	07	08
5	15	ЕДН#	01	02#	03	04	05	06	07	08
6	ЕДН#	18	02#	01	03	05#	06	07	04	08
7	ЕДН#	15	01#	02	03	06	05	04	07	08
8	15	ЕДН#	01	02#	06	04	08	05	07#	03#
9	18	ЕДН#	01	03#	02	04	05	06#	08#	07
10	ЕДН#	15	01#	02	06	04	05#	03	07	08

*Примітка. Елементи, позначені знаком «#», в еквівалентних перетвореннях участі не беруть.*

2. Виміряти напругу та струм усіх елементів кола. Отримані дані занести до табл.3.2.

Таблиця 3.2

Елементи схем	$E_1$	$E_2$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$
$U, В$										
$I, мА$										
$P, Вт$										
$R, Ом$										

3. За даними п.2 обчислити потужність всіх елементів кола і фактичний опір резисторів і занести їх до табл. 3.2.

Оцінити виконання балансу потужності за формулою

$$\delta P = \frac{|P_H - P_D|}{(P_H + P_D)/2} \times 100\%,$$

де  $P_H, P_D$  - потужність навантаження та потужність джерел.

Якщо  $\delta P > 5\%$  з'ясувати причину і при необхідності повторити вимірювання.

4. Накреслити ділянки кола, які повинні бути замінені для перетворення початкового кола у коло, що містить не більше 2-ох вузлів та контурів. При цьому спочатку слід перетворити з'єднання «трикутник» у «зірку» (або навпаки), а потім замінити еквівалентними паралельні гілки. Накреслити схеми еквівалентних кіл, отриманих після кожного етапу перетворення, і показати їх викладачу. Відобразити перетворені схеми на набірному полі.

5. Обчислити параметри еквівалентного з'єднання «зірка» («трикутник») та паралельного з'єднання гілок. Встановити, контролюючи мультиметром, опір змінних резисторів такими, що дорівнюють обчисленим.

6. Зібрати коло, отримане після перетворення по п.п.4, 5 і виміряти струм і напругу на всіх елементах. Результати занести до табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Елементи перетвореної схеми										
$U, В$										
$I, мА$										
$P, Вт$										
$R, Ом$										

7. Обчислити потужність і фактичні опори елементів перетворень кола і оцінити виконання балансу потужності аналогічно п.3.

8. Перетворити схему по п.6, замінивши паралельні гілки еквівалентними. Зібрати отримане коло, використовуючи в якості еквівалентного резистора у вітці з еквівалентним джерелом напруги блок змінного опору. Виміряти струм і напругу елементів кола і результати занести в табл. 3.4.

9. Обчислити потужність і фактичний опір елементів кола за даними п.8 та оцінити виконання балансу потужності.

10. Порівняти данні табл. 3.2 – 3.4 та зробити висновки по роботі, звернувши увагу на виконання умов еквівалентності при перетвореннях.

Таблиця 3.4

Елементи перетвореної схеми										
$U, В$										
$I, мА$										
$P, Вт$										
$R, Ом$										

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Послідовне з'єднання опорів. Подільник напруги.
2. Паралельне з'єднання опорів. Подільник струму.
3. Еквівалентні перетворення при змішаному з'єднанні елементів.
4. Перетворення трикутник-зірка, зірка-трикутник.
5. Еквівалентні перетворення послідовно з'єднаних джерел *ЕРС*.
6. Еквівалентні перетворення паралельно з'єднаних джерел *ЕРС* та струму.
7. Перенесення джерел *ЕРС* та струму в електричних колах.
8. Еквівалентні перетворення симетричних схем.

### ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У всіх випадках заміни заданих електричних кіл еквівалентними колами іншого виду потрібно виконувати умови незмінності струмів та напруг ділянок кола, яких не торкалися перетворення.

При послідовному з'єднанні елементів сумарний опір ділянки кола визначається сумою опорів окремих резисторів

$$R = \sum_{i=1}^n R_i .$$

Напруга на кожному окремому резисторі

$$U_i = U \frac{R_i}{R},$$

де  $U$  - напруга на ділянці кола з послідовним з'єднанням елементів. У окремому випадку, коли послідовно з'єднані два елементи  $R_1$  та  $R_2$  (подільник напруги) будемо мати:

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

При паралельному з'єднанні елементів для еквівалентної заміни потрібно знайти суму провідностей:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n G_i},$$

де  $G_i = \frac{1}{R_i}$  - провідність  $i$ -ї паралельної гілки.

Якщо паралельно з'єднані два елементи  $R_1, R_2$ , еквівалентний опір

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Для знаходження струмів при паралельному з'єднанні двох елементів  $R_1$  та  $R_2$  використовують формулу «чужого опору» (подільника струму)

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

де  $I$  - сумарний (вхідний) струм двох паралельно з'єднаних елементів кола.

При змішаному (послідовно - паралельному) з'єднанні елементів перетворення виконують поетапно, спрощуючи схему. При цьому ділянки з послідовним або паралельним з'єднанням елементів замінюють еквівалентними елементами за розглянутими вище правилами.

Перетворення трикутника з опорами сторін  $R_{12}, R_{23}, R_{31}$  в еквівалентну зірку проводиться згідно з формулами

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R}; R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R}; R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{R},$$

де  $R = R_{12} + R_{23} + R_{31}$ .

Перехід від трьохпроменевої зірки до трикутника

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}; R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1}; R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1R_3}{R_2}.$$

При послідовному з'єднанні джерел напруги (або паралельному з'єднанні джерел струму) еквівалентне джерело напруги (струму) визначається алгебраїчною сумою джерел *EPC* (струму).

Паралельне з'єднання гілок з джерелами *EPC* та джерелами струму також можна замінити одним еквівалентним джерелом *EPC* з внутрішнім опором  $R_{вн}$  згідно з формулами

$$E_E = \frac{\sum_{i=1}^m E_i G_i + \sum_{j=1}^k J_j}{\sum_{s=1}^n G_s}; R_{вн} = \frac{1}{\sum_{s=1}^n G_s},$$

де  $G_i$  - провідність  $i$ -ї паралельної гілки з джерелами *EPC*;  $J_j$  - струм  $j$ -ї гілки з джерелами струму;  $\sum_{s=1}^n G_s$  - сумарна провідність паралельних гілок (за винятком гілок з джерелами струму).

При знаходженні еквівалентної *EPC*  $E_E$  потрібно враховувати напрями дії окремих джерел *EPC* та струму. Якщо ці напрями співпадають з обраним напрямом дії еквівалентного джерела, то відповідні члени суми будуть додатніми, а в протилежному випадку - від'ємними.

Джерело *EPC* можна перенести з якої-небудь гілки схеми до всіх інших гілок, з'єднаних з вузлом даної гілки. При цьому, якщо у даній гілці джерело *EPC* було направлене до вузла, то у гілках, до яких воно переноситься, воно буде направлене від вузла та навпаки.



Джерело струму може бути замінено джерелами струму, які підключаються паралельно до всіх гілок, що утворювали контур з даним джерелом струму.

Симетричним називають електричне коло, що має вісь симетрії. В симетричних схемах легко виділити вузли з однаковими потенціалами (вони симетрично розташовані відносно вісі симетрії). У гілках, з'єднаних з такими вузлами, струми дорівнюють нулю, тому їх можна розмикати. При цьому струми у інших гілках не змінюються. Вузли з однаковими потенціалами можна об'єднати, що також може суттєво спростити схему.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

## ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОНІВ РІВНОВАГИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

**МЕТА РОБОТИ:** виробити навички використання законів Кірхгофа при експериментальному аналізі кіл однофазного синусоїдального струму.

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати схему згідно рис.4.1.

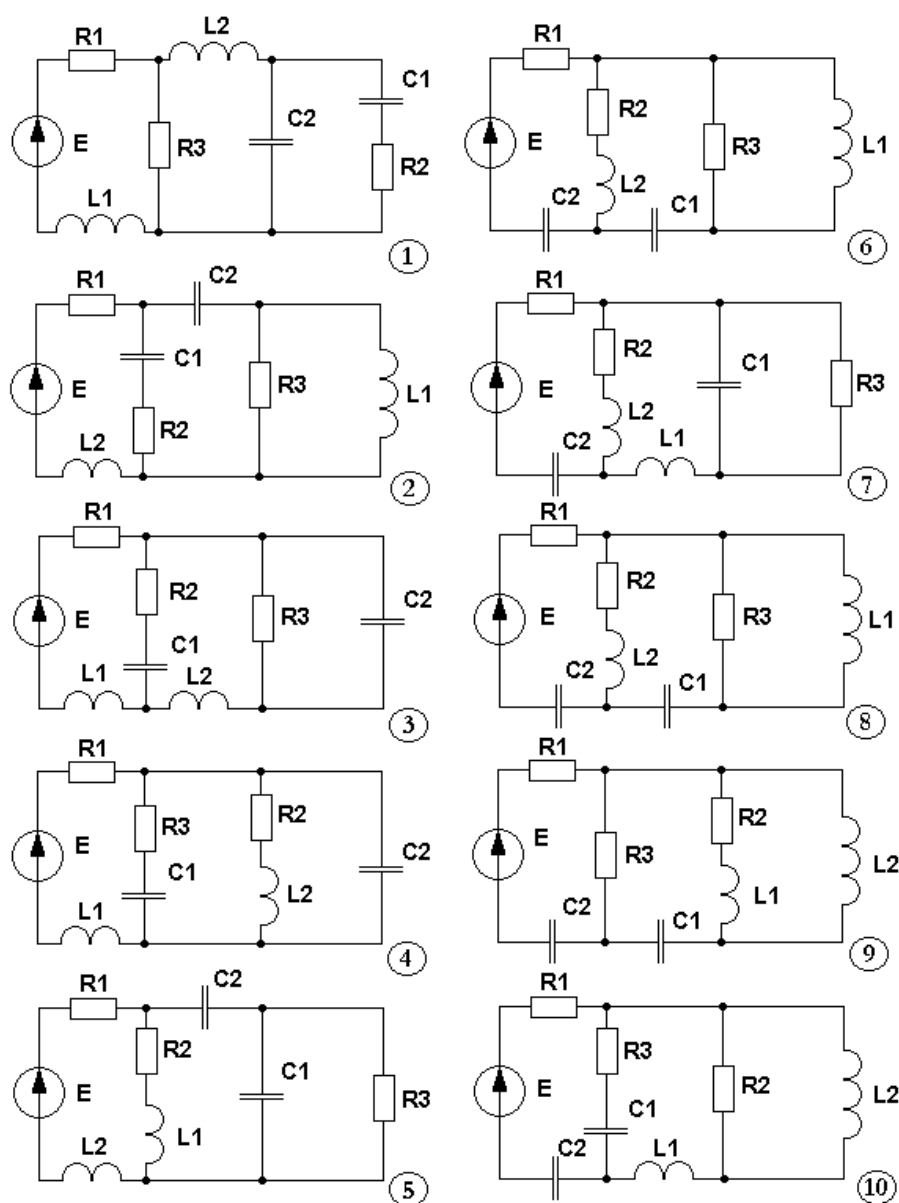


Рис. 4.1.

2. Виміряти на заданій частоті параметри елементів, що використовуються (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Варіант	Елементи схеми							Параметри джерела		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$C_1$	$C_2$	$E, \text{ В}$	$f, \text{ кГц}$	$\psi_e, \text{ }^\circ$
	Номер елемента набірною поля									
1	01	02	03	20	22	19	15	20	3,0	30
2	01	03	02	21	22	19	15	19	2,0	45
3	02	01	03	20	21	19	15	18	3,0	- 90
4	02	01	03	21	22	19	15	20	2,0	90
5	01	02	03	20	21	15	19	19	2,5	- 30
6	01	03	02	20	21	19	15	18	3,0	60
7	01	02	03	20	22	15	19	20	2,5	- 60
8	01	03	02	21	22	15	19	18	2,0	120
9	02	01	03	20	22	15	19	19	2,5	- 45
10	02	01	03	21	22	15	19	20	2,0	30

Для вимірювання використовувати схему (рис. 4.2).

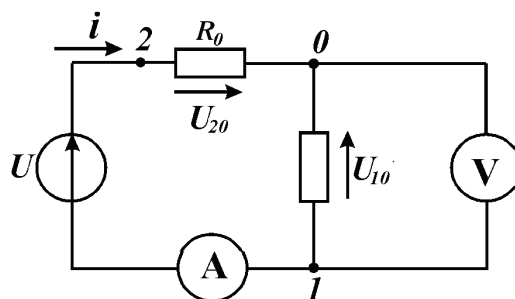


Рис.4.2.

Резистор  $R_0$  потрібен для створення опорної напруги  $U_{20}$ , пропорційної струму. У якості  $R_0$  використовувати блок змінного опору, виставивши  $R_0 = 50 \dots 100 \text{ Ом}$ . Перед початком вимірювань встановити мінімальне значення напруги джерела, а потім підняти його до значення  $U = 8 \dots 12 \text{ В}$ . При цьому струм у колі повинен бути у діапазоні  $0,05 \dots 0,25 \text{ А}$ .

Для визначення кутів зсуву фаз  $\varphi$  між напругою та струмом досліджуваних елементів, виміряти зсув по фазі напруги  $U_{20}$  відносно напруги  $U_{10}$ . Обчислити по ним параметри елементів. Результати занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Елементи	$U, В$	$I, мА$	$\varphi, ^\circ$	$Z, Ом$	$R, Ом$	$X, Ом$	$L, мГн$	$C, мкФ$
$R_1$			0	-		-	-	-
$R_2$			0	-		-	-	-
$R_3$			0	-		-	-	-
$L_1$								
$L_2$								
$C_1$								
$C_2$								

2. Зобразити схему досліджуваного кола. Задатись позитивними напрямками струмів у гілках і вказати їх на схемі.

3. Виміряти значення струмів у всіх гілках кола. Приймавши початкову фазу джерела  $EPC$  ( $\psi$ ) заданій у табл.4.1, визначити початкові фази струмів у гілках з резисторами. Для цього послідовно виміряти зсуви по фазі напруг резисторів відносно напруги джерела  $EPC$ . Результати вимірів струмів та зсувів по фазі, а також аргументів комплексів струмів гілок, що містять резистори, звести у табл. 4.3. Кількість рядків табл. 4.3 відповідає кількості гілок досліджуваного кола.

Таблиця 4.3.

Комплекс и струмів	Модуль, мА	Покази фазометра, $^\circ$	Аргумент, $^\circ$	Примітка
$\dot{I}_1$				Початкова фаза $EPC$ джерела ... $^\circ$
$\dot{I}_2$				
$\dot{I}_3$				
$\dot{I}_4$				
$\dot{I}_5$				

4. За комплексами струмів одного з вузлів обчислити комплекс струму гілки, що не має резистора. Модуль цього комплексу порівняти з діючим значенням струму, виміряним в п.3. При значних розбіжностях (більш 10%) повторити п.3, або скоректувати розрахунок. За даними табл. 4.3 побудувати

векторну діаграму струмів для одного з вузлів.

5. Виміряти діючі значення та зсуви по фазі напруг на всіх елементах досліджуваного кола. Обчислити початкові фази напруг з урахуванням початкової фази *EPC* джерела. Результати обчислень і вимірювань занести до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Комплекс напруги, що визначається	Модуль, В	Напруга, відносно якої вимірюється зсув фаз	Покази фазометра, ...°	Збіг взаємних напрямів напруг кола і на фазометрі	Аргумент комплексу напруги, ...°
				так (ні)	

6. За даними п.5 побудувати топографічну діаграму для зовнішнього контуру кола. Діаграму використати для оцінки правильності проведених вимірювань. При значних розходженнях встановити причину і після консультації з викладачем повторити вимірювання або обчислення.

7. За комплексами струмів і напруг обчислити комплекси повної потужності, активну і реактивну потужності кожного із пасивних елементів кола. Результати обчислень занести до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Елементи схеми	Комплекс напруг $\dot{U}$ , В	Спряжені комплекси струму $\dot{I}$ , А	Комплекс повної потужності $\dot{S}$ , ВА	Активна потужність $P$ , Вт	Реактивна потужність $Q$ , ВАр

8. Оцінити виконання балансу потужності для активних і реактивних складових. Сумарне значення відповідних потужностей, а також потужність, що генерується джерелом, звести до табл. 4.6.

9. Оцінити правильність виконаних вимірювань і обчислень.

Таблиця 4.6

Джерело ЕРС					Пасивна частина кола	
$\dot{E}$ , В	$\dot{I}_1$ , А	$S$ , ВА	$P$ , Вт	$Q$ , ВАр	$P$ , Вт	$Q$ , ВАр

10. Зробити висновки по роботі, звернувши увагу на оцінку способів вимірювань початкових фаз струмів і напруг, а також на особливості використання законів рівноваги для кола гармонічного струму.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Синусоїдальний струм і основні величини, що його характеризують.
2. Амплітудне, середнє та діюче значення синусоїдального струму і напруги.
3. Активний, реактивний та повний комплексний опір кола.
4. Подання синусоїдальних функцій векторами і комплексними числами.
5. Синусоїдальний струм в активному опорі.
6. Синусоїдальний струм в індуктивності.
7. Синусоїдальний струм у ємності.
8. Еквівалентні параметри пасивного двополюсника та їх експериментальне визначення.
9. Закони Ома і Кірхгофа у комплексній формі.
10. Миттєва, активна, реактивна, повна та комплексна потужність.
11. Топографічні і векторні діаграми, їх використання для обчислення кіл синусоїдального струму.
12. Послідовне і паралельне з'єднання  $R$ ,  $L$ ,  $C$  - елементів. Трикутники напруг, струмів, опорів, провідностей, потужностей.
13. Баланс потужностей у колах синусоїдального струму. Вимірювання потужності ватметром.

## ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ТЕРМІНИ

**Синусоїдальний струм** - це струм, який змінюється за часом по синусоїдальному закону  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin(2\pi t / T + \psi_i)$  (рис. 4.3).

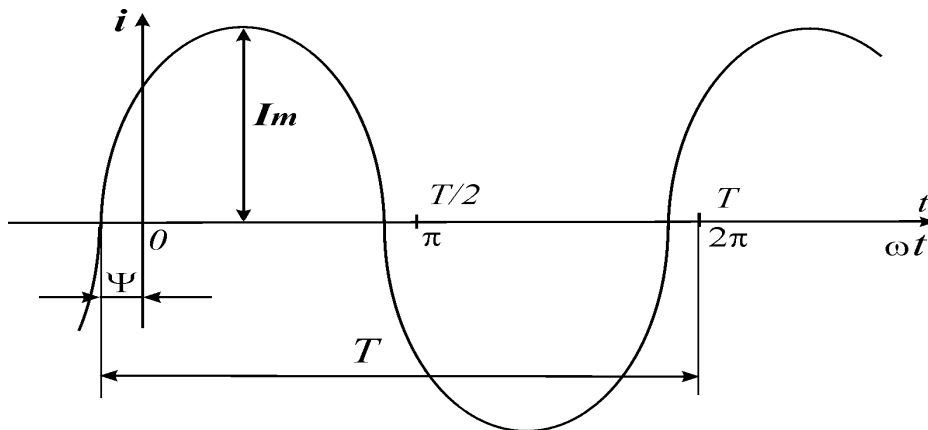


Рис. 4.3

Будь-яка синусоїдальна функція визначається трьома величинами: амплітудою, кутовою частотою та початковою фазою  $\psi_i$ .

**Амплітуда** - максимальне значення функції називають. Амплітуду позначають  $I_m$ .

**Період  $T$**  - це час, за який здійснюється одне повне коливання.

**Частота** - число коливань за 1 сек.  $f = 1/T$ .

**Кутова частота  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$** . Частоту вимірюють в герцах (Гц), а кутову частоту в рад/с або  $s^{-1}$ .

**Фаза** - аргумент синусу ( $\omega t + \psi_i$ ). Фаза характеризує стан коливання (числове значення) у даний момент часу.

**Середнє значення синусоїдального струму** - середнє значення за півперіод

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,638 \cdot I_m.$$

### Діюче значення синусоїдального струму

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m.$$

При розрахунках та вимірюваннях прийнято використовувати діючі значення синусоїдних величин

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

При розрахунках електричних кіл синусоїдального струму треба брати до уваги не тільки амплітудні (діючі) значення електричних величин, але й їх початкові фази. Це зручно робити за допомогою так званих комплексів амплітуд (діючих значень)

$$\dot{E}_m = E_m e^{j\psi_e}; \dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}; \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i};$$

$$\text{або } \dot{E} = E e^{j\psi_e}; \dot{U} = U e^{j\psi_u}; \dot{I} = I e^{j\psi_i}.$$

Звідси випливає поняття комплексного опору (імпедансу)

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z e^{j\varphi} = R + j(X_L - X_C) = R + jX,$$

де  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  - модуль комплексного опору;  $R$  - активний опір;  $X = X_L - X_C$  - реактивний опір;  $X_L = \omega L$ ;  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  - індуктивна та ємнісна складова реактивного опору;  $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$  - фазовий зсув між напругою та струмом на ділянці, де визначається повний опір.

Діюче значення синусоїдального струму чисельно дорівнює значенню такого постійного струму, який за один період синусоїдального струму, виділяє стільки тепла, що і синусоїдальний струм.

При визначенні початкових фаз струмів та напруг потрібно враховувати особливості вимірювальних приладів, що використовуються. Конструктивно ці прилади, як правило, виготовлені так, що входи мають загальний



потенціальний вузол. Тому при вимірюваннях потрібно враховувати співпадають чи ні напрями напруг у колі  $U_{AB}$  та  $U_{BC}$ , кут зсуву фаз яких вимірює прилад, з напрямками напруг  $U_1$  та  $U_2$  (рис. 4.4, а). Так, наприклад, покази  $\alpha$  приладу, підключеного згідно з рис.4.4а, відповідають зсуву по фазі напруги  $U_2 = -U_{BC}$  відносно напруги  $U_1 = U_{AB}$  (векторна діаграма наведена на рис.4.4, б). Тоді початкова фаза напруги  $U_{BC}$

$$\psi_{BC} = \varphi_{AB} + \alpha + \pi.$$

Значення  $\alpha$  можуть бути додатніми або від'ємними (як на діаграмі рис. 4.4, б). Якщо взаємні напрями напруг у колі та на приладі співпадають, то корекція значення кута зсуву на величину  $\pi$  непотрібна.

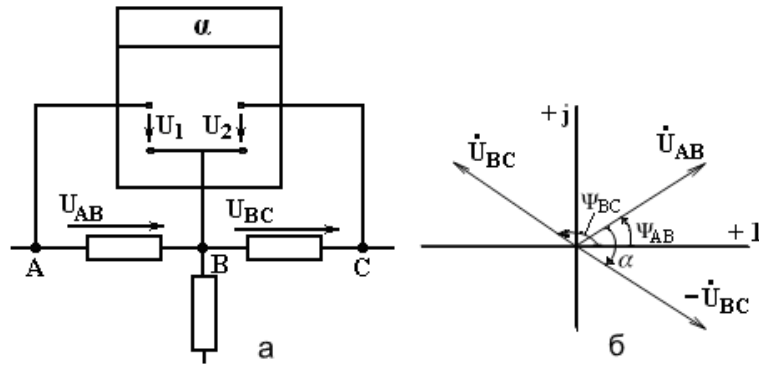


Рис. 4.4.

Початкові фази струмів та напруг визначаються відносно заданої величини. У лабораторній роботі такою величиною служить *ЕРС* джерела, значення та початкова фаза якого задані у вихідних даних (табл. 4.1).

Для визначення початкових фаз напруг елементів кола, що не мають загального вузла з джерелом *ЕРС*, потрібно спочатку виміряти зсув фаз відносно напруг з відомими початковими фазами. Так, для схеми (рис. 4.5) спочатку визначають  $\psi_1$  по відомому  $\psi$ , а потім  $\psi_2$  по  $\psi_1$ .

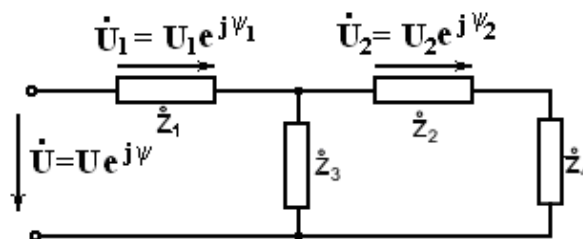


Рис. 4.5.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАНСУ

**МЕТА РОБОТИ:** вивчити резонансні явища при послідовному з'єднанні котушки та конденсатора.

#### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати послідовний коливальний контур (рис. 5.1). В ролі котушки та конденсатора використовувати блоки змінних індуктивностей та ємностей. Встановити номінальні значення параметрів згідно варіанту завдання (табл. 5.1).

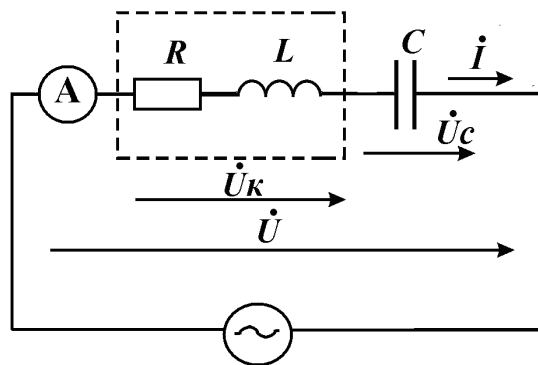


Рис. 5.1.

Таблиця 5.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L$ , мГ	30	30	30	40	40	50	50	60	60	60	70	70
$C$ , мкФ	0,25	0,1	0,13	0,1	0,2	0,15	0,06	0,11	0,06	0,05	0,1	0,05
$U$ , В	10	5	7	6	10	8	6	7	6	5	7	5

2. З'єднати контур з джерелом змінної напруги синусоїдальної форми. Змінюючи частоту вхідної напруги в діапазоні, згідно з попереднім розрахунком, експериментально визначити значення резонансної частоти контура  $f_0$  за найбільшим значенням струму в колі. При зміні частоти напругу на контурі підтримувати незмінною. Результати вимірювань звести до табл.5.2.

Таблиця 5.2

$f_0$ , кГц	$U$ , В	$I_0$ , мА	$U_{K0}$ , В	$U_{C0}$ , В	$R$ , Ом	$L$ , мГ	$C$ , мкФ	$\rho$ , Ом	$Q$	$d$

*Зауваження: Індексом «0» позначені значення на резонансній частоті.*

3. За даними п.2 обчислити фактичні параметри контуру  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , а також характеристичний опір, добротність та загасання. При розбіжності фактичних значень  $L$  та  $C$  (табл.5.2) і номінальних (табл.5.1) більш ніж на 10% повторити вимірювання чи розрахунок.

4. Підтримуючи незмінною вхідну напругу контуру, виміряти струм  $I$ , напругу котушки  $U_K$ , конденсатора  $U_C$  та зсув фаз між вхідною напругою та струмом контура для 8 ... 12 значень відносних частот  $f/f_0$ , що лежать в діапазоні 0,5 ... 1,5. При вимірюванні зсуву фаз в якості опорної напруги, пропорційної струму контура  $I$ , використати спад напруги на внутрішньому опорі амперметра. Результати вимірювань звести в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

№ з/п	$f/f_0$	$f$ , кГц	$I$ , мА	$U_C$ , В	$U_K$ , В	$\varphi$ , ° експер.	$\varphi$ , ° розрах.	$Z$ , Ом
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

5. Розрахувати зсув фаз між вхідною напругою і струмом контура за формулою

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{U_K^2 - (RI)^2} - U_C}{RI}$$

6. Результати розрахунків занести до табл. 5.3 і порівняти з експериментально отриманими значеннями.

7. За даними табл. 5.3 побудувати графік частотних характеристик:  $I(f/f_0)$ ,  $U_C(f/f_0)$ ,  $U_K(f/f_0)$ ,  $\varphi(f/f_0)$ ,  $Z(f/f_0)$ .

8. Ввімкнути послідовно з котушкою і конденсатором блок змінних опорів. Розрахувати значення додаткового опору за формулою  $R_0 = (\rho/Q) - R$ , при якому  $Q = 10$ , і встановити його на блоці змінних опорів. Виміряти значення струму у колі при зміні відносної частоти  $f/f_0$  у діапазоні 0,5 ... 1,5. Результати занести до табл.5.4. Повторити експеримент для значень  $Q = 5$  і  $Q = 2,5$ .

Таблиця 5.4

№ з/п	$f/f_0$	$f, \text{Гц}$	$Q = 2,5$		$Q = 5$		$Q = 10$	
			$I, \text{А}$	$I/I_0$	$I, \text{А}$	$I/I_0$	$I, \text{А}$	$I/I_0$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

9. За даними табл. 5.3 і табл. 5. 4 побудувати ряд характеристик  $I/I_0(f/f_0)$  при різних значеннях добротності  $Q$ . З графіків визначити смугу пропускання контура  $f_2 - f_1$ . Дані звести до табл. 5.5. В останню строку табл. 5.5 занести результати обробки даних п. 5 для контуру без додаткового опору. Порівняти отримані результати.

10. Зробити висновки по роботі, звернувши увагу на вплив добротності контуру на частотні характеристики та смугу пропускання.

Таблиця 5.5.

$Q$	$f_1$ ,	$f_2$ ,	$f_2 - f_1$ , за даними п. 8	$f_2 - f_1$ , за формулою $f_2 - f_1 = f_0/Q$
2,5				
5				
10				
...				

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Умова виникнення резонансу в електричних колах.
2. Послідовний коливальний контур. Резонанс напруги.
3. Паралельний коливальний контур. Резонанс струму.
4. Резонансна частота, хвильовий (характеристичний) опір контуру, добротність, коефіцієнт загасання, смуга пропускання.
5. Частотні характеристики послідовного і паралельного контурів.
6. Резонанс в складних електричних колах.

### ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Резонанс** - це такий режим у пасивному електричному колі, що містить індуктивності та ємності, при якому реактивний опір або реактивна провідність кола дорівнюють нулю. По відношенню до зовнішнього кола в режимі резонансу двополіусник поводить себе як чисто активний опір, а тому струм та напруга на вході двополіусника співпадають по фазі. При цьому дорівнює нулю і реактивна потужність на входних затискачах кола.

**Резонанс напруги** має місце в електричному колі з послідовним з'єднанням індуктивностей та ємностей (послідовний коливальний контур).

У режимі резонансу напруга на індуктивному та ємнісному елементах може значно перевершувати загальну напругу.

**Резонанс струмів** має місце в електричному колі з паралельним з'єднанням індуктивних та ємнісних гілок (паралельний коливальний контур).

**Резонансні частоти** - частоти, при яких спостерігається явище резонансу.

Для послідовного резонансного контуру комплексний опір дорівнює

$$\dot{z} = R + j(\omega L - 1/\omega C).$$

**Умова виникнення резонансу** -  $(\omega L - 1/\omega C) = 0$ . При цьому резонансна частота дорівнює:  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ .

Реактивні опори індуктивності та ємності на резонансній частоті дорівнюють:

$$x_{L0} = \omega_0 L = \sqrt{L/C} = \rho; \quad x_{C0} = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C} = \rho,$$

де  $\rho$  - хвильовий опір.

На резонансній частоті  $\omega_0$  опір кола мінімальний  $Z_0 = R$ , а струм контуру досягає свого максимального значення  $I_0 = U/R$ .

**Добротність контура** або коефіцієнт резонансу - співвідношення напруги на ємнісному елементі або рівної їй напруги на індуктивному елементі до загальної напруги на контурі

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \rho/R.$$

Добротність показує у скільки разів напруга на індуктивності (ємності) перевищує напругу на вході контуру при резонансі, тобто

$$U_{L0} = U_{C0} = QU.$$

**Загасання** - величина обернена до добротності.

$$d = 1/Q.$$

**Смуга пропускання (прозорості) резонансного контуру** - смуга частот поблизу резонансу, в межах якої струм зменшується до рівня  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$  від

резонансного значення  $I_0$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{1}{Q} = d$$

Чим вище добротність контуру, тим вужче його смуга пропускання. Внутрішній опір джерела напруги додається до активного опору контуру  $R$  і також впливає на добротність та смугу пропускання контуру. Для підвищення вибірних властивостей контуру (зменшення смуги пропускання) послідовного контуру потрібне джерело напруги з малим внутрішнім опором.

**Паралельний коливальний контур** - коло з двома паралельно з'єднаними індуктивною та ємнісною гілками (рис. 5.2). Резонанс у такому колі настає, коли вхідна реактивна провідність контура дорівнює нулю. Тому

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1/\omega C}{R_2^2 + 1/\omega^2 C^2} \quad (5.1)$$

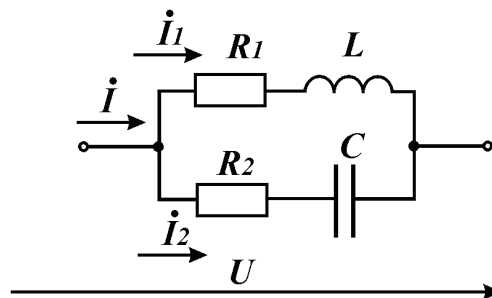


Рис. 5.2.

Змінюючи одну з величин ( $\omega$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ) при незмінних інших параметрах кола можна досягти виконання цієї умови. Якщо значення змінної величини при її визначенні із наведеної умови буде комплексним, то це означає, що резонанс у колі відсутній. Для  $L$  та  $C$  можуть бути отримані по два різних дійсних значення, що відповідають умові резонансу. Для  $\omega$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  - тільки по одному такому значенню.

На частоті резонансу вхідний опір паралельного контуру сягає максимального значення та має чисто активний характер. Внаслідок цього

вхідний струм  $I$ , який споживає контур буде мінімальним і співпадає по фазі з напругою на контурі  $U$ .

Резонансна частота паралельного контуру визначається з умови (5.1):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}$$

Резонанс у колі можливий, якщо  $R_1 > \rho$  та  $R_2 > \rho$ , або  $R_1 < \rho$  та  $R_2 < \rho$ . В протилежному випадку  $\omega_0$  буде мати уявне значення і резонанс у колі буде відсутнім.

За умови  $R_1 = R_2 \neq \rho$  резонансна частота паралельного коливального контуру співпадає з резонансною частотою послідовного контуру, тобто  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . Якщо  $R_1 = R_2 = \rho$ , коло резонує на будь-якій частоті ("байдужий" резонанс). Дійсно, у цьому випадку вхідний опір кола  $Z = \rho$  буде чисто активним і не залежить від частоти. Тому струм  $I$ , що споживає контур, буде співпадати за фазою з напругою  $U$  на будь-якій частоті, а його значення буде величиною постійною  $I_0 = U/\rho$ .

У радіоелектронних пристроях використовують контури з малими втратами, а тому  $R_1$  та  $R_2 \ll \rho$ . За таких умов  $\omega_0 \approx 1/\sqrt{LC}$ . Часто у гілці з ємністю опором  $R_2$  можна знехтувати ( $R_2 = 0$ ). Тоді

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_1}{L}\right)^2}$$

Для підвищення крутизни резонансних характеристик (підвищення вибіркової якості) широко застосовують двоконтурні резонансні кола: два резонансних контури, кожний з яких окремо налаштовують на одну й ту ж саму резонансну частоту. Контури можуть бути зв'язані індуктивним (трансформаторним або автотрансформаторним) чи ємнісним зв'язком.



У колах з малими втратами енергії ( $R = 0$ ) умови резонансу набувають вигляду

$$X(\omega) = 1/b(\omega) = 0,$$

де  $b(\omega)$  - реактивна провідність контура.

Якщо реактивний опір  $X(\omega) = 0$ , то реактивна провідність  $b(\omega) \rightarrow \infty$ . Резонансними будуть всі частоти, при яких  $X(\omega) = 0$  або  $X(\omega) \rightarrow \infty$  (нулі та полюси функції  $X(\omega)$ ). Нулі (корені чисельника) відповідають резонансу напруг, а полюси (корені знаменника) - резонансу струмів.

### **Загальні властивості частотних характеристик**

За умови  $dX(\omega)/d\omega > 0$  реактивний опір контура з ростом частоти зростає. Нулі та полюси функції  $X(\omega)$  чергуються (поряд двох нулів чи двох полюсів бути не може). Число резонансних частот на одну одиницю менше числа зведених реактивних елементів кола.

$$\text{При } \omega = 0, X(\omega) = 0 \text{ або } X(\omega) \rightarrow -\infty;$$

$$\text{При } \omega \rightarrow \infty, X(\omega) = 0 \text{ або } X(\omega) \rightarrow +\infty.$$

Якщо у колі є шлях для проходження постійного струму, то першим буде резонанс струмів. В протилежному випадку - резонанс напруг. Кількість резонансних частот буде на одиницю меншою за кількість зведених реактивних елементів кола.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ФАЗ ДЖЕРЕЛА ТА ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ

**МЕТА РОБОТИ:** вивчити особливості роботи та властивості трифазних кіл при з'єднанні зіркою фаз джерела та приймача.

#### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Виміряти параметри елементів  $R_1 - R_3$ ,  $C_1 - C_3$ , розміщених в блоках змінних опорів та ємностей (згідно до варіанту завдання, табл.6.1), а також опорів  $R_L$ , що імітують опір лінійних проводів.

Таблиця 6.1.

Варіант	Симетричний режим			Аварійний режим	
	Джерело	Приймач			
	$E_\Phi, В$	Елементи	З'єднання елементів	Причина виникнення	$R_0, Ом$
1	12	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Паралельно	К.з. фази $A$ приймача	50
2	24	$R_1 - R_3$	-----	Обрив фази $A$	0
3	36	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Послідовно	Обрив фази $B$	0
4	20	$C_1 - C_3$	-----	К.з. фази $B$ приймача	50
5	22	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Паралельно	Зниження $E_A$ на 50%	0
6	25	$R_1 - R_3$	-----	Зниження $E_C$ на 50%	0
7	30	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Послідовно	Обрив фази $C$	0
8	15	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Послідовно	К.з. фази $C$ приймача	50
9	24	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Послідовно	Зниження $E_A$ на 50%	0
10	20	$R_1 - R_3,$ $C_1 - C_3$	Паралельно	Обрив фази $A$	0

Опори та ємності близькі до ідеалізованих, тому при визначенні параметрів дозволяється використовувати тільки амперметр та вольтметр. За джерело напруги при цьому слід обрати одну з фаз блока трифазної напруги, встановивши значення напруги близько 10В.

2. Увімкнути блок трифазних напруг, встановити значення фазних *EPC* на холостому ході згідно табл.6.1. Зібрати трифазне джерело, з'єднане зіркою, на набірному полі. Виміряти лінійні напруги при об'єднанні у нульову точку:

- початків усіх фаз;
- початків фаз *B* та *C* й кінця фази *A*;
- початку фази *C* та кінців фаз *A* та *B*;
- кінців усіх фаз.

*Примітка : Початки кожної з фаз мають позначку « \* ».*

3. Результати занести до табл.6.2. Отримані результати пояснити за допомогою векторних діаграм.

Таблиця 6.2.

Лінійна напруга	У нульову точку об'єднані			
	Початки усіх фаз	Початки фаз <i>B, C</i> і кінець фази <i>A</i>	Початок фази <i>C</i> і кінці фаз <i>A</i> та <i>B</i>	Кінці усіх фаз
$U_{AB}, В$				
$U_{BC}, В$				
$U_{CA}, В$				

4. Зібрати коло симетричного трифазного навантаження згідно з завданням табл. 6.1. При вимкненому тумблері живлення блока трифазної напруги зібрати досліджуване коло згідно з рис.6.1. Нульові точки джерела *O* та приймача *O'* - з'єднати накоротко.

5. Увімкнути блок трифазної напруги. Виміряти напругу окремих фаз джерела при заданому навантаженні, при необхідності скорегувати їх, узгодивши з завданням табл. 6.1. Виміряти фазні струми та струм нульового проводу і занести їх значення до табл.6.3.

6. Визначити початкові фази струмів по вимірним параметрам заданих елементів і схемі їх з'єднання, прийнявши для фази  $A$   $\psi_{E_A} = 0$ . Виміряти фазові зсуви струмів відносно  $EPC$  фази  $A$ . Порівняти отримані результати та занести їх до табл.6.3.

Переконатися, що  $I_0 = 0$  і відключення нульового проводу не змінює значення струмів у симетричному режимі.

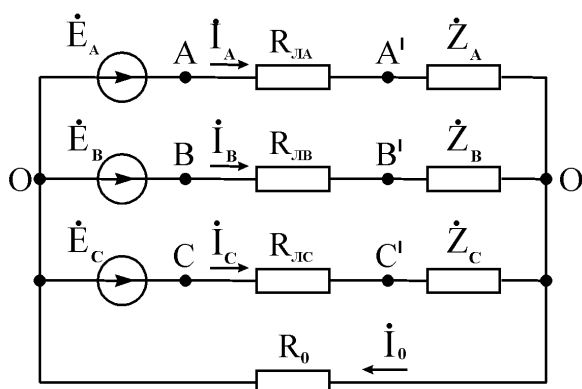


Рис. 6.1.

Таблиця 6.3

Значення струмів та початкових фаз	Режими роботи		
	Симетричний режим	Аварійний режим	
		З нульовим проводом	Без нульового проводу
$I_A, A$			
$\psi_A, ^\circ$			
$I_B, A$			
$\psi_B, ^\circ$			
$I_C, A$			
$\psi_C, ^\circ$			
$I_0, A$			
$\psi_0, ^\circ$			

7. Виміряти фазні та лінійні напруги та занести їх до табл. 6. 4. За результатами вимірювань п.п.4 - 6 побудувати векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг.

Відключити тумблер живлення блоку трифазної напруги. Зібрати коло, що відповідає аварійному режиму (табл.6.1.) Щоб запобігти спрацьовуванню захисту блока трифазної напруги при короткому замкненні однієї з фаз, обов'язково ввести опір нульового проводу з блоку змінних опорів згідно с завданням табл. 6.1. Ввімкнути тумблер живлення блока та виміряти фазні та лінійні струми та напруги. Результати занести до табл.6.3 і 6.4.

Таблиця 6.4

Значення напруг	Режим роботи		
	Симетричний режим	Аварійний режим	
		З нульовим проводом	Без нульового проводу
$U_{AO}, \text{В}$			
$U_{BO}, \text{В}$			
$U_{CO}, \text{В}$			
$U_{AB}, \text{В}$			
$U_{BC}, \text{В}$			
$U_{CA}, \text{В}$			
$U_{A'O}, \text{В}$			
$U_{B'O}, \text{В}$			
$U_{C'O}, \text{В}$			
$U_{AB'}, \text{В}$			
$U_{B'C'}, \text{В}$			
$U_{C'A'}, \text{В}$			
$U_{O'O}, \text{В}$			

За результатами п.7 побудувати векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг. За діаграмою струмів визначити значення струму нульового поводу в аварійному режимі і порівняти його з вимірним.

Відключити нульовий провід і повторити виміри струмів та напруг досліджуваного кола в аварійному режимі. Результати занести до табл. 6.3 і 6.4. Побудувати векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг. Визначення положення нульової точки приймача на топографічній діаграмі можливо по точці перетинання відрізків, які дорівнюють у вибраному масштабі фазним напругам приймача (з урахуванням спаду напруг на лінійних проводах), або по вимірному куту зсуву фаз напруг  $U_{O'O}$  та  $U_A$ .

Розрахувати напругу  $U_{OO}$  за методом двох вузлів. Порівняти визначені за топографічною діаграмою та розраховані значення модуля та аргумента напруги  $U_{OO}$ . У випадку значного розходження - повторити розрахунок, побудову або експеримент.

Зробити висновки по роботі, звернувши увагу на роль нульового проводу, вплив опорів лінійних проводів, можливі розходження експериментальних, розрахункових значень та даних, отриманих за векторними та топографічними діаграмами.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Трифазні системи *EPS*, напруг, струмів. Часові та векторні діаграми.
2. Основні схеми з'єднання трифазних кіл.
3. Лінійні та фазні напруги і струми, зв'язок між ними.
4. Симетричний режим роботи 3-х фазного кола; вимірювання та розрахунок струмів та напруг.
5. Несиметричний режим роботи 3-х фазного кола; вимірювання та розрахунок струмів та напруг.
6. Потужність 3-х фазного кола; її розрахунок та вимірювання.

## ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Багатофазні генератори** - генератори з декількома обмотками, у яких наводяться *EPS* однакової частоти, але зсунуті друг відносно друга по фазі.

**Багатофазна система електричних кіл** - сукупність електричних кіл з багатофазними джерелами живлення.

**Фаза** - окремі частини багатофазної системи.

**Трифазні кола** - це частковий випадок багатофазних кіл, коли число фаз дорівнює трьом.

**Не з'єднане трифазне коло** - фази якого електрично не з'єднані поміж собою (сьогодні не застосовується).

**З'єднане трифазне коло** - трифазне коло, фази якого електрично з'єднані поміж собою.

**Трифазна система ЕРС, напруг або струмів** - сукупність ЕРС, напруг та струмів, діючих в окремих фазах. Розрізняють симетричні та несиметричні системи ЕРС, струмів, напруг.

**Симетрична трифазна система ЕРС (напруг, струмів)** - для якої виконуються умови:

- всі ЕРС (напруги, струми) рівні за величиною;
- кожна ЕРС (напруги, струми) відстає по фазі від попередньої на один і той же фазний кут, що дорівнює  $\alpha = q2\pi/3$ ,  $q = 1,3$ .

Якщо хоча б одна з цих вимог не виконується, то система ЕРС (напруги, струми) буде **несиметричною**.

При  $q = 1$ ,  $\alpha = 2\pi/3$  і тоді будемо мати **систему прямої (додатної) послідовності фаз**:

$$e_A(t) = \sqrt{2}E \sin \omega t; \quad \dot{E}_A = E;$$

$$e_B(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad \dot{E}_B = Ee^{-j2\pi/3} = \alpha^2 E;$$

$$e_C(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t - 4\pi/3) = \sqrt{2}E \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad \dot{E}_C = Ee^{+j2\pi/3} = \alpha \cdot E;$$

де  $\alpha = e^{j2\pi/3}$  - фазний множник.

Сума трьох векторів, утворюючих симетричну зірку дорівнює нулю

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0; \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

При  $q = 2$ ,  $\alpha = 4\pi/3$  будемо мати систему **зворотної (від'ємної) послідовності фаз**

$$\dot{E}_A = E; \quad \dot{E}_B = \alpha \cdot E; \quad \dot{E}_C = \alpha^2 \cdot E,$$

для якої також виконується співвідношення

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$$

При  $q = 3$ ,  $\alpha = 2\pi$ , отримаємо **систему нульової послідовності фаз**, для якої

$$\dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C = E$$

У цьому випадку

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 3E$$

Всяку несиметричну систему векторів можна розкласти на ці три симетричні системи. В подальшому під трифазною системою  $EPC$  (напруг, струмів) будемо розуміти систему прямої послідовності фаз.

Багатофазні системи, для яких сума миттєвих потужностей усіх фаз є величиною постійною і не залежить від часу, називають урівноваженими. Багатофазна система урівноважена, якщо вона симетрична і кількість фаз більше двох (3, 4, 5...).

**При з'єднанні зіркою** однойменні виводи трьох обмоток генератора об'єднують в одну точку, яку називають нульовою точкою генератора  $O$ .

При з'єднанні обмоток генератора **трикутником** початок однієї фазної обмотки з'єднують з кінцем наступної по порядку фазної обмотки так, що всі три обмотки утворюють замкнутий трикутник. При цьому напрями  $EPC$  у контурі трикутника співпадають, а тому сума  $EPC$  дорівнює нулю. При відсутності навантаження струм у обмотках генератора також відсутній.

Навантаження у трифазному колі також може бути з'єднане зіркою або трикутником. Виділяють п'ять простіших способів з'єднання трифазного генератора з трифазним навантаженням:

- ◆ зірка-зірка без нульового проводу;
- ◆ зірка-зірка з нульовим проводом;
- ◆ зірка-трикутник;
- ◆ трикутник-зірка;
- ◆ трикутник-трикутник.



Проводи, що з'єднують вихідні затискачі генератора ( $A, B, C$ ) з навантаженням, називають **лінійними проводами**, а струми у цих проводах - **лінійними струмами** та позначають їх  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ . За додатні напрями цих струмів приймають напрям від генератора до навантаження. Напруги поміж лінійними проводами називають **лінійними напругами**  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ . ЕРС, напруги та струми окремих фаз називають **фазними ЕРС** (напругами, струмами).

З'єднання зірка-зірка без нульового проводу використовується тільки при однаковому навантаженні всіх трьох фаз (рівномірне навантаження). При нерівномірному навантаженні, напруги на фазах навантаження будуть різними. Окрім цього, схема не дозволяє проводити підключення або відключення одної фази навантаження, так як при цьому порушуються електричні режими в інших фазах.

З'єднання навантаження трикутником дозволяє використовувати нерівномірні навантаження, які при необхідності можуть підключатися або відключатися незалежно один від одного. Така ж можливість має місце при з'єднанні зірка-зірка з нульовим проводом або через "землю" (корпус).

У симетричних трифазних колах при з'єднанні зіркою, лінійні напруги по модулю у  $\sqrt{3}$  разів більш ніж фазні  $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ , а лінійні струми дорівнюють фазним  $I_{Л} = I_{\phi}$ . При з'єднанні у трикутник  $U_{Л} = U_{\phi}$ , а лінійні струми  $I_{Л} = \sqrt{3}I_{\phi}$ .

У симетричному трифазному колі струми створюють симетричну трифазну систему. При цьому, при з'єднанні зіркою  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_0 = 0$ . Таким чином, струм у нульовому проводі буде відсутнім, а напруга  $\dot{U}_{0'0} = 0$ .

Якщо генератор або навантаження несиметричні, струм у нульовому проводі  $\dot{I}_0 \neq 0$  і напруга  $\dot{U}_{0'0} = \dot{z}_0 \dot{I}_0 \neq 0$ .

## ЛІТЕРАТУРА ДЛЯ ПІДГОТОВКИ

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебн. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая шк., 1996. – 638 с. Библиогр.: с. 632. – На пер. Теоретические основы электротехники. – 10 000 экз. – ISBN 5-06-002160-2.

2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник. / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: «Гардарики» 2007. – 701 с. Библиогр.: с. 695. – На пер. Теоретические основы электротехники. – 5 000 экз. – ISBN 5-8297-0046-8.

3. Нейман Л.В., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. учеб. для вузов. Том 1. - 3-е изд., перераб. и доп. / Л. В. Нейман, К. С. Демирчян. - Л.: Энергоиздат, Ленингр. Отд-ние, 1981. – 536 с. – На пер. Теоретические основы электротехники. – 60 000 экз.

4. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П.А. Ионкин., А. В. Нетушил и др. – Изд. 5-е, перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с. – Библиогр.: с. 513. – На пер. Основы теории цепей. 50 000 экз.

5. Попов В.П. Основы теории цепей / В. П. Попов. - М.: Высшая школа, 1985. - 496 с. – Библиогр.: с. 483. – На пер. Основы теории цепей. - 20 000 экз.

6. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. П. А. Ионкина, - М.: Энергоиздат, 1982. – 767 с. – Библиогр.: с. 762. – На пер. Сборник задач и упражнений по ТОЭ. – 50 000 экз.

7. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. Л. А. Бессонова, - М.: Высш. шк., 1980. - 472 с. – Библиогр.: с. 468. – На пер. Сборник задач по ТОЭ. – 67 000 экз.