

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

# ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою «Електронні компоненти та системи», «Електронні прилади та  
пристрої»  
спеціальності 171 Електроніка

Укладачі: А.В. Заграничний, Л.М. Батрак, Т.А. Хижняк

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензент *Гармаш О.В.*, доцент, кандидат технічних наук,  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Ямненко Ю.С.*, професор, доктор технічних наук

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 2 від 30.09.2022 р.)  
за поданням Вченої ради факультету електроніки  
(протокол № 9/2022-2 від 26.09.2022 р.)*

«Теорія електричних кіл. Лабораторний практикум» містить опис шести лабораторних робіт, які передбачені навчальною програмою кредитного модуля «Теорія електричних кіл-1». Для зручності студентів інформація по кожній лабораторній роботі оформлена у вигляді закінченого протоколу, що містить титульний аркуш, мету, порядок виконання роботи, схеми експериментів, теоретичні відомості за тематикою роботи, контрольні запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу. В першій лабораторній роботі надано детальний опис віртуальних макетів та надано рекомендації щодо роботи з ними, описано принципи побудови схем для дослідження. Окрім того, в протоколах наведені таблиці для отриманих експериментальних даних. Даний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 171 Електроніка. Загалом матеріал посібника буде корисним для всіх студентів, що вивчають споріднені дисципліни – «Електротехніка», «Теорія електронних кіл», «Аналіз електронних схем» та інші, для успішного засвоєння яких потрібне розуміння процесів в електричних колах та знання методів розрахунків струмів і напруг в них.

Реєстр. № НП 22/23-150. Обсяг 4 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. Ознайомче заняття	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. Застосування законів Ома та Кірхгофа для аналізу електричних кіл	17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. Еквівалентні перетворення складного електричного кола	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. Застосування законів рівноваги для аналізу електричних кіл синусоїдального струму	42
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. Дослідження електричного резонансу	56
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. Дослідження трифазного кола при з'єднанні фаз джерела та приймача зіркою	66
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	78

## ВСТУП

Кредитний модуль «Теорія електричних кіл-1» закладає основи розуміння основних енергетичних процесів в електричних колах, дає поняття про представлення реальних електротехнічних пристроїв їх спрощеними моделями – електронними схемами, надає знання щодо основних методів розрахунку електричних кіл постійного та змінного струму, особливостей застосування цих методів та доцільності їх використання для конкретної топології схем.

В процесі виконання лабораторних робіт студенти закріплюють отримані теоретичні знання працюючи на стендах, де з використанням вимірювальних приладів отримують наочне підтвердження теорії та перевіряють теоретичні розрахунки.

Основні завдання циклу лабораторних робіт: експериментальне вивчення законів електротехніки та застосування теоретичних методів розрахунку для аналізу та перевірки експериментальних даних, отриманих при роботі з реальними джерелами та споживачами електроенергії.

Цикл містить шість лабораторних робіт:

1. Ознайомче заняття – ознайомлення зі стендом, вимірювальними приладами, джерелами живлення, навантаженнями, дослідження параметрів навантажень (опори, провідності) та джерел живлення (побудова вольт-амперних характеристик). На даний вид робіт відводиться одне заняття, 2 академічні години.

2. Застосування законів Ома та Кірхгофа для аналізу електричних кіл – студенти на стенді збирають схему з реальних елементів, згідно з варіантом, що відповідає номеру бригади, здійснюють вимірювання струмів та напруг, перевіряють результати вимірювання за допомогою законів Ома та Кірхгофа. Завдання розраховані для виконання протягом 2 академічних годин.

3. Еквівалентні перетворення складного кола – відповідно до варіанту студенти вдома здійснюють еквівалентні перетворення електричного

кола, розраховуючи на кожному етапі перетворення параметри еквівалентних опорів. В аудиторії студенти збирають почергово схеми, отримані на кожному з етапів перетворення та вимірюють струми/напруги для кожної із утворених схем. Метою є проаналізувати, як впливають еквівалентні перетворення схеми на розподіл струмів і напруг в колі. Враховуючи значний обсяг, для даної роботи відводиться 4 академічні години.

4. Застосування законів рівноваги для аналізу електричних кіл синусоїдального струму – студенти перевіряють виконання законів, вивчених для кіл постійного струму, в колах синусоїдального струму. Метою є вивчення особливостей таких кіл в частині виконання вимірювань та здійснення розрахунків. Робота розрахована на 4 академічні години.

5. Дослідження електричного резонансу – студентами досліджуються умови виникнення резонансу в електричних колах, вплив цього режиму на параметри та характеристики кола. Робота розрахована на 2 академічні години.

6. Дослідження трифазного кола при з'єднанні фаз джерела та приймача зіркою – студенти вивчають особливості роботи з трифазними джерелами живлення та споживачами. За вимірними параметрами розраховують основні параметри таких кіл. Робота досить об'ємна і розрахована на 4 академічні години.

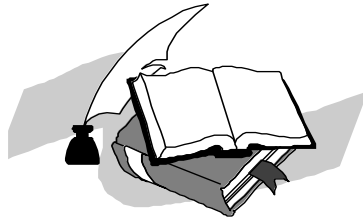
Для оцінки рівня теоретичної підготовленості студентів до виконання роботи на початку заняття проводиться допуск у формі відповідей на тестові питання (протягом порядку 10 хвилин). У випадку, якщо студент правильно відповідає не менш ніж на 60% питань, він допускається до виконання роботи. В протилежному випадку, він здійснює теоретичну підготовку і допускається повторно. Результати написання допуску є частиною сумарного рейтингового балу за лабораторну роботу.

Після виконання лабораторної роботи результати вимірювань та розрахунків необхідно показати викладачеві.

При оформленні протоколу лабораторної роботи дані вимірювань заносяться до таблиць, наведених в протоколі розрахунки та побудови графіків здійснюються в межах відведених полів.

Завершальним етапом оформлення протоколу лабораторної роботи є написання висновків за результатами виконання роботи. Висновки мають відображати результати аналізу отриманих даних, порівняння практичних результатів з теоретично відомими даними, підтвердження або спростування теорії на практиці і пояснення виявлених відмінностей результатів розрахунку за реальними значеннями струмів та напруг від теоретично можливих. В жодному випадку не рекомендується переписування у висновки мети роботи і констатування самого факту її виконання.

При оформленні результатів лабораторних робіт теорію в протокол додавати не потрібно.



## Лабораторна робота №1

**з кредитного модуля: „ Теорія електричних кіл”  
Тема: „ Ознайомче заняття ”**

*Роботу виконав студент \_\_\_-го курсу  
факультету \_\_\_\_\_  
групи \_\_\_\_\_*

\_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

**Київ 20\_\_ р.**

**МЕТА:** Ознайомлення з лабораторним стендом (пультом, набірним полем, елементами та ін.), вимірними приладами та правилами оформлення протоколів лабораторних робіт.

## ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Розрахувати опір резистивних елементів 01-10 відповідно до свого номеру по списку. Розраховані значення занести до табл.1.1.

Таблиця 1.1. Вимірні значення опорів

Елемент	$R_{01}$	$R_{02}$	$R_{03}$	$R_{04}$	$R_{05}$	$R_{06}$	$R_{07}$	$R_{08}$	$R_{09}$	$R_{10}$
Заданий опір, Ом	56	82	100	150	200	300	510	750	820	1000
Розраховані значення ( $R_i + N_0$ ), Ом										

2. Зібрати схему згідно рис.1.1 з використанням наявних елементів  $R_{01} - R_{08}$ .

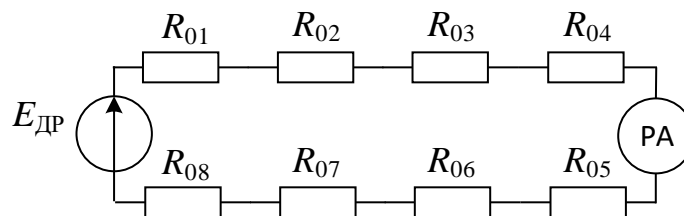


Рис. 1.1.1. Досліджувана схема 1

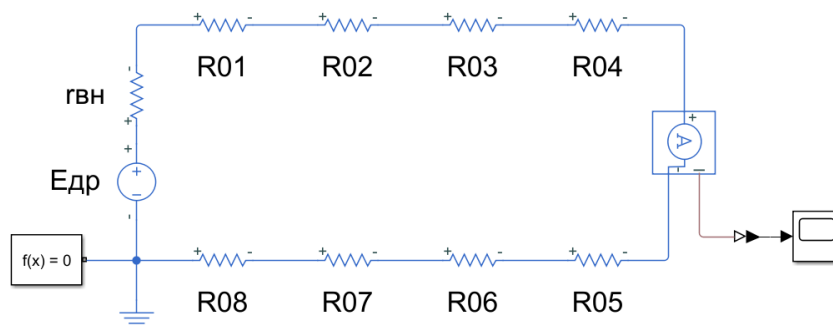


Рис. 1.1.2. Досліджувана схема 1 в програмному середовищі Matlab Simulink

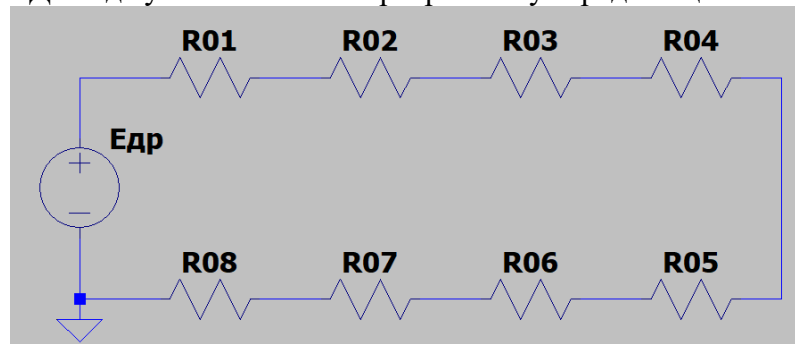


Рис. 1.1.3. Досліджувана схема 1 в програмному середовищі LTSpice

В програмному середовищі LTSpice виміри напруг і струмів на елементах здійснюються напряму під час симуляції, звідси амперметр і вольтметр не



використовуються.

3. Підключити схему (рис.1.1.1) до регульованого джерела напруги ( $E_{ДР}$ ) і виставити струм у колі 10 мА шляхом зміни напруги джерела.

4. Виміряти напругу на окремих резисторах та, використовуючи закон Ома, знайти фактичні опори елементів  $R_{01}-R_{08}$  і провідності  $G_{01}-G_{08}$ . Результати звести до табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Розраховані значення опорів

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

5. **Змінюючи** опір та фіксуючи значення напруги та струму, зняти та побудувати вольт-амперну характеристику регульованого  $E_{ДР}$  джерела напруги, використовуючи схему, наведену на рис. 1.2.1. Результати вимірювань звести до табл. 1.3. Як навантаження  $R_H$  використовувати змінний опір 100-1000 Ом. Джерело **обов'язково** повинно мати внутрішній опір (встановити його 5 Ом, якщо в програмі не задано іншого).

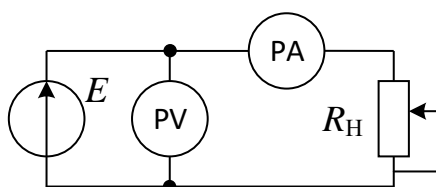


Рис. 1.2.1. Досліджувана схема 2

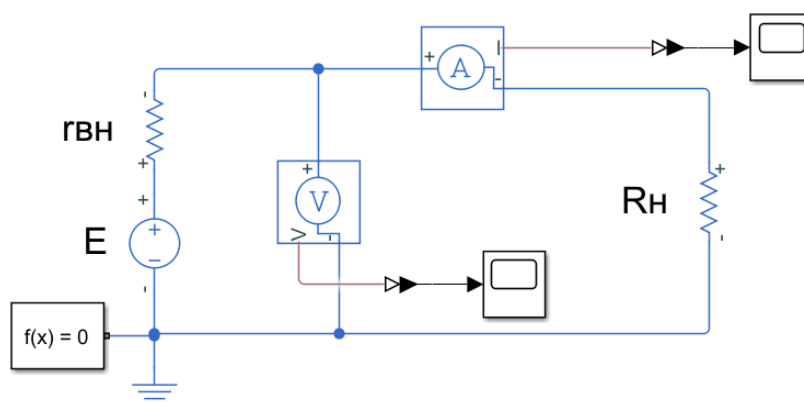


Рис. 1.2.2. Досліджувана схема 2 в програмному середовищі Matlab Simulink

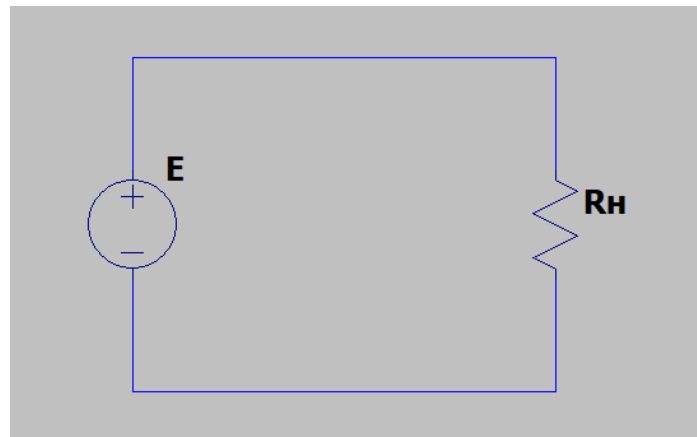


Рис. 1.2.3. Досліджувана схема 2 в програмному середовищі LTspice

Таблиця 1.3. Вольт-амперна характеристика джерела живлення

$I_{н}, \text{мА}$										
$E_{др}, \text{В}$										

За даними табл. 1.3. побудувати графік вольт-амперної характеристики джерела в полі рис.1.3.

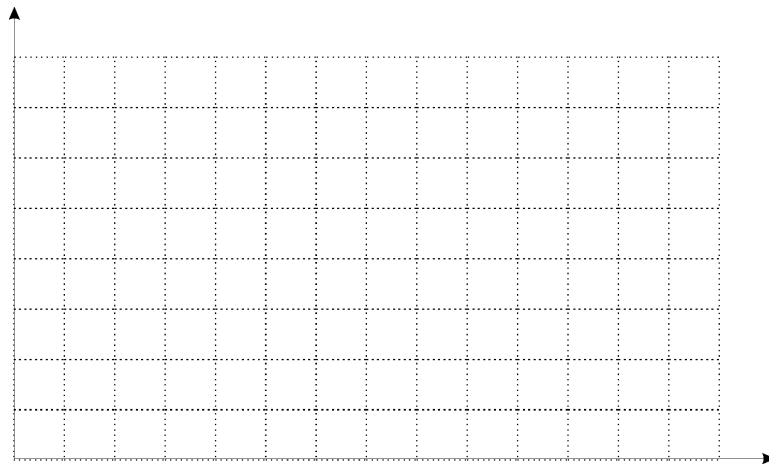


Рис. 1.3. Вольт-амперні характеристики джерел напруги

***Зробити висновки по роботі***

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Електрична схема, гілка, вузол.
2. Електричне коло і його елементи: джерела і приймачі електричної енергії.
3. Електрична енергія, напруга, струм, одиниці вимірювання. Позитивний напрям струмів, напруг
4. Джерело електричної енергії:
  - ідеальні джерела ЕРС і струму;
  - реальні джерела ЕРС і струму.
5. Еквівалентні схеми джерел енергії, їх взаємне перетворення.
6. Вольт-амперні характеристики джерел ЕРС і струму.
7. Опір і провідність, одиниці вимірювання.
8. Закон Ома.
9. Перший закон Кірхгофа.
10. Другий закон Кірхгофа.

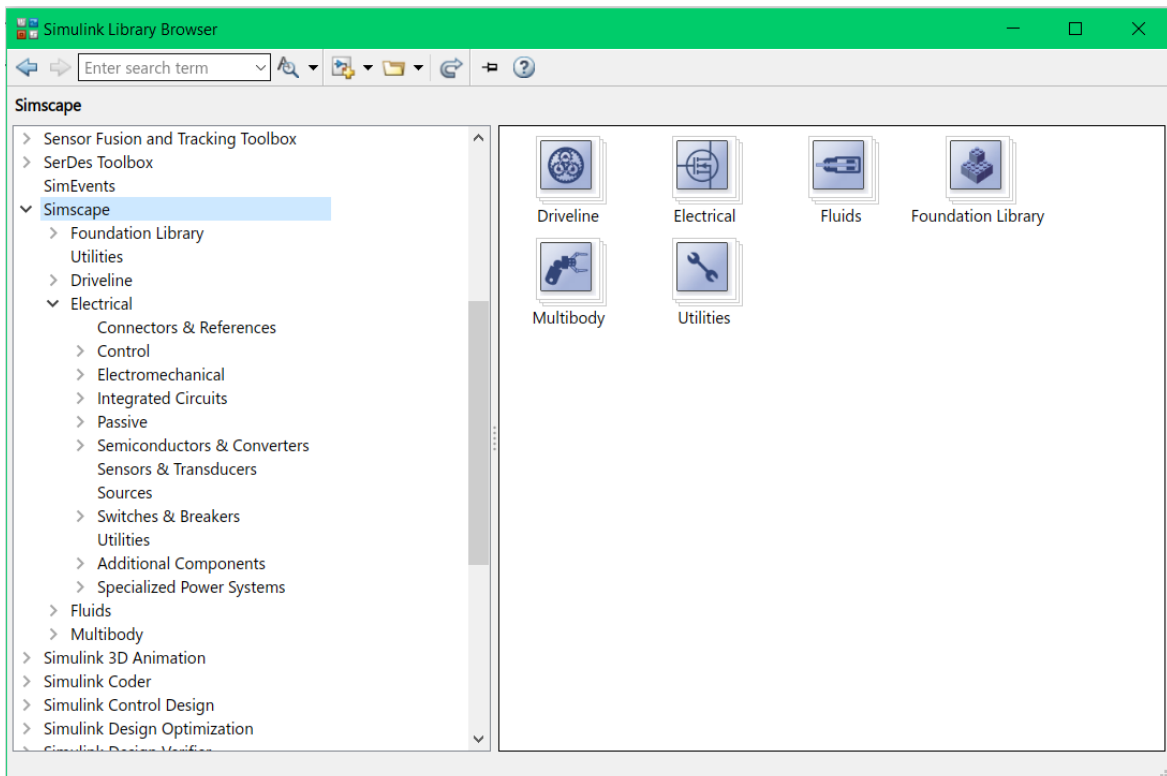
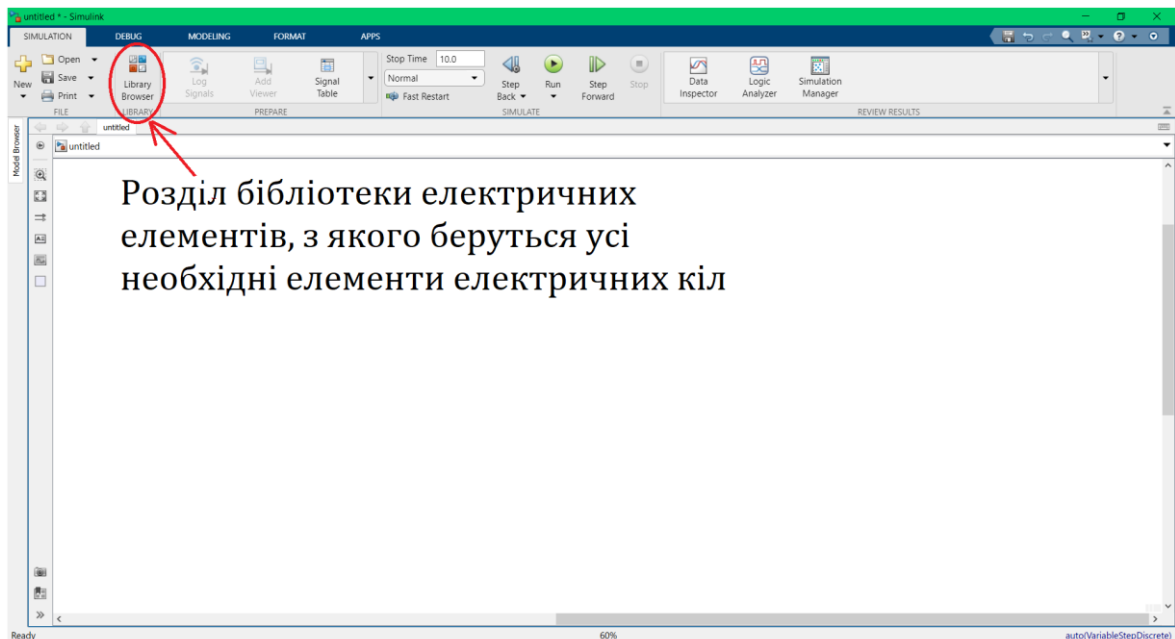
## **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ**

Звіт містить титульний лист і такі розділи:

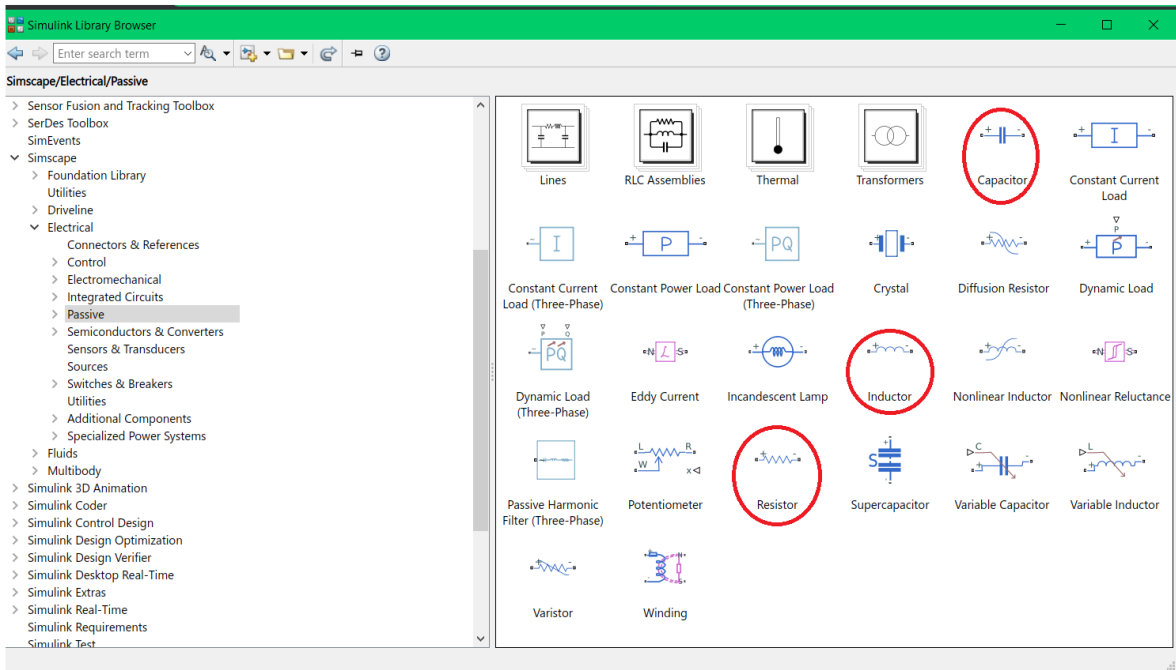
1. Мета.
2. Порядок і результати виконання досліджень.
3. Принципові схеми досліджуваних кіл.
4. Розрахункові формули і розрахунки.
5. Висновки.

## ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

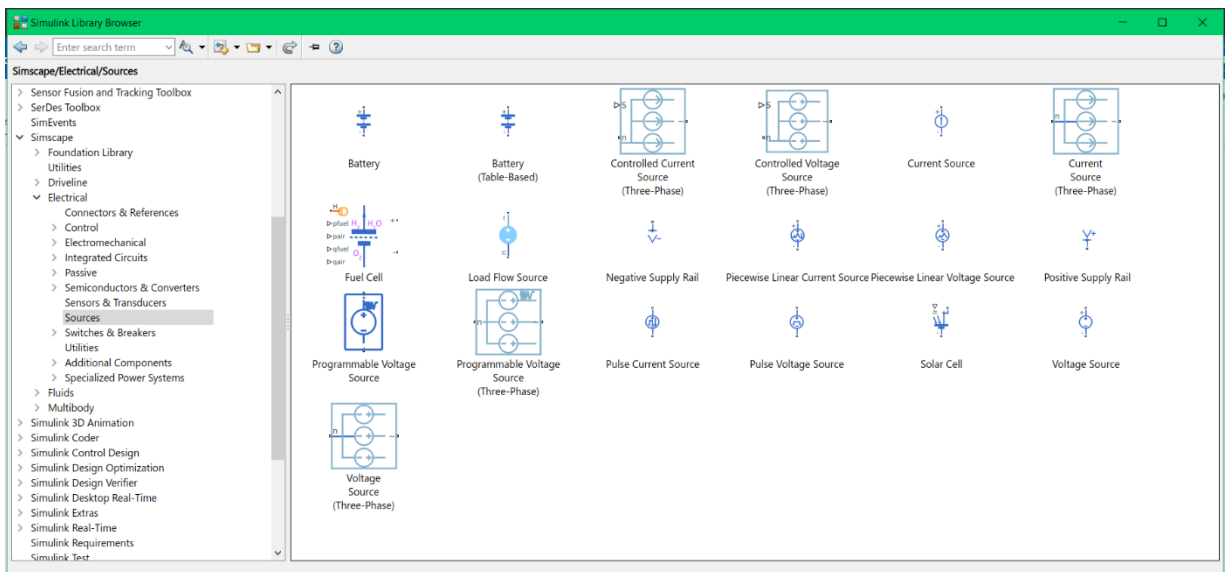
Використання програмного середовища Matlab Simulink [1] для дослідження електричних кіл.



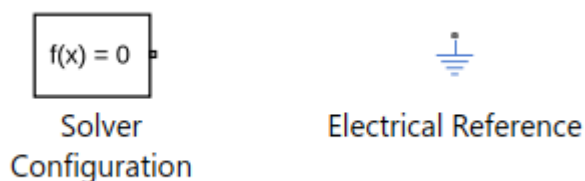
У відкритому вікні в меню зліва потрібно обрати “Simscape/Electrical”.



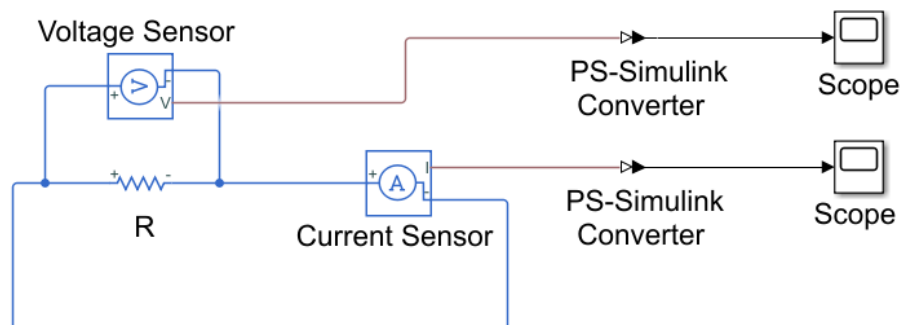
У розділі “Passive” можна обрати основні пасивні елементи кола - резистор, котушка індуктивності, конденсатор. Для того, щоб додати елемент в робочу область, достатньо перетягнути його на потрібне місце.



У розділі “Sources” можна обрати різні джерела напруги або струму, основним є Voltage Source, який можна налаштувати як джерело постійної напруги або джерело синусоїдальної напруги.

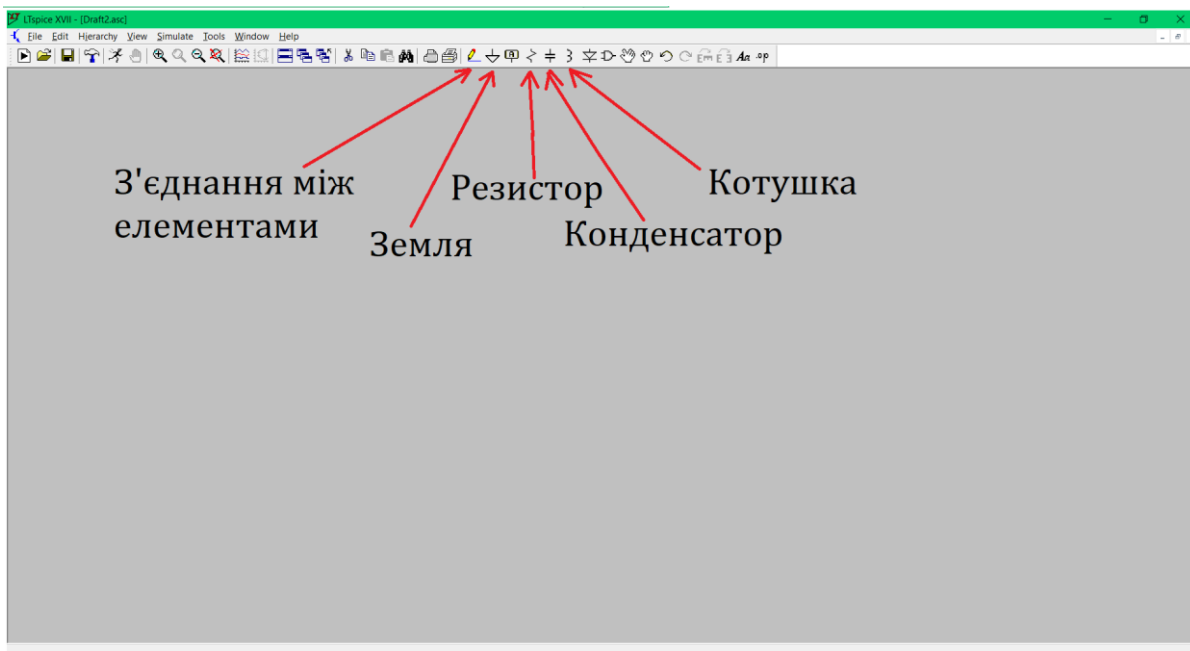


Щоб мати змогу запустити симуляцію, потрібно підключити “Solver Configuration” та “Electrical Reference” в будь-яку точку електричного кола.



Для виміру форми та амплітуди напруги або струму на конкретному елементі використовуються “Current Sensor” та “Voltage Sensor”, які підключаються аналогічно амперметру та вольтметру відповідно. Для спостереження форми та амплітуди напруги або струму використовується елемент “Scope”, який підключається до вимірювальних елементів через “PS-Simulink Converter”.

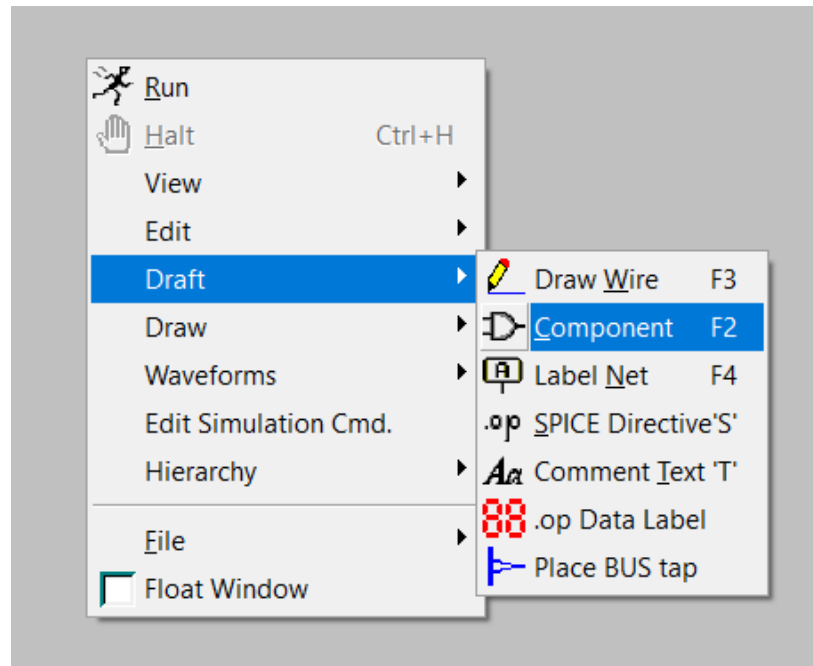
### Використання програмного середовища LTspice [2] для дослідження електричних кіл.



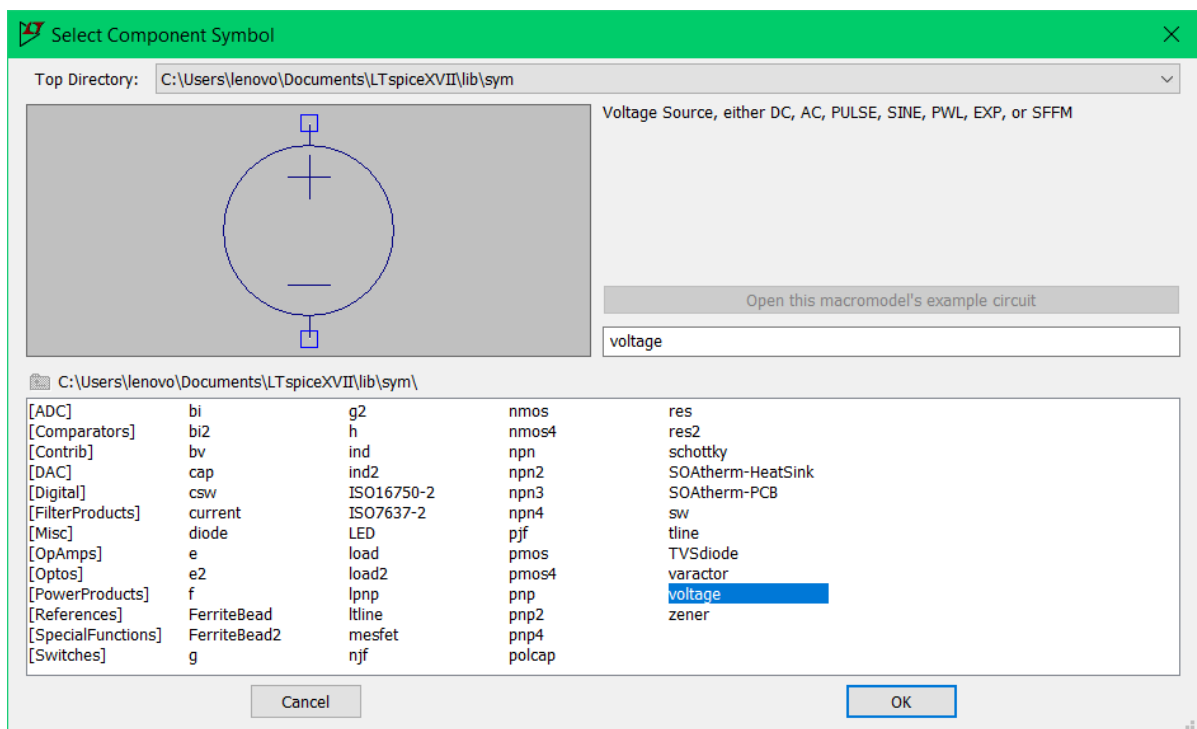
Основні елементи знаходяться на головній частині меню програми. Щоб додати їх в робочу область достатньо перетягнути в потрібне місце.

Щоб запустити симуляцію, до електричного кола має бути підключено

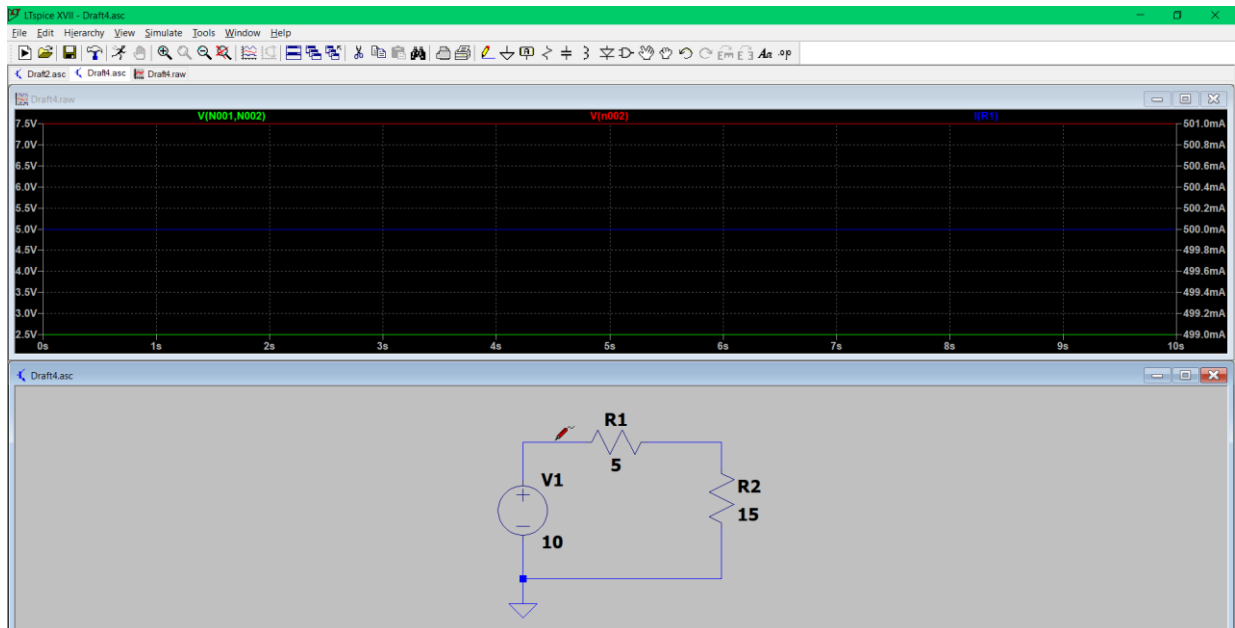
елемент “Ground”.



При натисканні правою клавішею миші по пустій робочій області відкривається меню, через яке можна відкрити вікно з усіма доступними елементами.



В даному вікні можна обрати джерело напруги, яке в подальшому можна налаштувати відповідно до потреби, натиснувши праву клавішу мишки по елементу.



Для спостереження форми та амплітуди сигналу потрібно запустити симуляцію. Для виміру напруги на елементі потрібно затиснути ліву клавішу мишки на з'єднанні з одного боку елемента та відпустити з іншого боку. Для виміру струму на елементі достатньо натиснути на елемент.





## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

з кредитного модуля: *“Теорія електричних кіл”*  
Тема: *“Застосування законів Ома та Кірхгофа для  
аналізу електричних кіл”*

*Роботу виконав студент \_\_-го курсу  
факультету \_\_\_\_\_  
групи \_\_\_\_\_*

\_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

Київ 20\_\_ р.

**МЕТА:** Набуття навичок застосування законів Ома та Кірхгофа при експериментальному дослідженні електричного кола.

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Обрати схему (рис.2.1) відповідно до номеру варіанту. Зобразити на папері досліджувану схему (на полі рис.2.2) відповідно до стандарту. Вказати на схемі номінальні значення опорів резисторів, використовуючи дані табл.2.1.

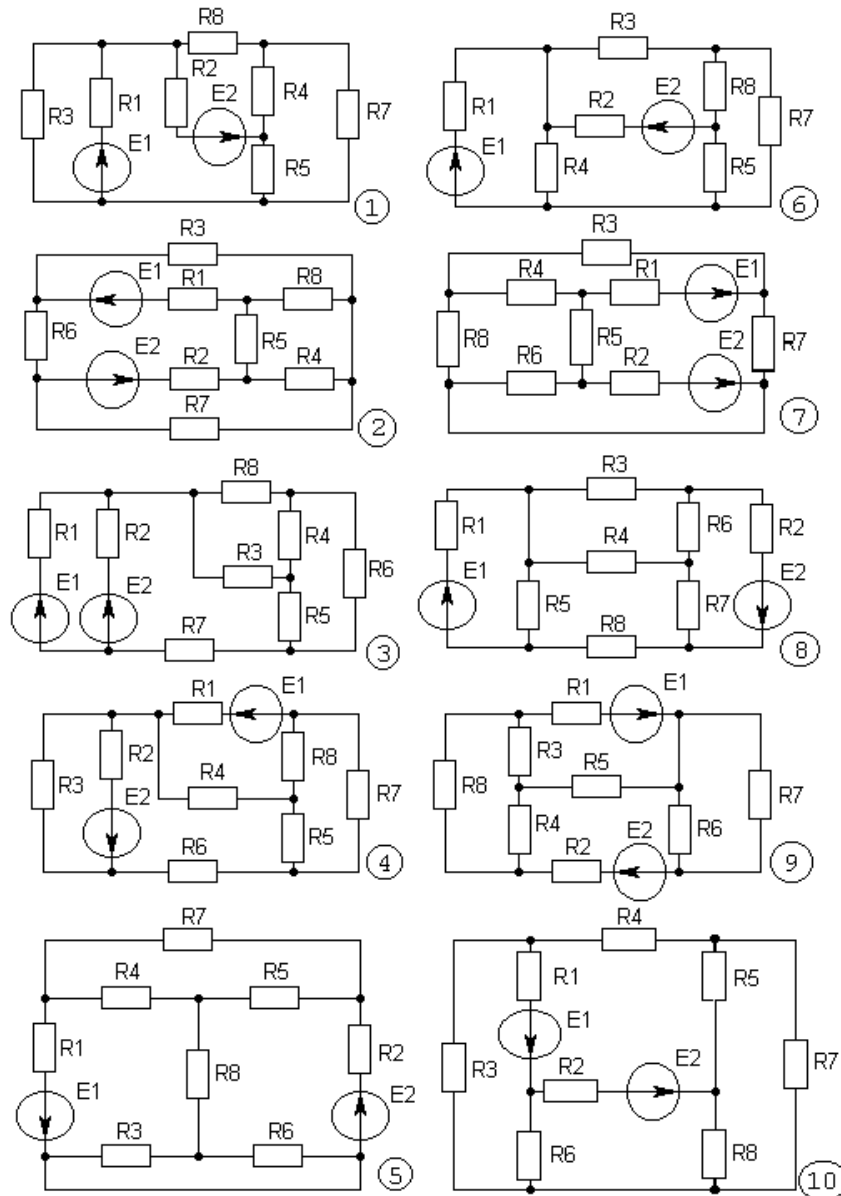


Рис. 2.1. Варіанти схем

Таблиця 2.1. Відповідність елементів схем та елементів набірного поля

Варіант	Елементи схем за рис. 2.1								
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	E2, В
	Номери елементів набірного поля								
1, 11	01	03	04	05	06	07	08	02	18
2, 12	03	01	04	05	06	07	08	02	22
3, 13	03	02	04	05	06	07	08	01	20
4, 14	01	04	03	05	06	07	08	02	18
5, 15	02	03	05	04	06	07	03	01	20
6, 16	01	03	04	06	05	07	08	02	22
7, 17	01	03	04	05	07	06	08	02	22
8, 18	08	02	04	05	06	07	01	03	20
9, 19	03	08	04	05	06	07	01	02	22
10, 20	01	02	04	05	06	07	08	03	20

**ПРИМІТКА. E1=20 В.**

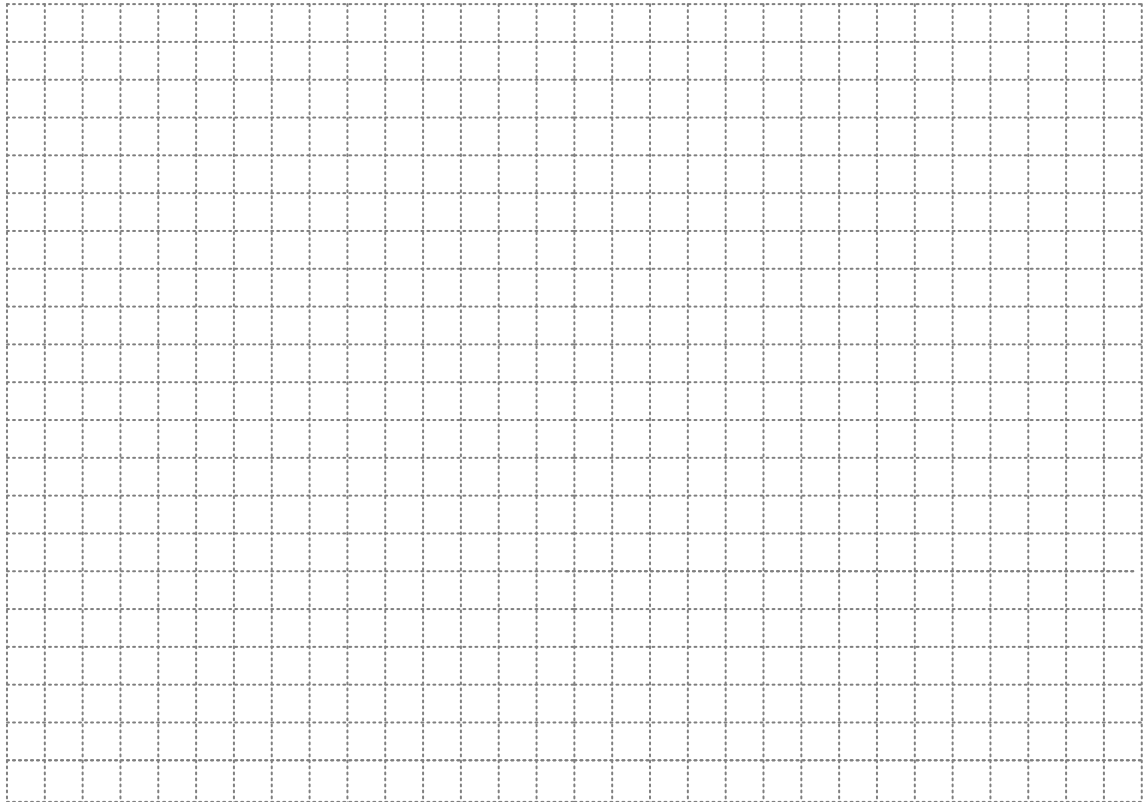


Рис. 2.2. Схема електричного кола

2. Зобразити схему, використовуючи для індексації замість номерів резисторів по рис. 2.2 номери елементів кола згідно табл. 2.1.

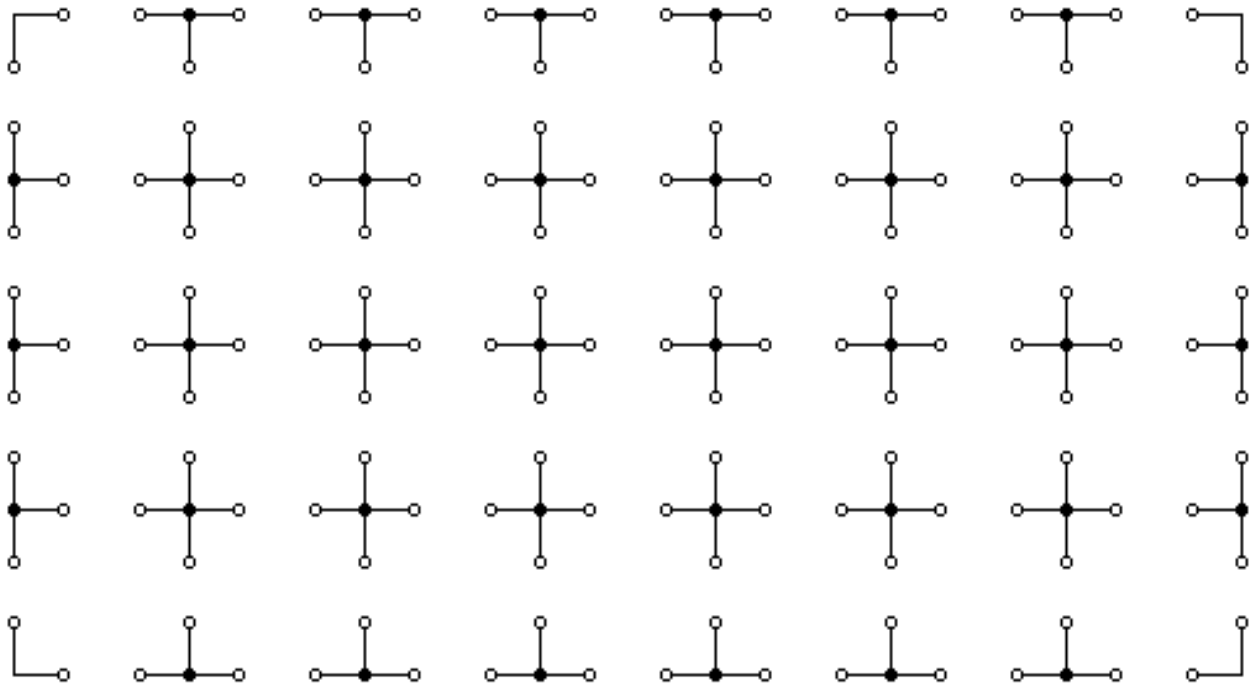


Рис. 2.3.1. Електричне коло в програмі (модель)

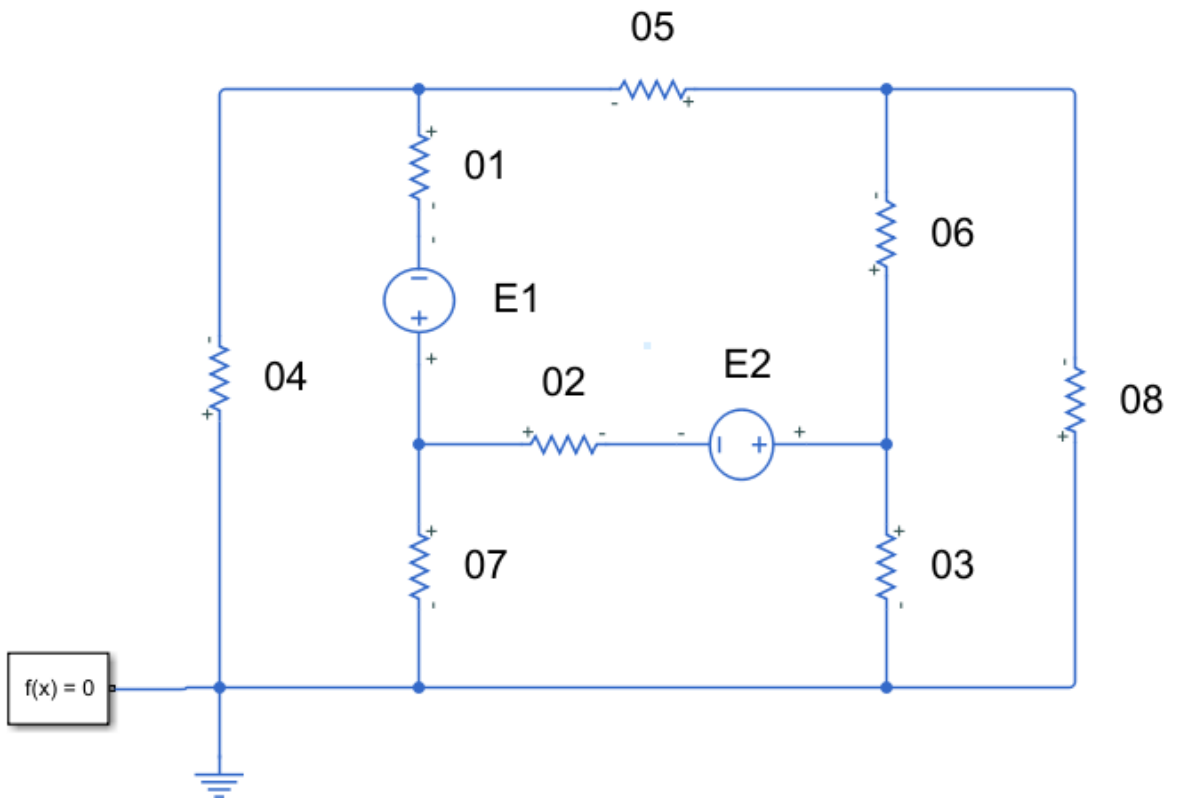


Рис. 2.3.2. Приклад електричного кола 10 варіанту в програмному середовищі Matlab Simulink

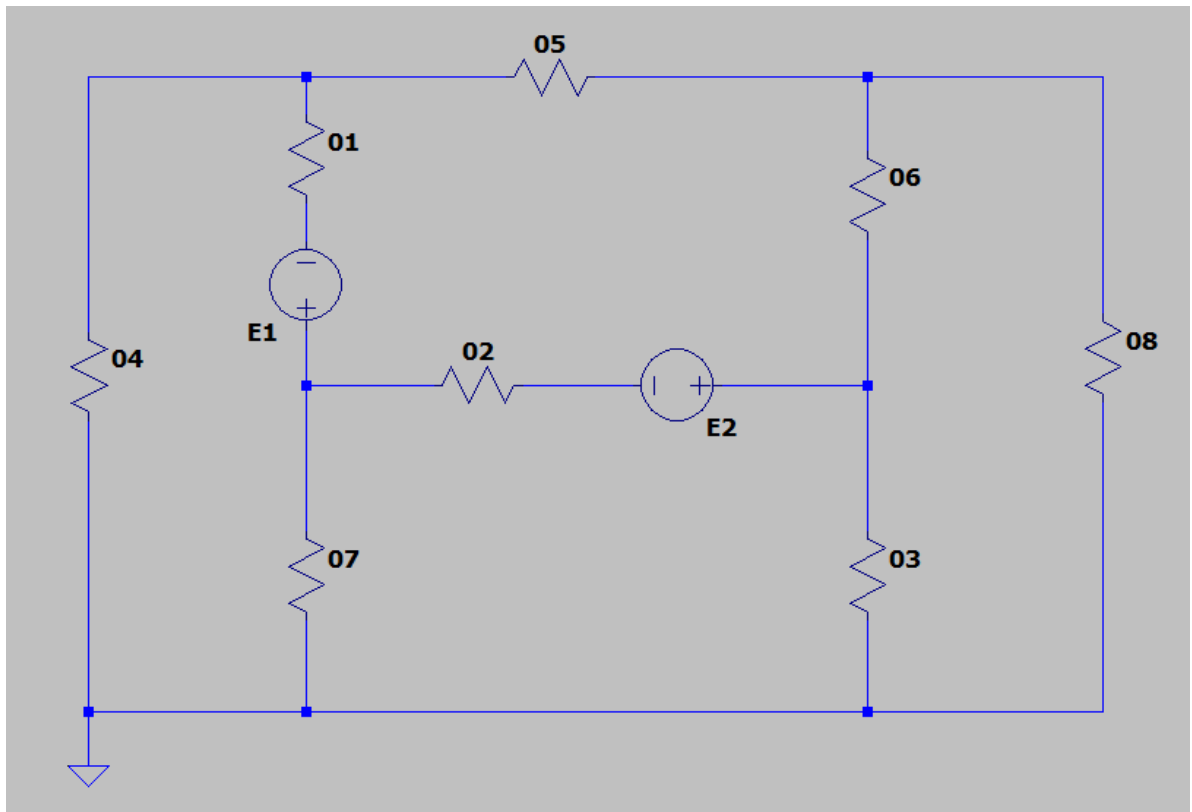


Рис. 2.3.3. Приклад електричного кола 10 варіанту в програмному середовищі LTspice

3. Визначити кількість вузлів та гілок електричного кола рис.2.2. Пронумерувати вузли схеми. Заповнити табл. 2.2, вказавши, які елементи входять до кожної гілки. Задатись розрахунковими напрямками струмів у вітках та вказати їх на схемі рис.2.2.

Таблиця 2.2. Структурні елементи схеми

Кіл-ть вузлів	Кіл-ть віток	1 - а вітка	2 - а вітка	3 - я вітка	4 - а вітка	5 - а вітка	6 - а вітка	7 - а вітка	8 - а вітка	9 - а вітка

4. Зібрати коло в програмі. Виміряти струм у гілках. Визначити дійсний напрям струму, виходячи з технічних особливостей застосованих вимірювальних приладів («+» амперметра підключається в точку звідки струм витікає, а «-» - в точку, куди він втікає, тобто за напрямом стрілки на схемі). Результати вимірювань занести до табл. 2.3. При цьому знак «+» ставиться перед результатом вимірювань, якщо розрахунковий (обраний) і дійсний напрям струму співпадають (стрілка амперметра відхиляється вправо), а знак «-» - в протилежному випадку (стрілка відхиляється вліво. В цьому випадку потрібно змінити підключення амперметра на протилежне і повторити вимірювання).

Таблиця 2.3. Результати вимірювання струму у вітках

Вітка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Струм, мА									

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

$$\delta I = \left| \frac{\sum I}{I_{\max}} \right| \times 100\%, \quad (2.1)$$

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

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6. Визначити значення і напрям напруги на елементах кола з урахуванням обраних позитивних напрямів струмів. Принцип вимірювання є аналогічним до п.4, вимірювання здійснюється за допомогою мультиметра. У випадку неспівпадіння дійсного і обраного позитивного напрямку напруги на елементі прилад покаже «-» на дисплеї. Відповідно, потрібно поміняти місцями клєми мультиметра і повторити вимірювання. Результати звести до табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Результати вимірювання напруги на елементах

Елемент	ДН	ДР	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Напруга, В										

7. Вибрати систему незалежних контурів в досліджуваній схемі. Перевірити правильність визначення значень та напрямів напруг, склавши для всіх незалежних контурів рівняння за другим законом Кірхгофа. Обчислити для кожного контуру величину  $\delta U$ , відносячи по аналогії з формулою (2.1) суму напруг до найбільшої із них в певному контурі.

При  $\delta U > 5\%$  з'ясувати причину і за необхідності, повторити вимірювання:

.....

.....

8. Перевірити виконання балансу потужностей досліджуваного кола за даними п.п.4,6.

**ПРИМІТКА.** Використовувати фактичні значення опорів резисторів, отримані в лабораторній роботі №1.

Визначити похибку балансу:

$$\delta P = \frac{|P_{\Pi} - P_{Д}|}{\frac{P_{\Pi} + P_{Д}}{2}} \times 100\% \quad , \quad (2.2)$$

де  $P_{\Pi}$ ,  $P_{Д}$  - сумарні потужності відповідно приймачів і джерел енергії. Допустимим вважати значення  $\delta P \leq 5\%$ .

9. Прийняти потенціал одного із вузлів схеми таким, що дорівнює нулю. Виміряти з урахуванням знаку потенціали інших точок одного із контурів, який містить обидва джерела ЕРС. Результати вимірювань занести до табл.2.5. Побудувати потенціальну діаграму в полі рис.2.4.

Таблиця 2.5. Потенціали точок контуру

Вузол								
Потенціал, В								

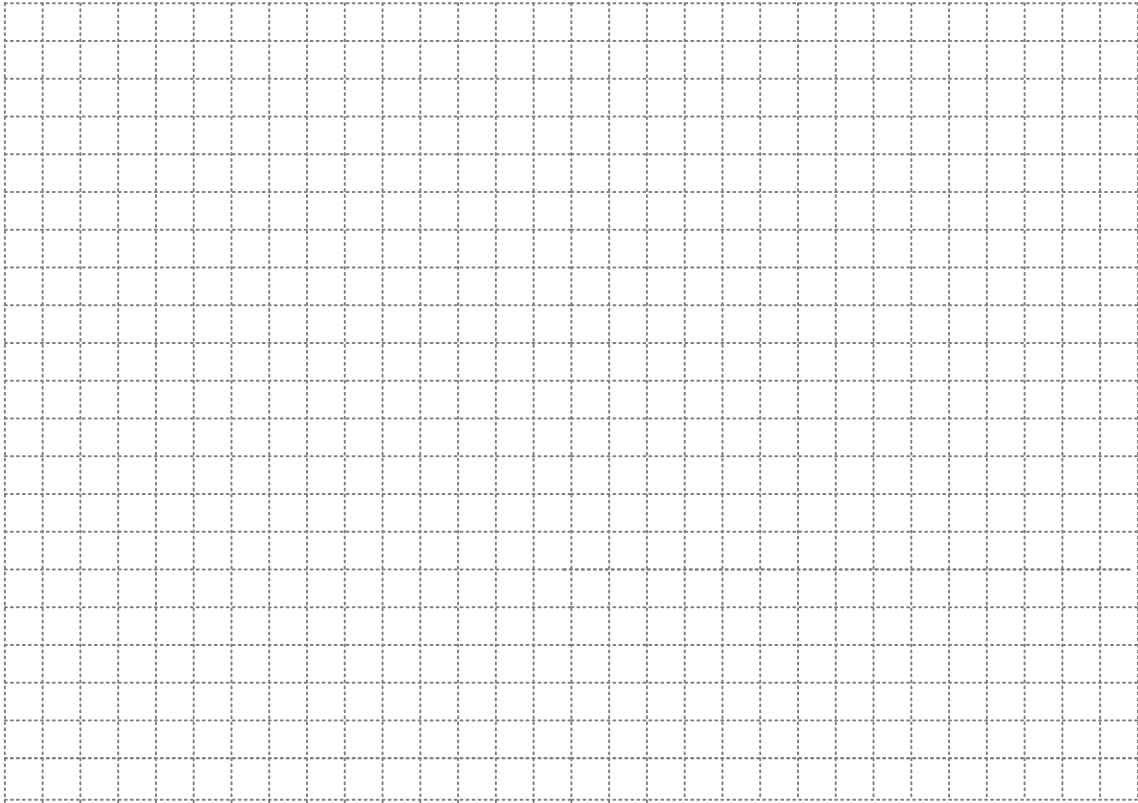


Рис. 2.4. Потенціальна діаграма

10. Перевірити правильність вимірювань, розрахувавши потенціали точок обраного контуру теоретично, використовуючи дані п.4 про струми віток. Нанести отримані значення потенціалів на графік рис. 2.4. Порівняти отримані результати та зробити висновки щодо співпадіння/неспівпадіння точок. *Рекомендується для двох графіків використати різні кольори і в легенді до графіків вказати, який графік є експериментальним, а який теоретичним.*

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

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

.....  
.....  
.....  
.....





через які протікає однаковий струм.

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

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

**Система незалежних (головних) контурів** - сукупність контурів схеми, у якій кожний наступний контур містить хоча б одну нову гілку.

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

$$\sum_i I_i = 0.$$

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 падінь напруг на елементах, що увійшли до даного контуру, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють в даному контурі:

$$\sum_i R_i I_i = \sum_m E_m.$$

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

Нехай електричне коло містить  $n$  вузлів та  $l$  віток. За першим законом 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 електрична схема містить джерела струму, то кількість невідомих струмів (а також і рівнянь) зменшується на кількість цих джерел. При цьому меншу кількість рівнянь потрібно складати 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 (закону Ома для ділянки кола, що містить джерела ЕРС):

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

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).

**Потенціальна діаграма** - графік розподілу потенціалів вздовж ділянки електричного кола або замкненого контуру. Кожній точці електричного кола відповідає своя точка на потенціальній діаграмі. При побудові діаграми потенціал однієї із точок приймається рівним нулю. Ця точка знаходиться на діаграмі на початку координат. По осі абсцис відкладаються опори ділянки електричного кола (контуру) в омах, а по осі ординат - потенціали точок кола у вольтах.

Особливості побудови потенціальної діаграми наступні:

- при проходженні контуру по осі абсцис відкладається сумарний опір елементів, що містяться між крайніми точками ділянки, яка вже пройдена;
- при проходженні джерела ЕРС вважається, що внутрішній опір джерела є рівним нулю, і потенціал відповідної точки відкладається вертикально по осі ординат вгору або вниз;
- якщо розглядається замкнений контур, то потенціальна діаграма має вид замкненої кривої, що сходиться в нульовий потенціал, зміщений по осі абсцис на величину сумарного опору контуру.

**Баланс потужностей** – у електричному колі алгебраїчна сума потужностей джерел енергії дорівнює сумі потужностей навантажень. Баланс потужностей використовується для перевірки вірності розрахунків. Похибка балансу потужностей визначається за формулою:

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

де  $P_{Д}$  – сумарна потужність джерел енергії

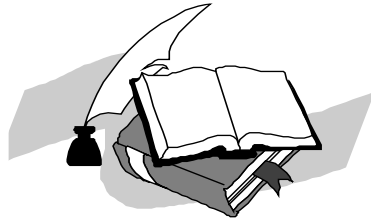
$$P_{Д} = \sum_m E_m I_m ;$$

$P_{\Pi}$  - потужність навантажень

$$P_{\Pi} = \sum_i R_i I_i^2 .$$

При розрахунку потужності джерела ЕРС враховується взаємна орієнтація напрямку струму, що протікає через джерело, та напрямку ЕРС – при співпадінні напрямів потужність буде позитивною (енергія віддається від джерела в коло), при протилежних напрямках – негативною (енергія повертається в джерело).

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



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

з кредитного модуля: „*Теорія електричних кіл*”

Тема: «*Еквівалентні перетворення складного електричного кола*»

Роботу виконав студент \_\_\_-го курсу  
факультету \_\_\_\_\_  
групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

**МЕТА:** Вивчення еквівалентних перетворень паралельних активних гілок і схем з'єднання пасивних елементів трипроменевою зіркою та трикутником.

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Накреслити схему електричного кола рис.3.1, обрану відповідно до варіанту (див. табл.3.1), в полі рис.3.2 та відобразити її модель (рис.3.3).

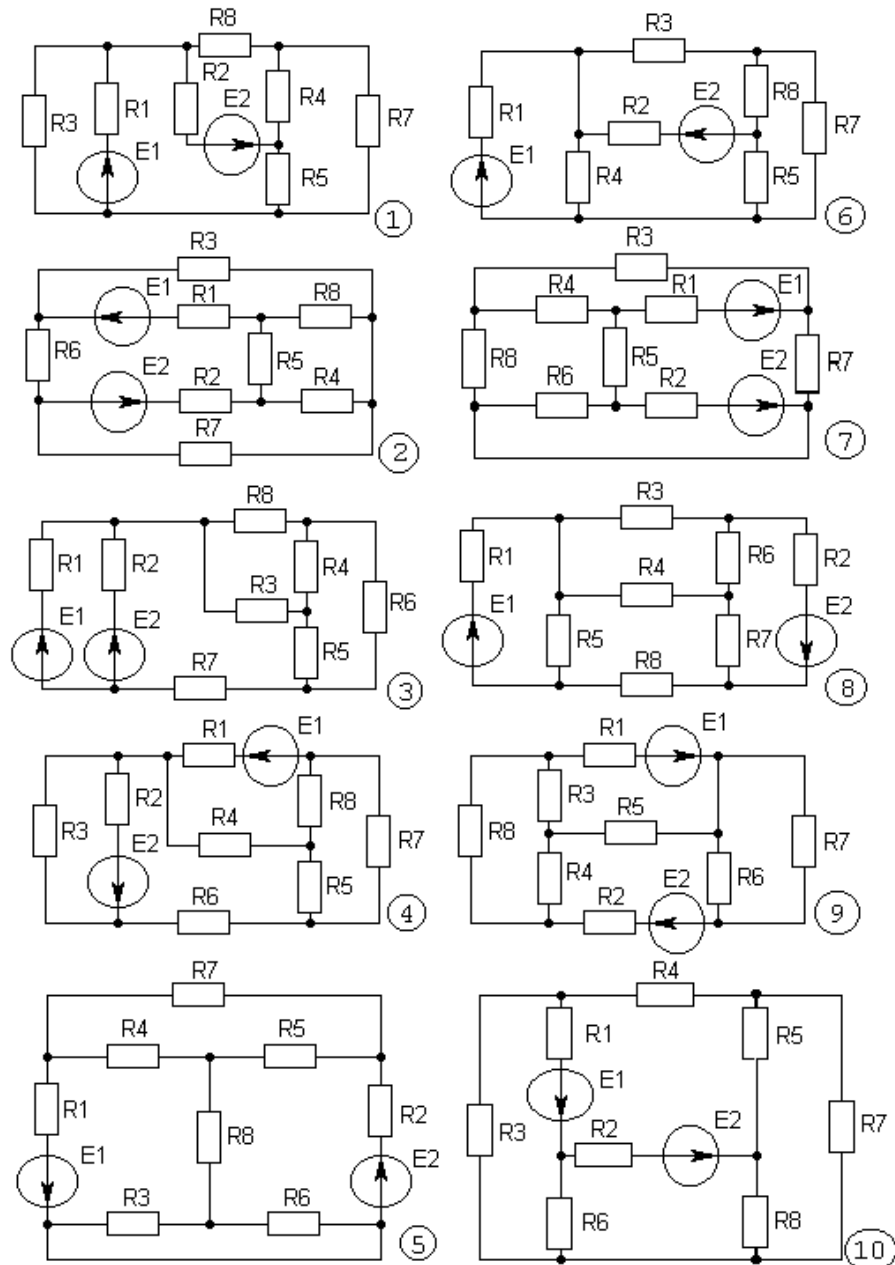


Рис. 3.1. Варіанти схем

Таблиця 3.1. Відповідність елементів схем та елементів набірного поля

Варіант	Елементи схем за рис. 3.1									
	E1, В	E2, В	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
			Номер елемента набірного поля							
1, 11	Едн <sup>#</sup>	23	01 <sup>#</sup>	02	05 <sup>#</sup>	06	03	07	08	04
2, 12	12	Едн <sup>#</sup>	01	02 <sup>#</sup>	06	07	04	05	03	08
3, 13	Едн <sup>#</sup>	15	01 <sup>#</sup>	02	03	06	05	04	08	07
4, 14	18	Едн <sup>#</sup>	01	02 <sup>#</sup>	03 <sup>#</sup>	06	05	04	07	08
5, 15	15	Едн <sup>#</sup>	01	02 <sup>#</sup>	03	04	05	06	07	08
6, 16	Едн <sup>#</sup>	18	02 <sup>#</sup>	01	03	05 <sup>#</sup>	06	07	04	08
7, 17	Едн <sup>#</sup>	15	01 <sup>#</sup>	02	03	06	05	04	07	08
8, 18	15	Едн <sup>#</sup>	01	02 <sup>#</sup>	06	04	08	05	07 <sup>#</sup>	03 <sup>#</sup>
9, 19	18	Едн <sup>#</sup>	01	03 <sup>#</sup>	02	04	05	06 <sup>#</sup>	08 <sup>#</sup>	07
10, 20	Едн <sup>#</sup>	15	01 <sup>#</sup>	02	06	04	05 <sup>#</sup>	03	07	08

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

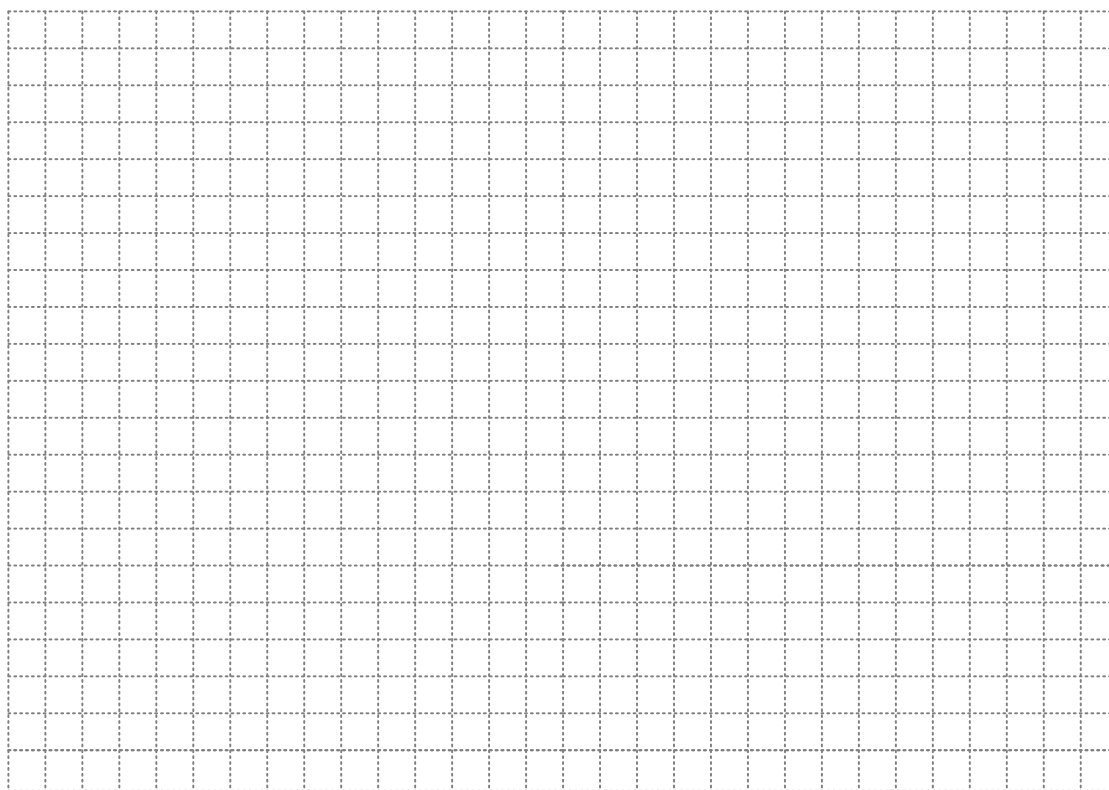


Рис. 3.2. Схема електричного кола

2. Зібрати коло в програмі, виміряти напругу та струм для всіх елементів кола. Отримані дані занести до табл.3.2.

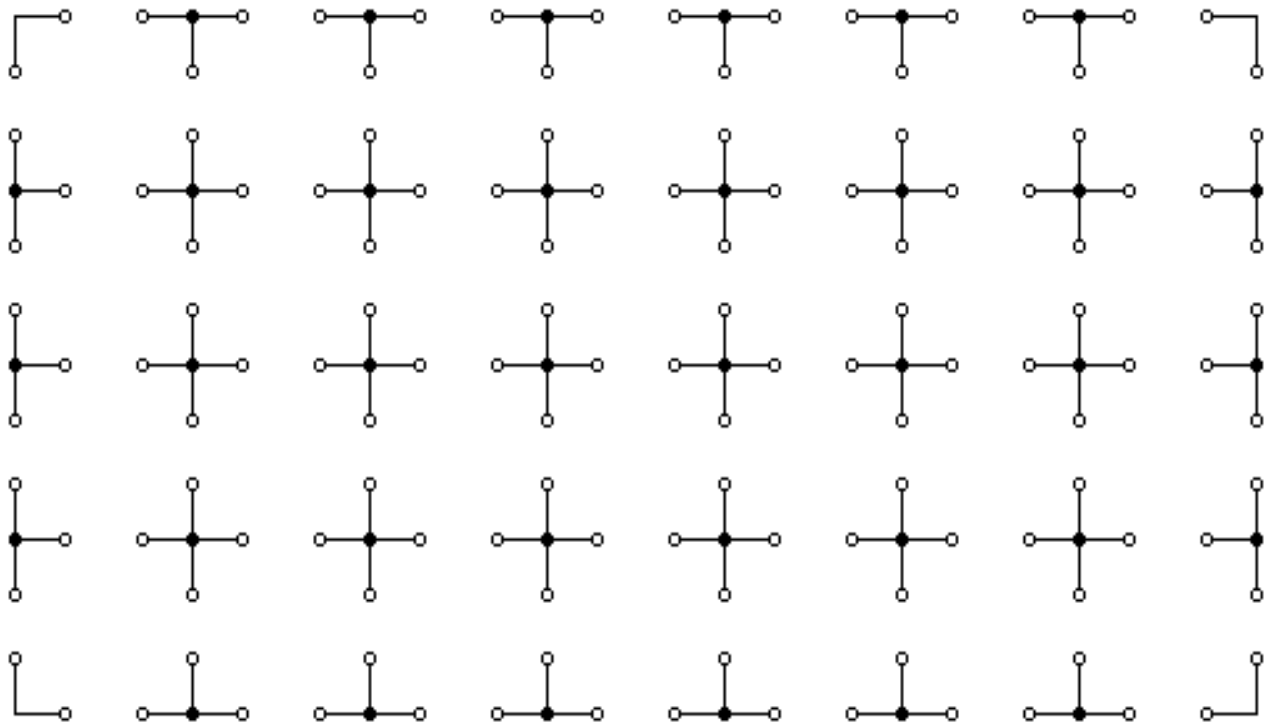


Рис. 3.3.1 Електричне коло (модель).

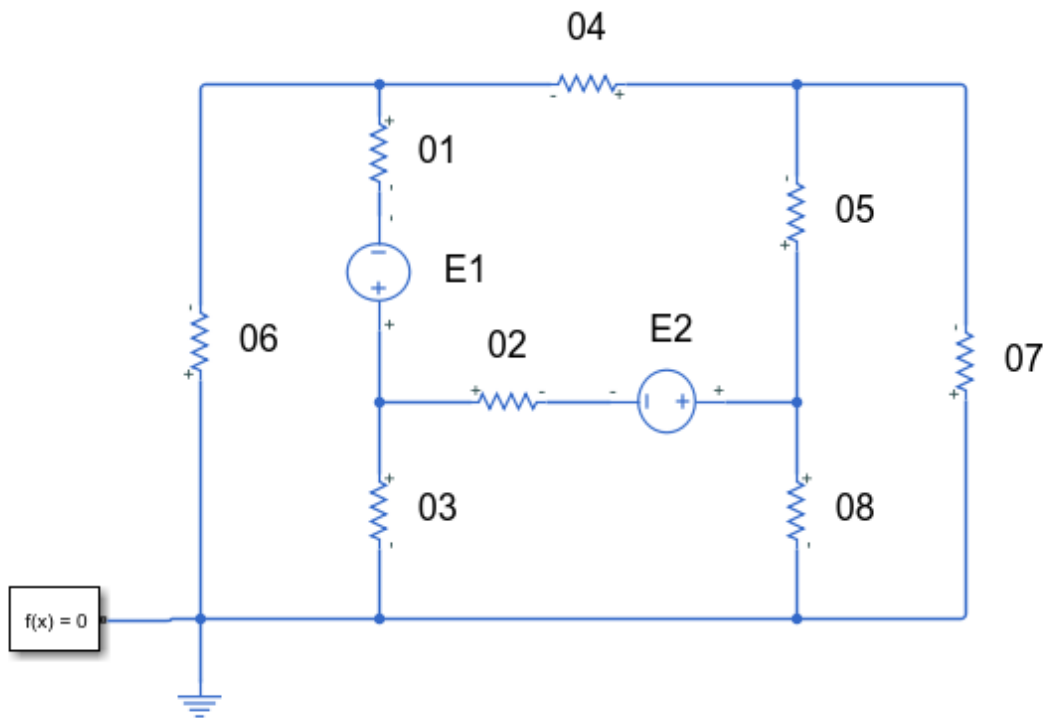


Рис. 3.3.2. Приклад електричного кола 10 варіанту в програмному середовищі Matlab Simulink.

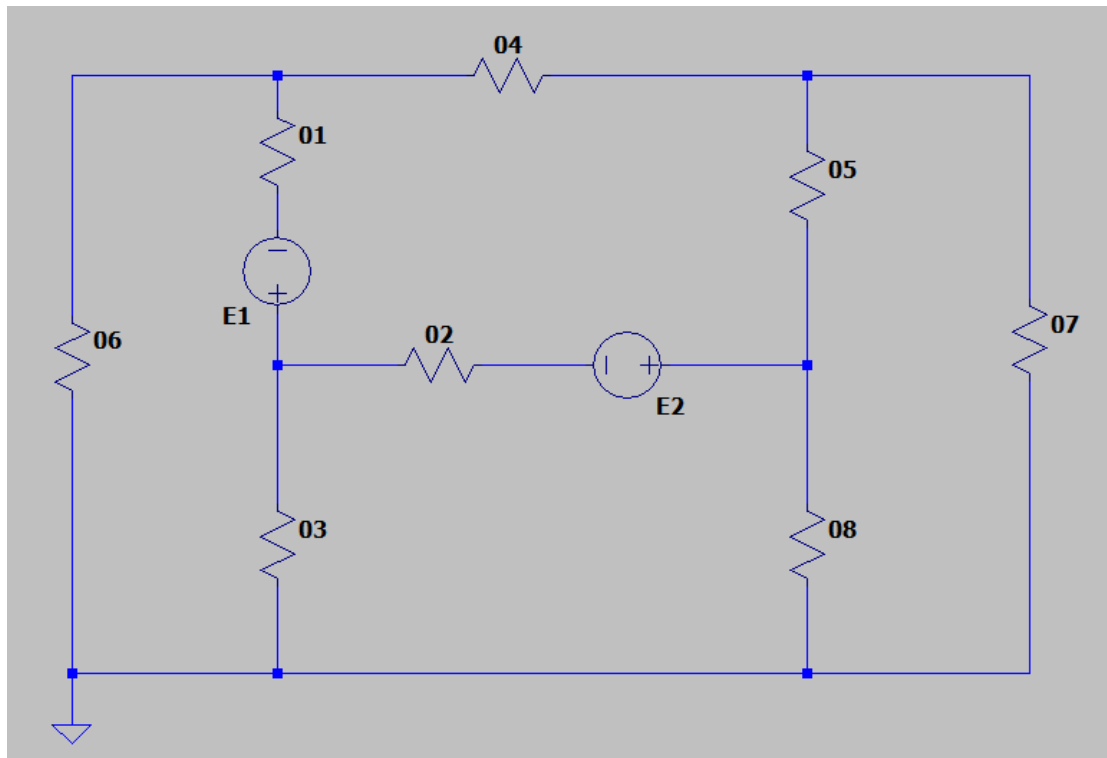


Рис. 3.3.3. Приклад електричного кола 10 варіанту в програмному середовищі LTspice.

Таблиця 3.2. Результати вимірювання напруг та струмів в початковій схемі

Елементи схеми	E1	E2	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<i>U</i> , В										
<i>I</i> , мА										
<i>P</i> , Вт										
<i>R</i> , Ом										

3. За даними п.2 обчислити потужності всіх елементів кола і фактичний опір резисторів і занести їх до табл.3.2. Оцінити виконання балансу потужності за формулою (3.1). Якщо  $\delta P > 5\%$ , з'ясувати причину і, за необхідності, повторити вимірювання.

$$\delta P = \frac{|P_{\Pi} - P_{Д}|}{(P_{\Pi} + P_{Д})/2} \times 100\% \quad (3.1)$$

.....

.....

.....

.....

.....

.....



4. Здійснити поетапні еквівалентні перетворення початкової схеми рис.3.2 з метою отримання кола, що містить не більше двох вузлів та контурів.

При цьому спочатку слід перетворити з'єднання «трикутник» у «зірку» (або навпаки), а потім замінити еквівалентними паралельні вітки. Кожна з отриманих еквівалентних схем досліджується окремо.

Накреслити схеми еквівалентних кіл, отриманих після кожного етапу перетворення, і показати їх викладачу. Для кожного етапу перетворення розрахувати значення еквівалентних опорів та джерел ЕРС.

***Дані перетворення та розрахунки здійснюються вдома на етапі підготовки до виконання лабораторної роботи.***

4.1.1. Зобразити еквівалентну схему, утворену при застосуванні перетворення «трикутник-зірка» («зірка-трикутник»), в полі рис. 3.4 та модель рис.3.5.

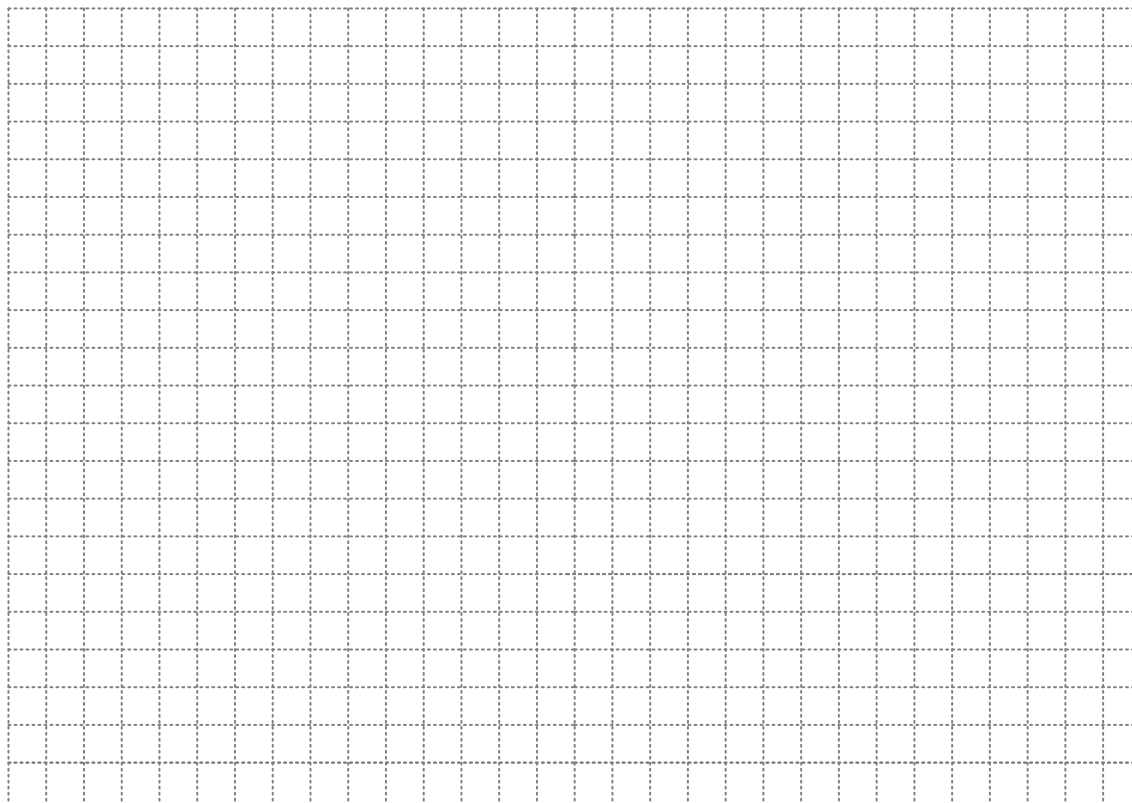


Рис. 3.4. Еквівалентна схема після перетворення «трикутник-зірка» («зірка-трикутник»)

Обчислити параметри еквівалентного з'єднання «зірка» («трикутник»).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

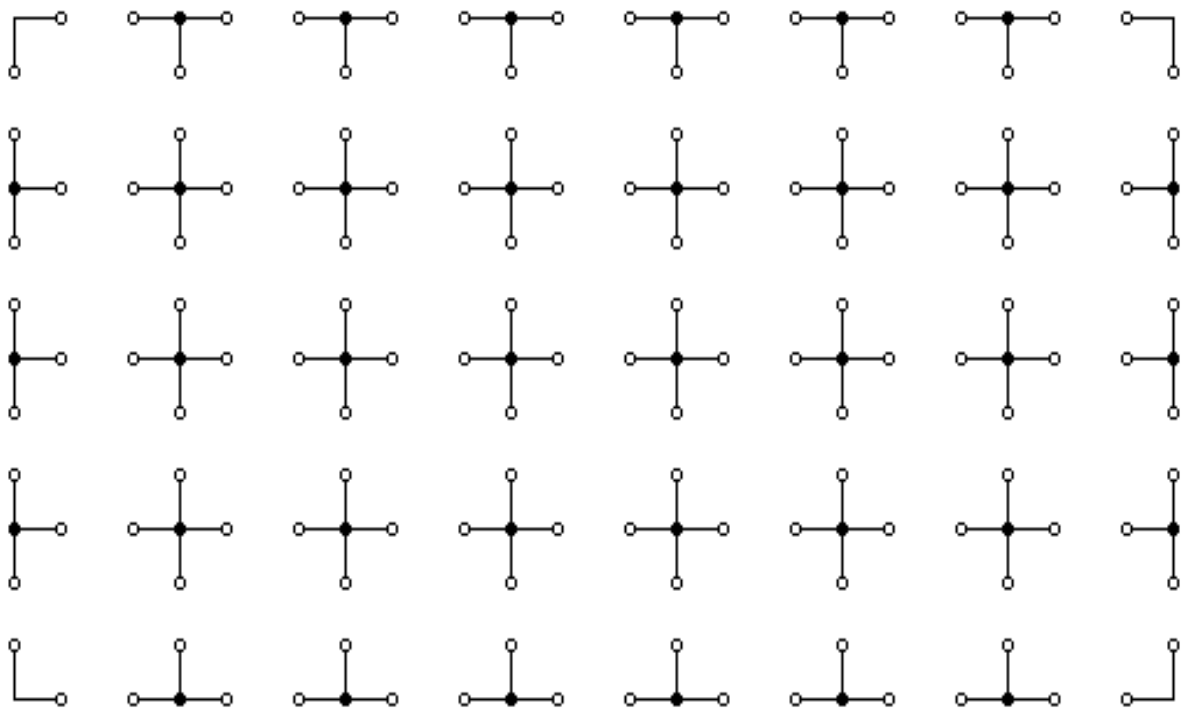


Рис. 3.5.1. Перетворена схема «трикутник-зірка» («зірка-трикутник») – модель.

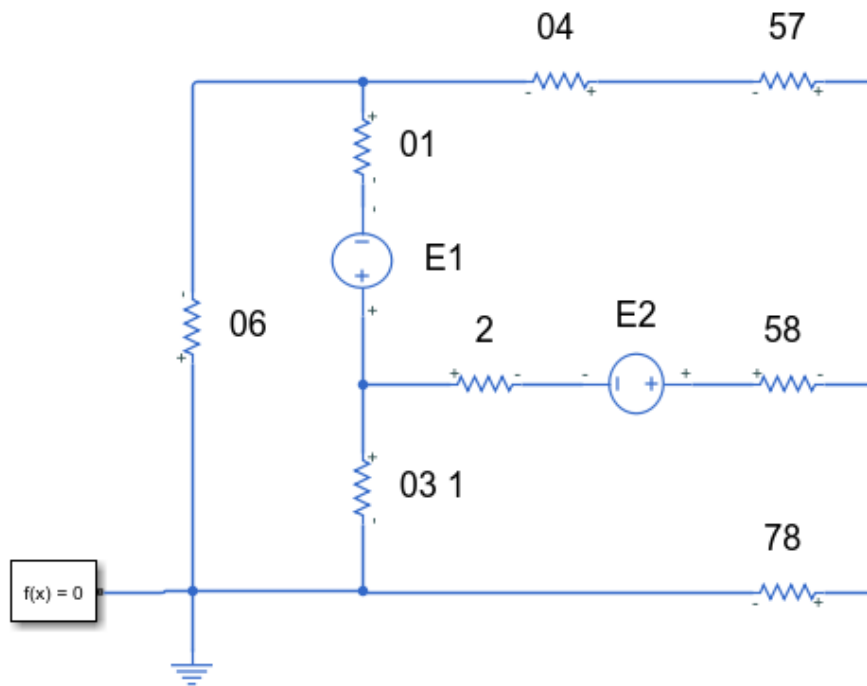


Рис. 3.5.2. Приклад перетворення «трикутник-зірка» для 10 варіанту в програмному середовищі Matlab Simulink

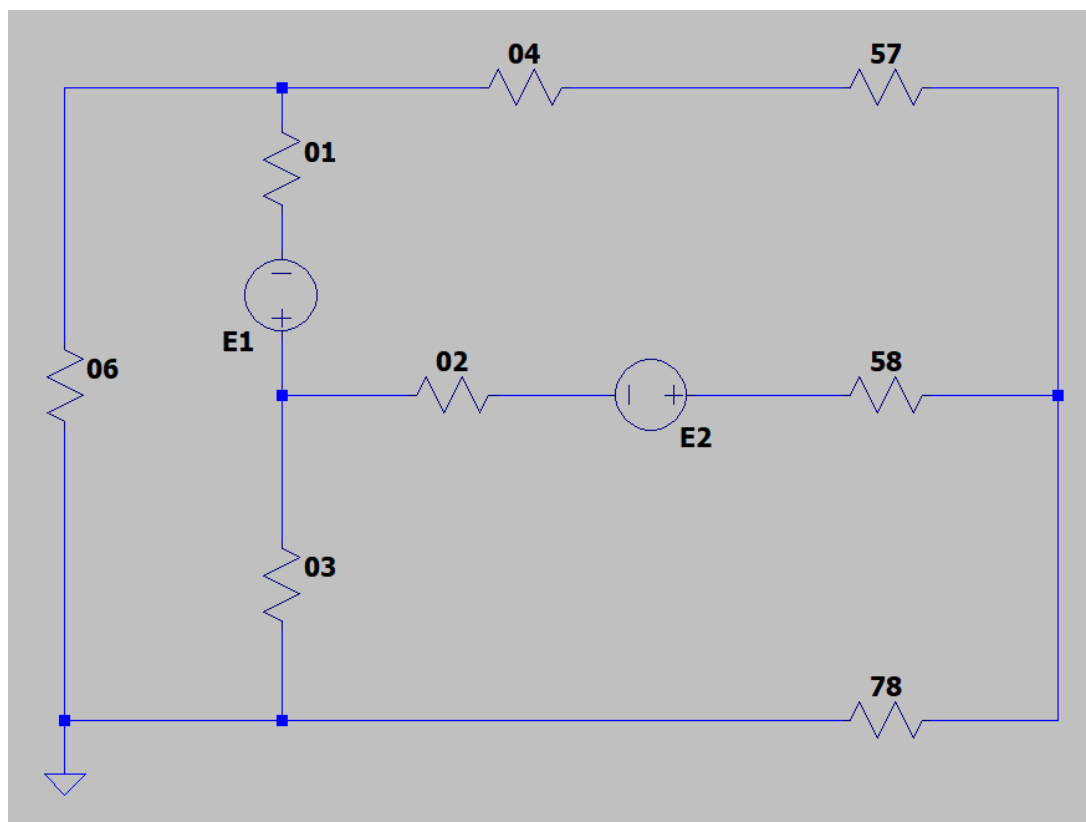


Рис. 3.5.3. Приклад перетворення «трикутник-зірка» для 10 варіанту в програмному середовищі LTspice

4.1.2. Зібрати на стенді коло, отримане після перетворення,

встановивши опори змінних резисторів такими, що дорівнюють обчисленим в п.4.1.1 (опори вимірюються мультиметром).

4.1.3. Виміряти струм і напругу на всіх елементах. Результати занести до табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Результати дослідження схеми після перетворення «трикутник-зірка»

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

4.1.4. Обчислити потужності і фактичні опори елементів перетвореного кола і оцінити виконання балансу потужності аналогічно п.3. Результати занести до табл.3.3.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4.2.1. Зобразити еквівалентну схему, утворену при застосуванні перетворення паралельних гілок з активними та пасивними елементами, в полі рис. 3.6 та модель рис.3.7.

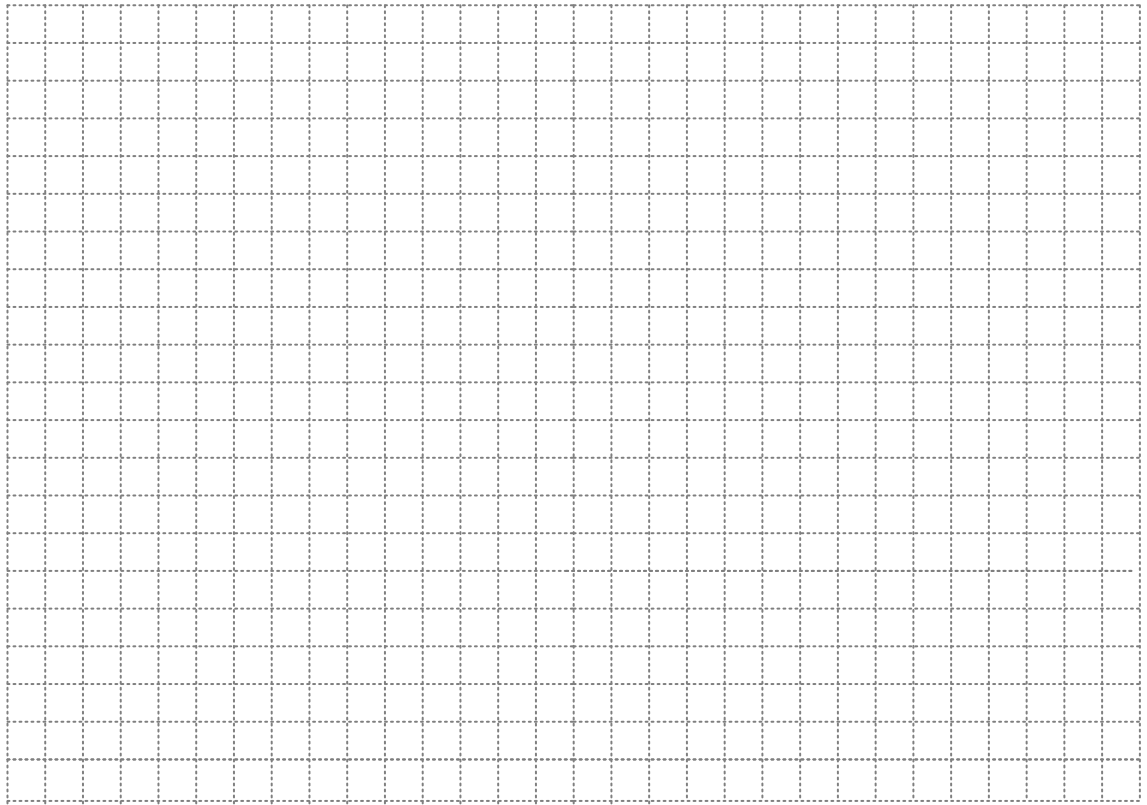


Рис. 3.6. Еквівалентна схема після перетворення паралельних з'єднань

Обчислити параметри еквівалентних елементів після перетворення паралельних/послідовних з'єднань.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

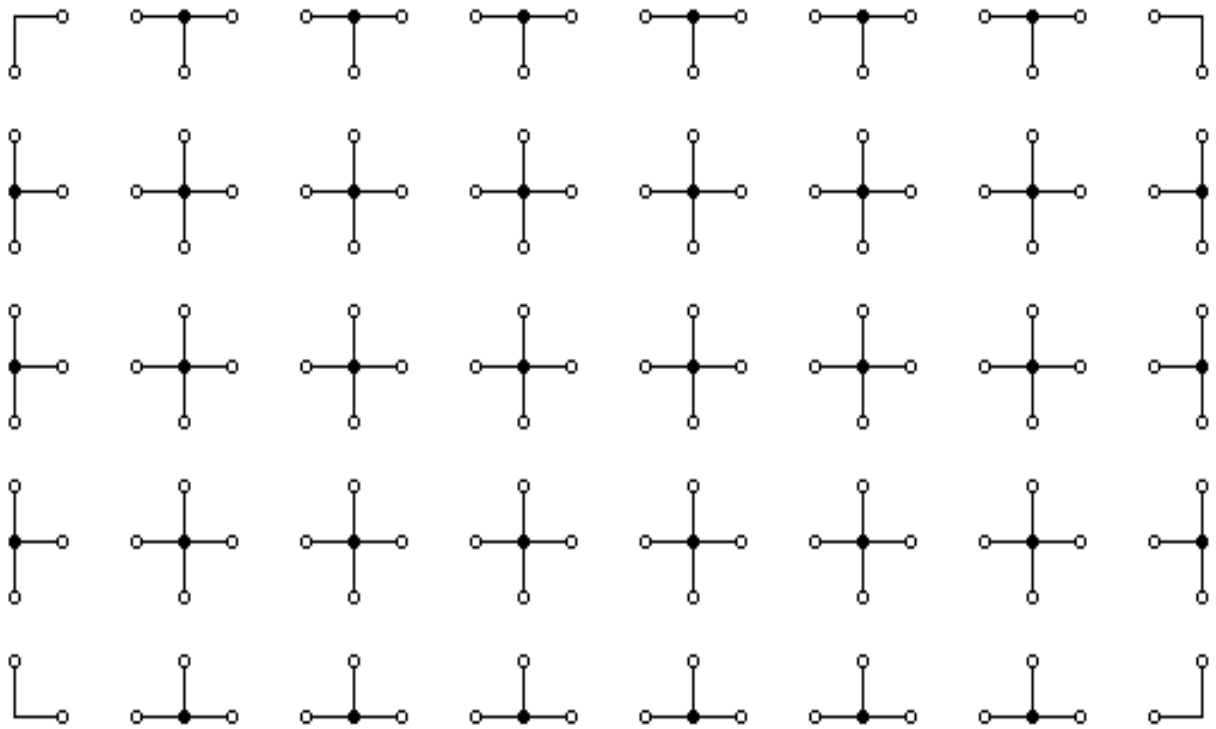


Рис. 3.7. Перетворена схема - модель

4.2.2. Зібрати отримане еквівалентне коло в програмі.

4.2.3. Виміряти струм і напругу на всіх елементах. Результати занести до табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Результати дослідження схеми після перетворення паралельних віток

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

4.2.4. Обчислити потужності і фактичні опори елементів перетвореного кола і оцінити виконання балансу потужності аналогічно п.3. Результати занести до табл.3.4.

.....

.....

.....

.....

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
5. Порівняти дані табл. 3.2-3.4 та зробити висновки по роботі, звернувши увагу на виконання умов еквівалентності при перетвореннях.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Послідовне з'єднання опорів. Дільник напруги.
2. Паралельне з'єднання опорів. Дільник 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 у електричних колах.
8. Еквівалентні перетворення симетричних схем.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

Звіт містить титульний лист і такі розділи:

1. Мета.
2. Порядок і результати виконання досліджень.
3. Принципові схеми досліджуваних кіл.
4. Розрахункові формули і розрахунки.
5. Висновки.

## 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 [3]

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

Напруга на кожному окремому резисторі

$$U_i = U \frac{R_i}{R_{\Sigma}} ,$$

де  $U$  - напруга на ділянці кола з послідовним з'єднанням елементів.

У окремому випадку, коли послідовно з'єднані два елементи будемо мати наступні співвідношення (дільник напруги):

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

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

$$G_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n G_i ; \quad R_{\Sigma} = 1 / G_{\Sigma} .$$

Якщо паралельно з'єднані два елементи, то  $R_{\Sigma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .

Для знаходження струмів при паралельному з'єднанні двох елементів використовують формулу «чужого опору» (дільника 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. При цьому ділянки з послідовним або паралельним з'єднанням елементів заміняють еквівалентними елементами за розглянутими вище правилами.

Перетворення трикутника з опорамі сторін  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  (рис.3.8.а) в еквівалентну зірку  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (рис.3.8.б) виконується згідно з формулами:

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

де  $R = R_{12} + R_{23} + R_{31}$ .

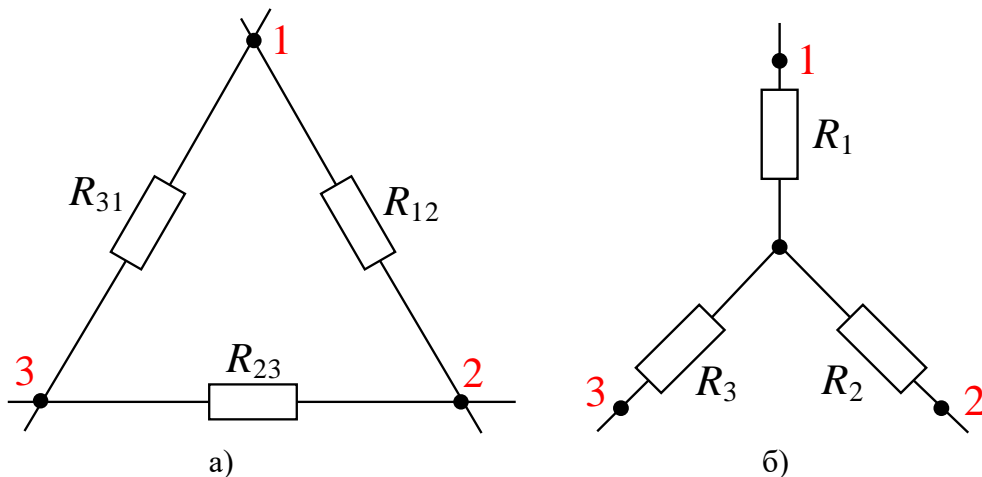


Рис.3.8. З'єднання елементів трикутником (а) та зіркою (б)

Перехід від трипроменевої зірки до трикутника:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}, \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}, \quad R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}.$$

При послідовному з'єднанні джерел напруги (рис.3.9) або паралельному з'єднанні джерел струму (рис.3.10) еквівалентне джерело напруги  $E_E$  (струму  $J_E$ ) визначається алгебраїчною сумою джерел ЕРС (струму):

$$R_E = \sum_{i=1}^n R_i, \quad E_E = \sum_{i=1}^n E_i \quad \text{- параметри еквівалентного джерела ЕРС;}$$

$$R_E = \frac{1}{\sum_{i=1}^n G_i}, \quad J_E = \sum_{i=1}^n J_i \quad \text{- параметри еквівалентного джерела струму.}$$

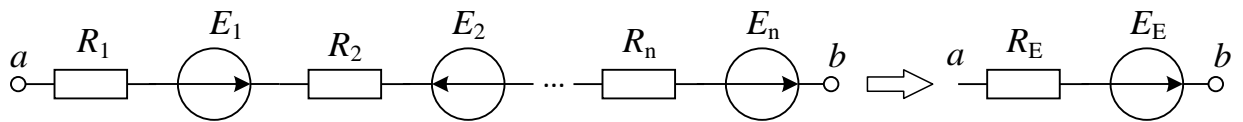


Рис.3.9. Перетворення послідовного з'єднання джерел ЕРС

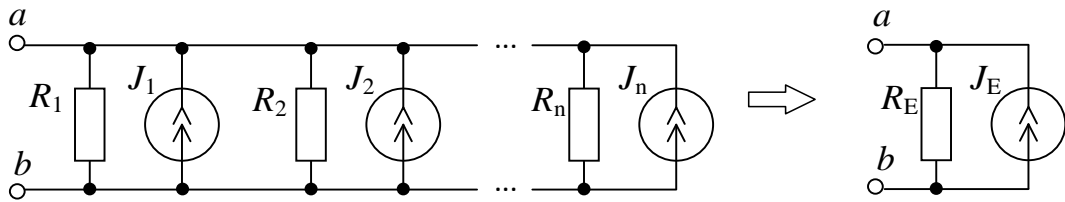


Рис.3.10. Перетворення паралельного з'єднання джерел струму

Паралельне з'єднання віток з джерелами ЕРС та джерелами струму (рис.3.11) також можна замінити одним еквівалентним джерелом ЕРС, згідно з формулами:

$$E_E = \frac{\sum_{i=1}^m E_i G_i + \sum_{j=1}^k J_j}{\sum_{s=1}^n G_s}; \quad R_E = \frac{1}{\sum_{s=1}^n G_s}.$$

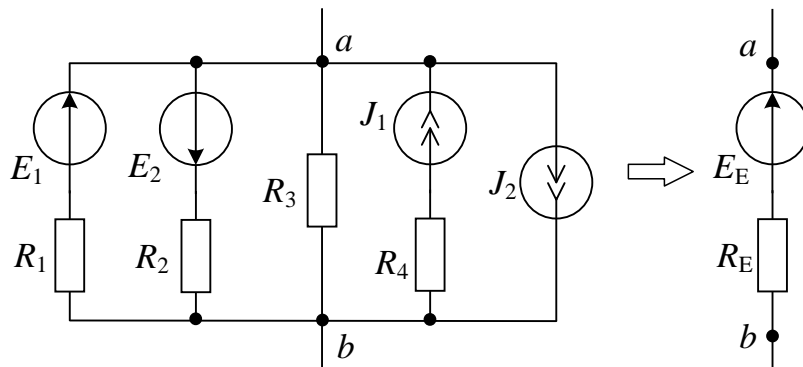


Рис.3.11. Перетворення паралельного з'єднання джерел ЕРС та струму

При знаходженні еквівалентної ЕРС потрібно враховувати напрями дії окремих джерел ЕРС та струму. Якщо ці напрями співпадають з обраним напрямом дії еквівалентного джерела, то відповідні члени суми будуть додатними, а в протилежному випадку - від'ємними. Для схеми рис.3.11 отримаємо наступні вирази:

$$R_E = \frac{1}{G_E}; \quad G_E = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}; \quad E_E = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + J_1 - J_2}{G_E}.$$

Джерело ЕРС можна перенести з будь-якої гілки схема до всіх інших віток, з'єднаних з вузлом даної вітки (рис.3.12). Причому, якщо у даній гілці джерело ЕРС було направлене до вузла, то у гілках, до яких воно переноситься, воно буде направлене від вузла та навпаки.

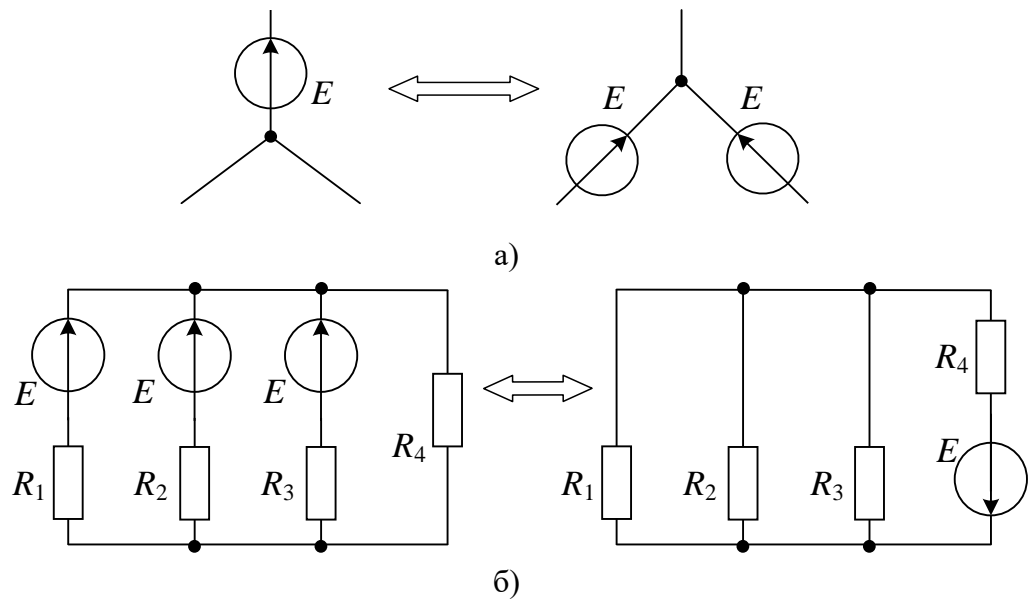


Рис.3.12. Перенесення джерел ЕРС

Джерело струму може бути замінено джерелами струму, які підключаються паралельно до всіх гілок, що утворювали контур з даним джерелом струму (рис.3.13).

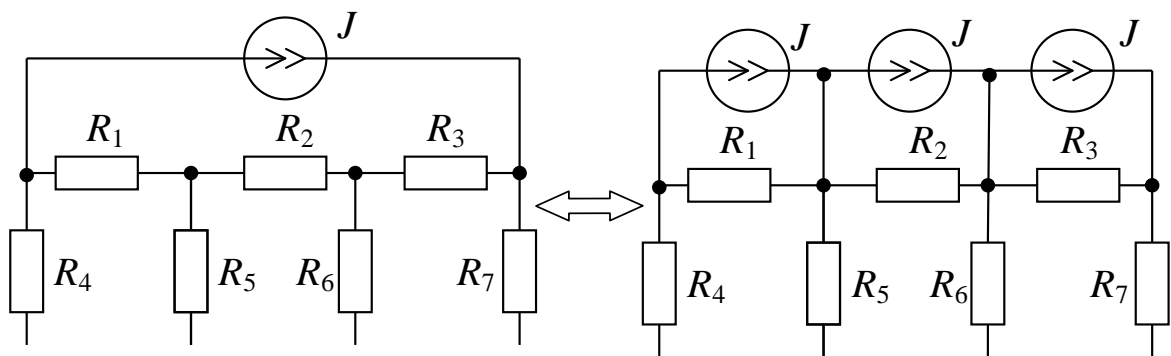


Рис.3.13. Перенесення джерела струму

**Симетричним** називають електричне коло, що має вісь симетрії (рис.3.14).

В симетричних схемах легко виділити вузли з однаковими потенціалами (вони симетрично розташовані відносно осі симетрії – на схемі рис.3.14 це, зокрема, вузли  $a$  та  $b$ ). У гілках, з'єднаних з такими вузлами, струми дорівнюють нулю (струм в опорі  $R_4$  на рис.3.14), тому їх можна розмикати, не порушуючи при цьому розподілу струмів та напруг у колі. При цьому струми у інших вітках не змінюються. Вузли з однаковими потенціалами можна

об'єднати, що також може суттєво спростити схему.

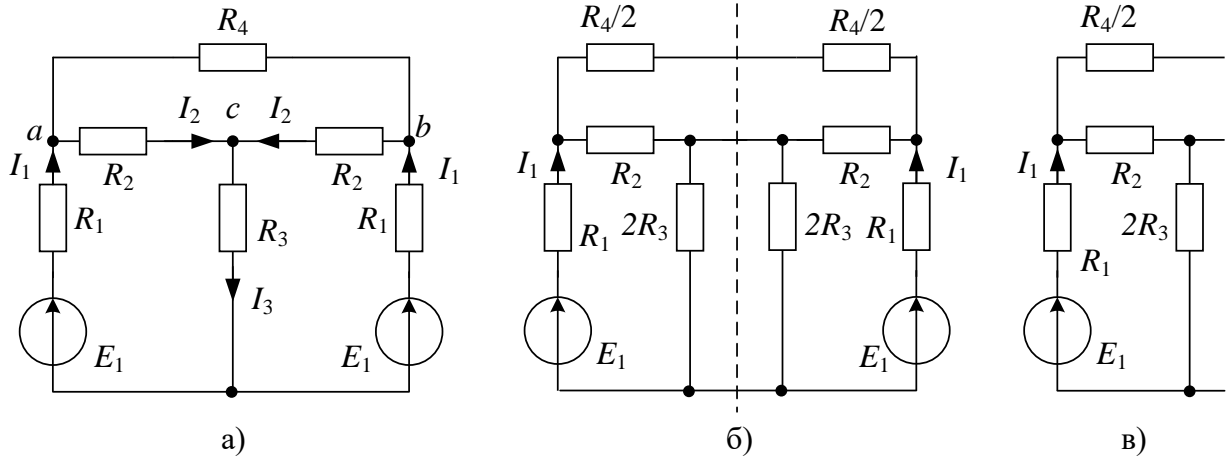


Рис.3.14. Перетворення симетричної схеми при співнаправлених джерелах ЕРС

Якщо полярність джерел у симетричній схемі протилежна (рис.3.15), то струми у симетричних гілках ( $I_1, I_1'$ ) та напруги між відповідними парами контактів, що симетрично розташовані відносно осі ( $U_{ac}, U_{bc}$ ), будуть рівними за величиною, але протилежні за знаком. Тоді напруги між усіма точками, які лежать на осі симетрії, дорівнюють нулю. А отже, всі точки, які лежать на осі симетрії, можуть бути накоротко замкнені (див. рис.3.15.в).

Прикладом симетричної схеми є мостова схема рис.3.16.а. При представленні її у формі рис.3.16.б чітко видно дві осі симетрії – вертикальну та горизонтальну.

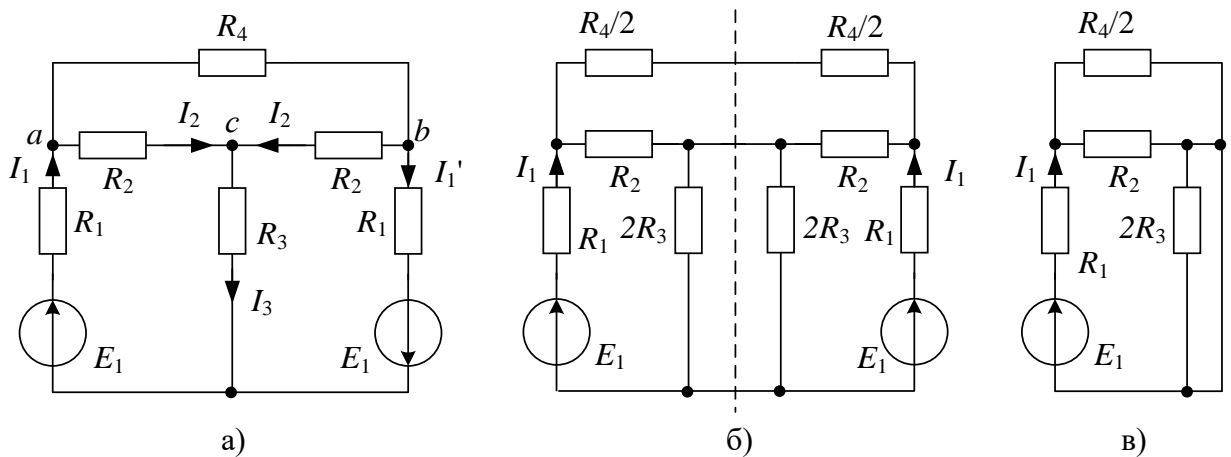


Рис.3.15. Перетворення симетричної схеми при різнонаправлених джерелах ЕРС

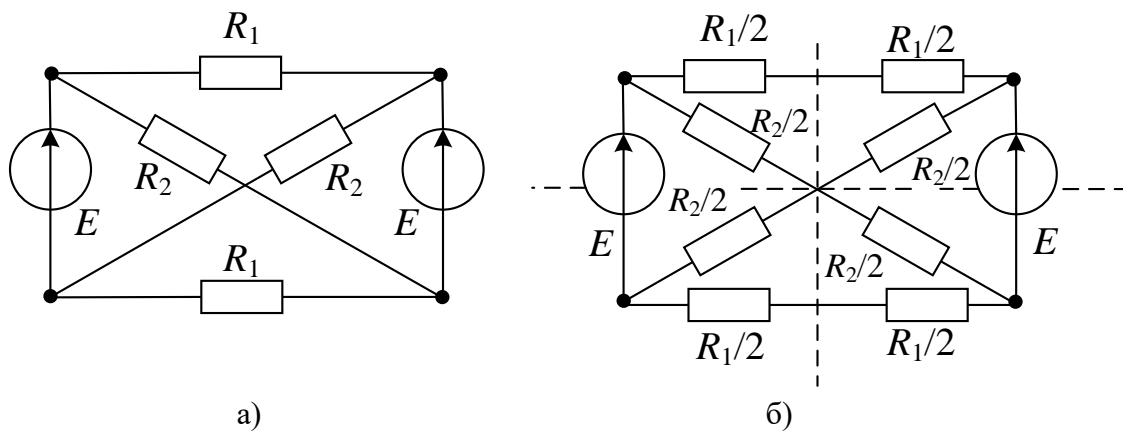


Рис.3.16. Перетворення мостової схеми для відтворення симетрії

При розгляді схеми, симетричної відносно вертикальної осі (рис.3.16.б), необхідно відмітити, що у повздовжніх вітках струм відсутній. Потенціали середніх точок поперечних (перехрещених) віток однакові. Тому повздовжні гілки можна розірвати, а середні точки поперечних гілок – об'єднати. В результаті отримується проста одноконтурна схема для розрахунку (рис.3.17.а). Якщо змінити полярність одного з джерел на протилежну, то ролі повздовжніх і поперечних гілок поміняються. Перетворена схема набуде вигляду схеми на рис. 3.17.б.

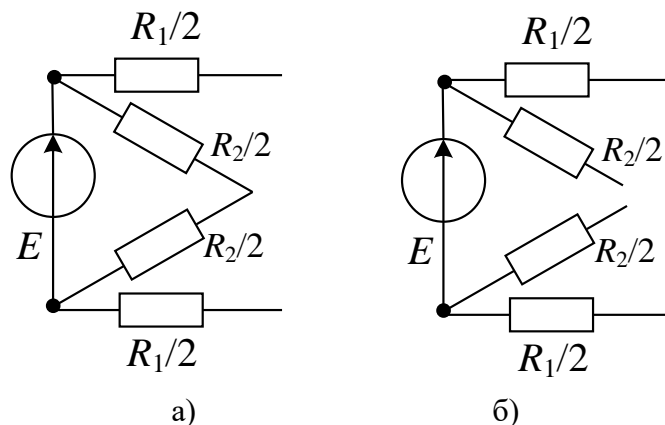
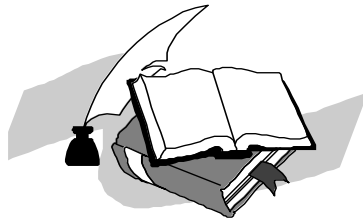


Рис.3.17. Перетворені симетричні схеми при однаково спрямованих (а) та зустрічно спрямованих (б) джерелах ЕРС

У наведених прикладах симетричних схем ЕРС джерел були однаковими. У випадку різних за величиною ЕРС джерел, перетворення симетричних схем зручно поєднувати з методом накладання.



## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4**

**з кредитного модуля: „*Теорія електричних кіл*”**

**Тема: «*Застосування законів рівноваги для аналізу електричних кіл синусоїдального струму*»**

*Роботу виконав студент \_\_\_-го курсу  
факультету \_\_\_\_\_  
групи \_\_\_\_\_*

\_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

**Київ 20\_\_ р.**

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

**ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Виміряти та розрахувати на заданій частоті параметри елементів (табл.4.1), що використовуються в схемах рис. 4.1, з використанням дослідної схеми, зображеної на рис. 4.2.

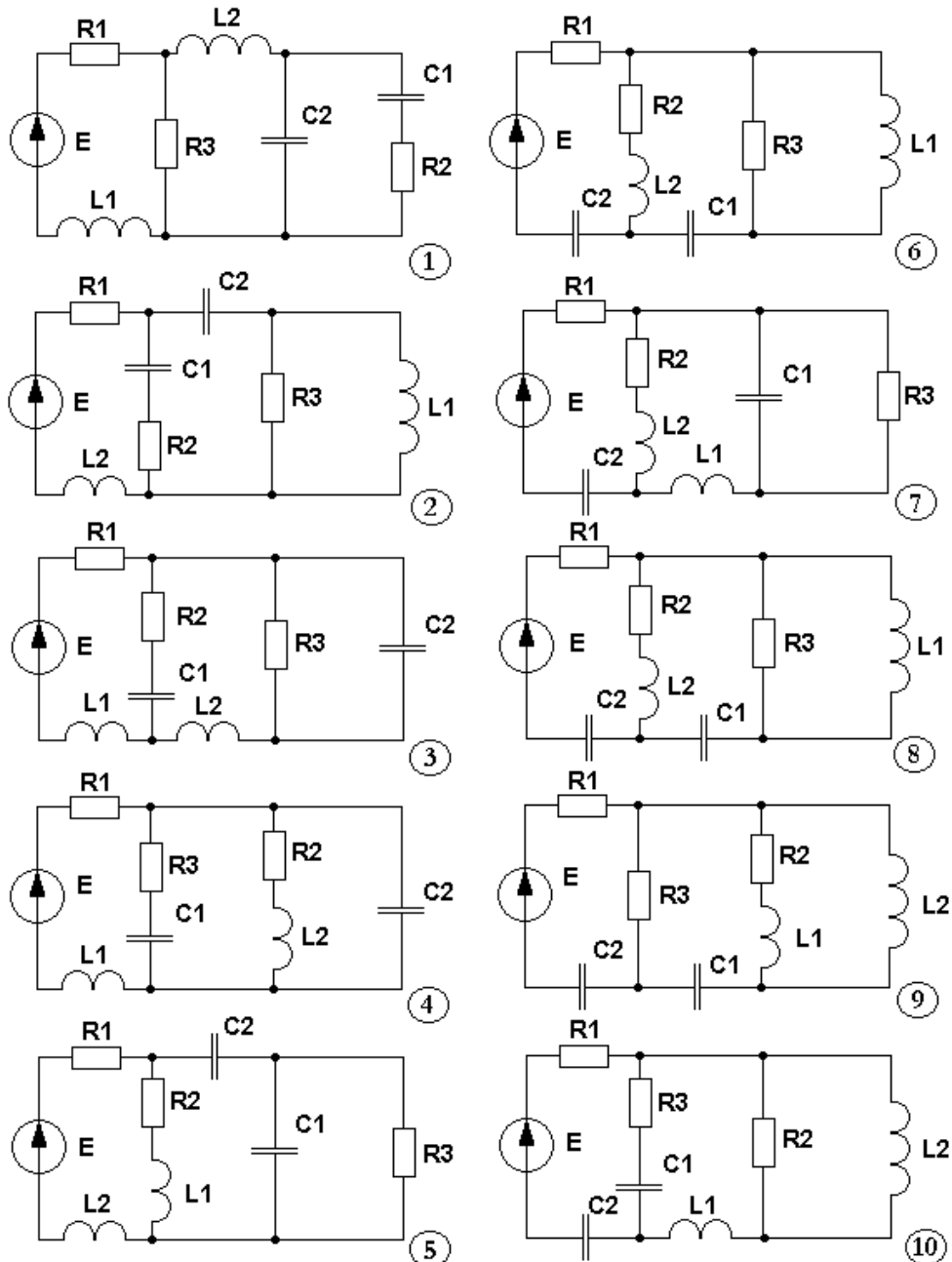


Рис. 4.1. Варіанти схем

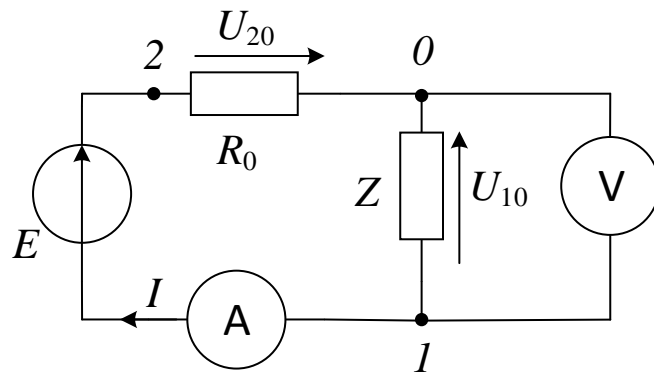


Рис. 4.2.1. Дослідна схема для визначення параметрів елементів

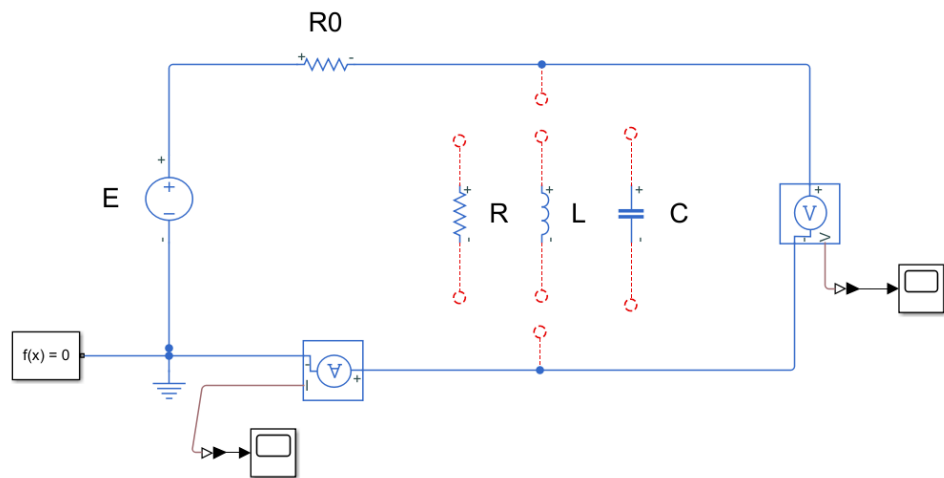


Рис. 4.2.2. Дослідна схема для визначення параметрів елементів в програмному середовищі Matlab Simulink

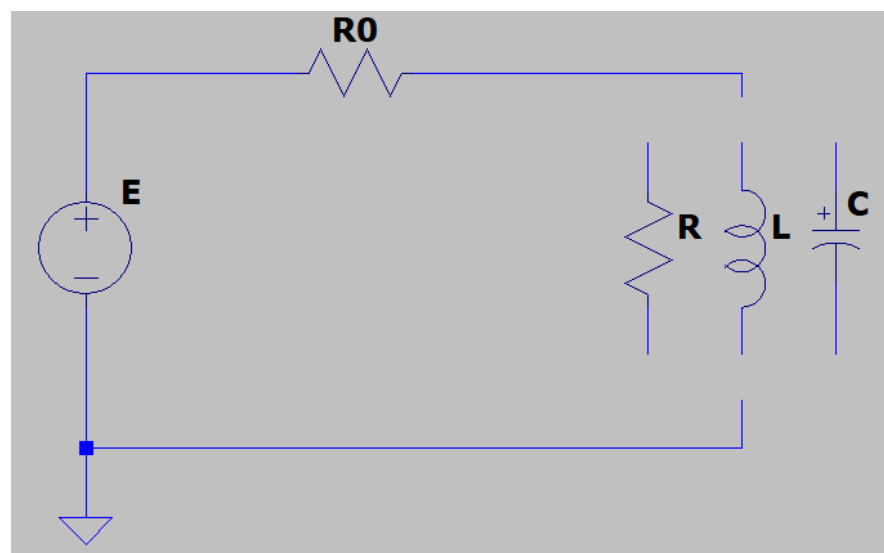


Рис. 4.2.3. Дослідна схема для визначення параметрів елементів в програмному середовищі LTspice

Для дослідження кожного елемента потрібно включити тільки його в коло і виставити потрібні значення опору, індуктивності або ємності.



В схемі рис.4.2.1. опір  $R_0$  служить для створення опорної напруги  $U_{20}$ , пропорційної до струму, що протікає в колі. Як  $R_0$  використовується блок змінного опору, в якому встановлюється значення  $R_0 = (50...100)$  Ом.

Елемент  $Z$  в схемі рис.4.2.1 імітує кожен з елементів табл.4.1, які підлягають дослідженню. Почергово встановлюючи в дану позицію кожен з елементів, вимірюють струм, напругу та фазовий зсув, які заносяться до табл.4.2. За ними обчислюються всі інші параметри елементів.

Таблиця 4.1. Параметри елементів схем рис.4.1

Вариант	Елементи схем							Параметри джерела		
	R1	R2	R3	L1, мГн	L2, мГн	C1, мкФ	C2, мкФ	E, В	$f$ , кГц	$\psi$ , °
	Номер елемента набірною поля									
1, 11	01	02	03	50	70	1	2	20	3,0	30
2, 12	01	03	02	55	65	1	2	19	2,0	45
3, 13	02	01	03	60	50	1	2	18	3,0	- 90
4, 14	02	01	03	65	55	1	2	20	2,0	90
5, 15	01	02	03	50	60	1	2	19	2,5	- 30
6, 16	01	03	02	55	65	1	2	18	3,0	60
7, 17	01	02	03	60	70	1	2	20	2,5	- 60
8, 18	01	03	02	65	50	1	2	18	2,0	120
9, 19	02	01	03	70	55	1	2	19	2,5	- 45
10, 20	02	01	03	55	70	1	2	20	2,0	30

Перед початком вимірювань необхідно встановити мінімальне значення напруги джерела  $E$ , а потім збільшити його до значення (8...12) В. При цьому струм у колі повинен бути у діапазоні (0,05...0,25) А.

Частота змінної напруги виставляється рівною заданій в табл.4.1.

Для того, щоб визначити кут зсуву фаз  $\varphi$  для кожного з досліджуваних елементів, фазометром вимірюється зсув за фазою напруги  $U_{20}$  відносно напруги  $U_{10}$ .

Таблиця 4.2. Результати вимірювання параметрів елементів схем рис.4.1

Елементи	$U$ , В	$I$ , мА	$\varphi$ , °	$Z$ , Ом	$R$ , Ом	$X$ , Ом	$L$ , мГн	$C$ , мкФ
R1								
R2								
R3								
L1								
L2								
C1								
C2								

2. Зобразити в полі рис. 4.3 схему досліджуваного кола з множини показаних на рис.4.1, відповідно до необхідного варіанту, а в полі рис.4.4.1 – модель. Задатись позитивними напрямками струмів у гілках і вказати їх на схемі.

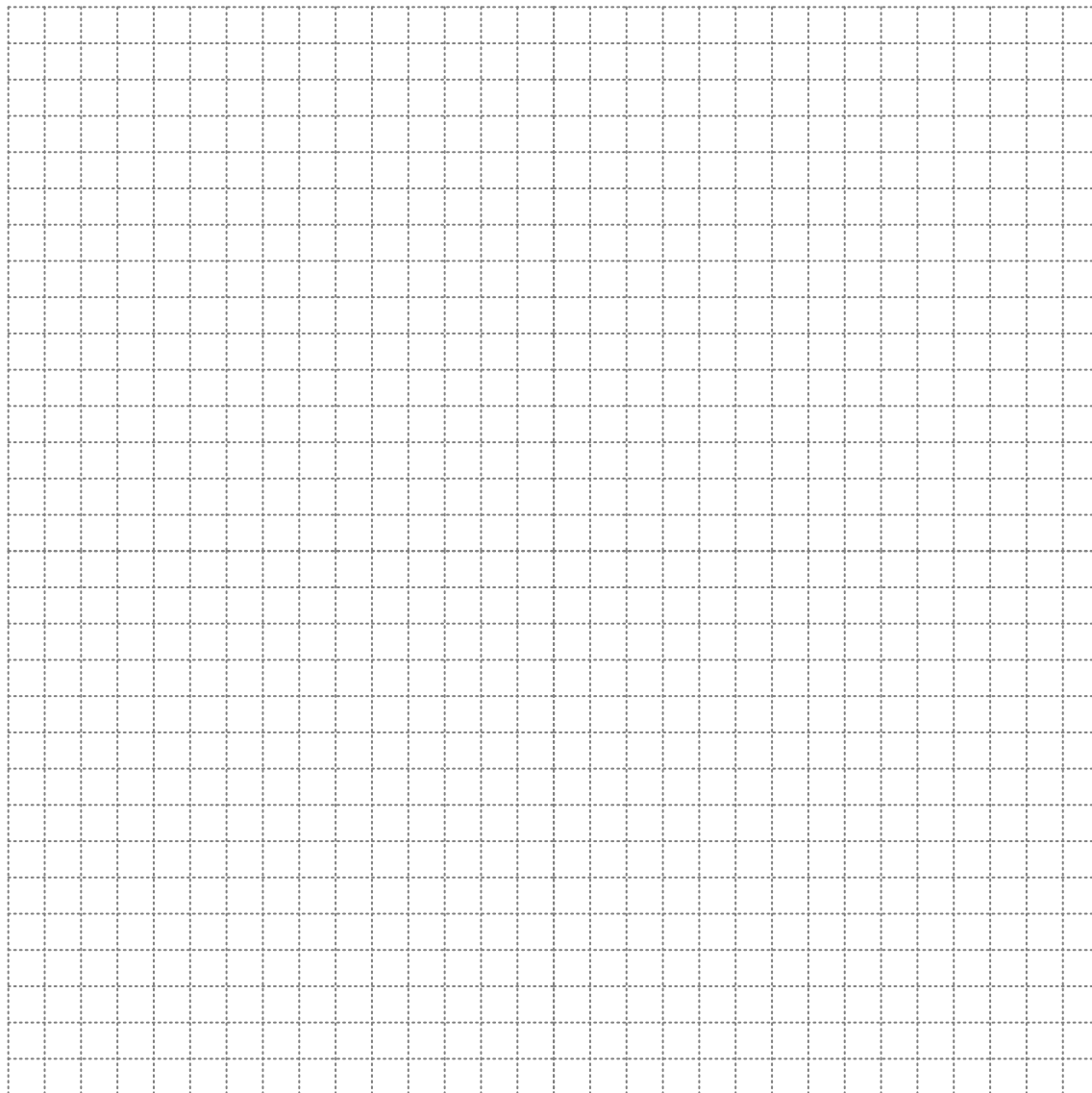


Рис. 4.3. Схема електричного кола

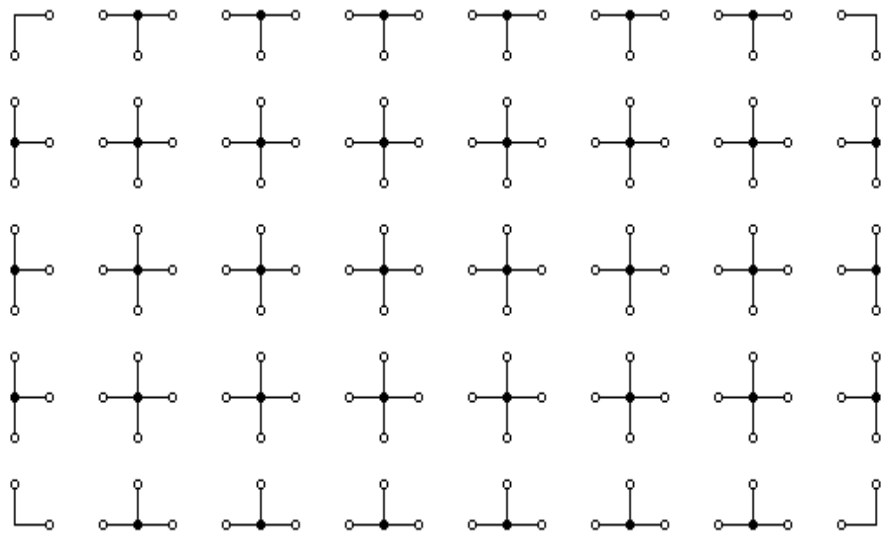


Рис. 4.4.1. Електричне коло в програмі (модель)

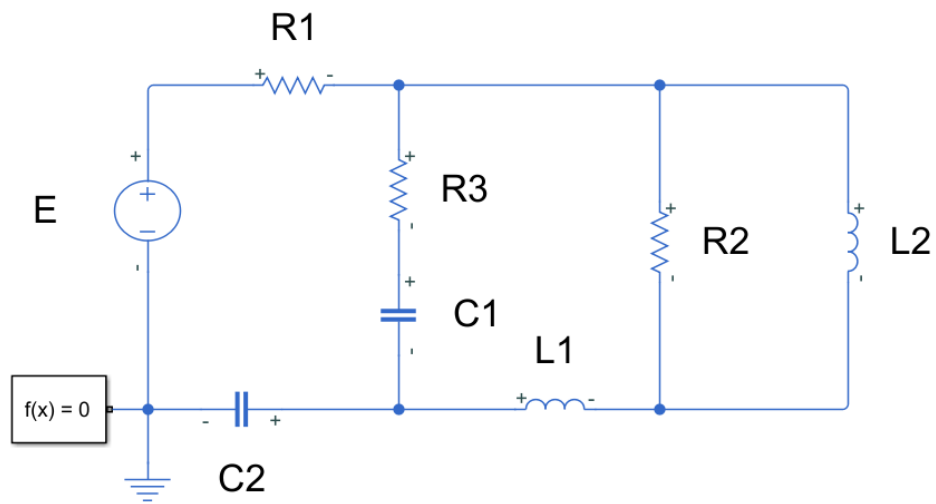


Рис. 4.4.2. Приклад електричного кола 10 варіанту в програмному середовищі Matlab Simulink

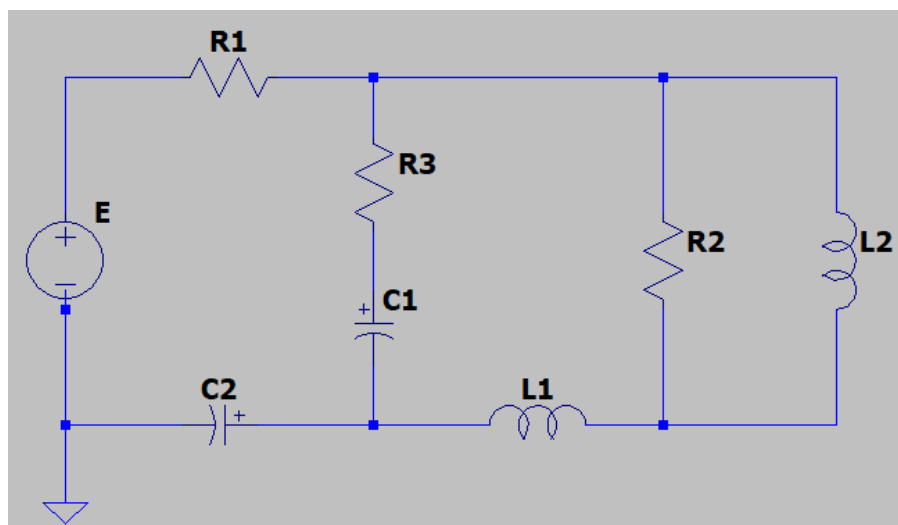


Рис. 4.4.3. Приклад електричного кола 10 варіанту в програмному середовищі LTspice

3. Виміряти значення струмів у всіх гілках кола рис.4.3. Прийнявши початкову фазу джерела ЕРС рівною заданій у табл.4.1, визначити початкові фази струмів у вітках з резисторами. Для цього фазометром послідовно виміряти зсуви за фазою напруг резисторів відносно напруги джерела ЕРС. Зсув фаз вимірювати відносно джерела, при цьому між напругою джерела та напругою досліджуваного елемента має бути спільна точка.

Результати вимірювання струмів та фазових зсувів, 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. Результати вимірювання струмів

Комплекси струмів	Модуль, мА	Покази фазометра, ...°	Аргумент, ...°	Примітки
$I_1$				Початкова фаза ЕРС джерела ...°
$I_2$				
$I_3$				
$I_4$				
$I_5$				

4. За комплексами струмів одного з вузлів обчислити комплекс струму гілки, що не містить резистора. Модуль цього комплексу порівняти з діючим значенням струму, виміряним в п.3. При значних розбіжностях (більше 10%) повторити п.3 або скоригувати розрахунок. За даним табл. 4.3 побудувати векторну діаграму струмів для одного з вузлів в полі рис.4.5.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

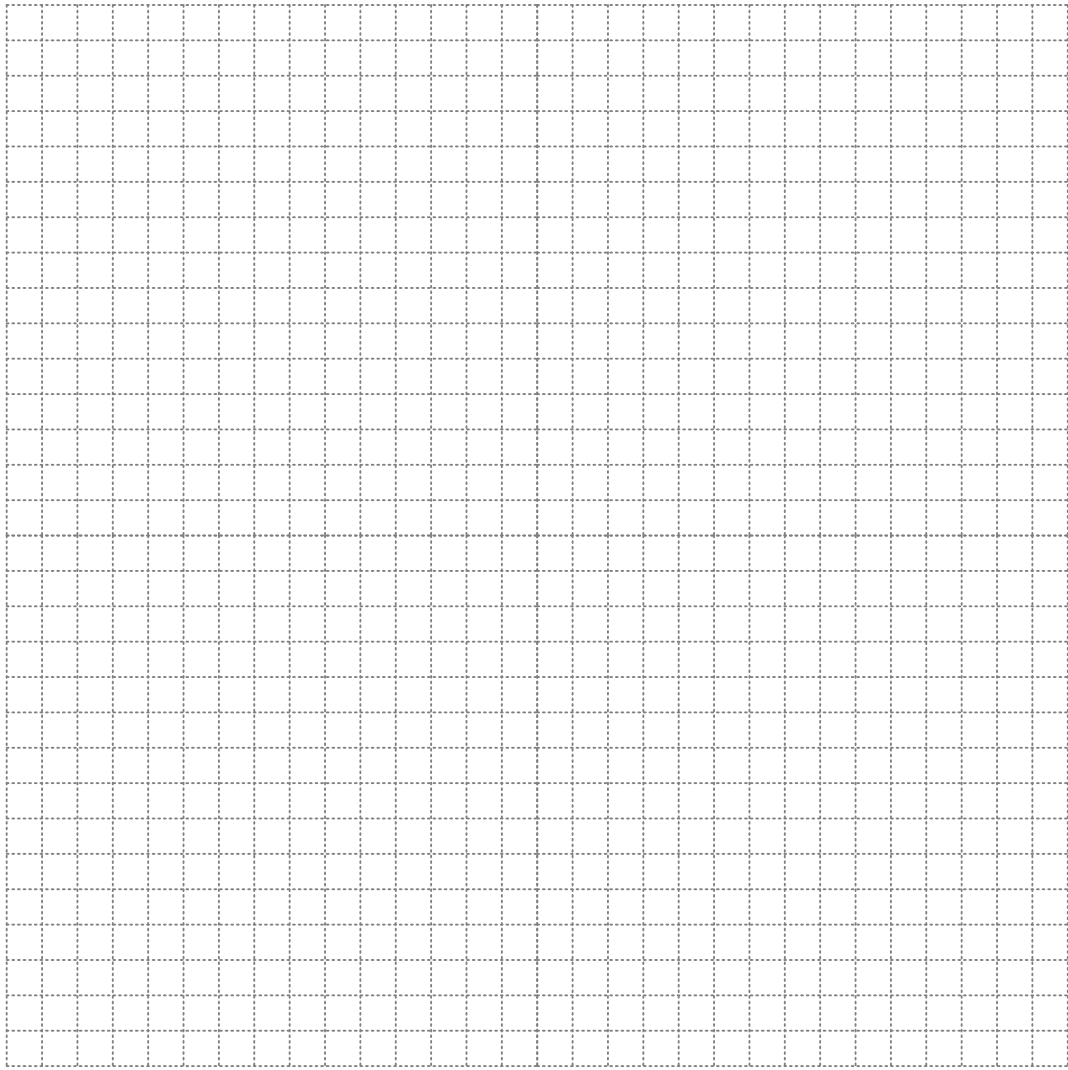


Рис. 4.5. Векторна діаграма струмів

5. Виміряти діючі значення і фазові зсуви напруг на всіх елементах досліджуваного кола рис. 4.3. Обчислити початкові фази напруг із урахуванням початкової фази ЕРС джерела. Результати обчислень і вимірювань занести до табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Діючі значення і фазові зсуви напруг

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

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

6. За даними п.5 побудувати топографічну діаграму для зовнішнього контуру кола рис.4.3. Діаграму (рис.4.6) використовувати для оцінки правильності виконаних вимірювань. При значних відмінностях 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 у колі. Результати обчислень занести до табл. 4.5.

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

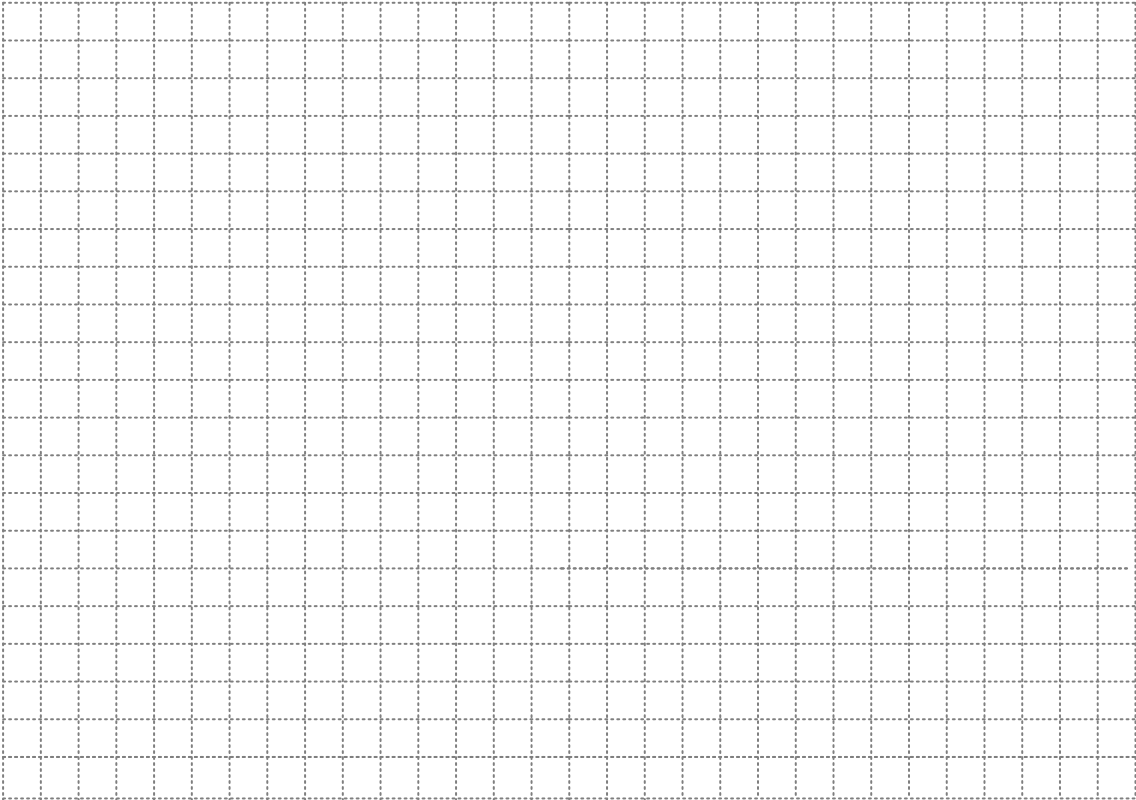


Рис. 4.6. Топографічна діаграма

Оцінити правильність виконаних вимірювань і обчислень.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Таблиця 4.5. Потужності в колі

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

Таблиця 4.6. Баланс потужностей

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

8. 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, діюче значення синусоїдального струму і напруги.
3. Активний, реактивний, 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 і їх експериментальне визначення.



9. Закони Ома і Кірхгофа у комплексній формі.
10. Миттєва, активна, реактивна, повна, комплексна потужність.
11. Топографічні і векторні діаграми і 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.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

Звіт містить титульний лист і такі розділи:

1. Мета.
2. Порядок і результати виконання досліджень.
3. Принципові схеми досліджуваних кіл.
4. Розрахункові формули і розрахунки.
5. Висновки.

## ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Синусоїдальний струм** - це струм, який змінюється в часі за синусоїдальним законом (рис. 4.7) [4]:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi) = I_m \sin(2\pi t/T + \psi).$$

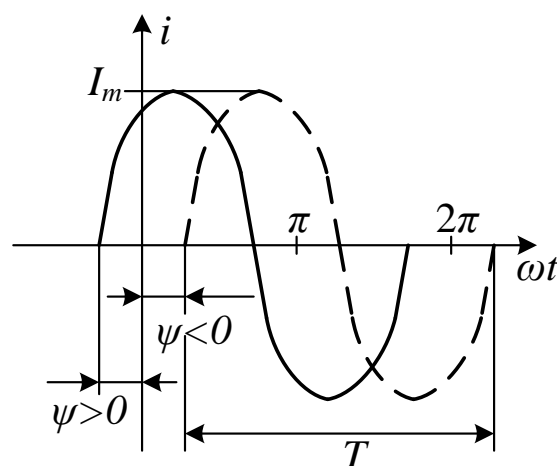


Рис. 4.7

Максимальне значення функції протягом періоду дії сигналу  $I_m$  називають **амплітудою**.

Час, за який здійснюється одне повне коливання, називається **періодом** і позначається літерою  $T$ .

Величина, обернена до періоду, називається **частотою** і визначає число коливань за 1 секунду:

$$f = 1/T.$$

**Кутова частота** визначається через лінійну частоту і характеризує обертання вектора, яким описується синусоїдальна функція в комплексній площині:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T.$$

Частоту  $f$  вимірюють в герцах (Гц), а кутову частоту  $\omega$  в радіанах за секунду (рад/с або  $\text{с}^{-1}$ ).

Аргумент синусу ( $\omega t + \psi$ ) називають **фазою** - він характеризує стан коливання (числове значення) у даний момент часу.

Для синусоїдальної функції важливими є такі параметри як середнє та діюче значення.

**Середнім значенням** синусоїдального струму називають його значення за півперіоду, яке визначається як інтеграл від миттєвого значення:

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

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

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

Оскільки в колах синусоїдального струму струм, напруга та ЕРС є величинами, що характеризуються фазою, при розрахунках електричних кіл користуються миттєвими або комплексними величинами, які описуються амплітудою  $I_m$ , фазою ( $\omega t + \psi$ ), початковою фазою  $\psi$  та кутовою частотою  $\omega$ .

Для зручності розрахунків вводиться поняття **комплексної амплітуди**, яка пов'язує ці параметри і зображує миттєвий струм  $i(t)$  на комплексній площині для моменту часу  $\omega t = 0$  (рис.4.8):

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} \Big|_{\omega t = 0} = I_m e^{j\psi} = \dot{I}_m. \quad (4.1)$$

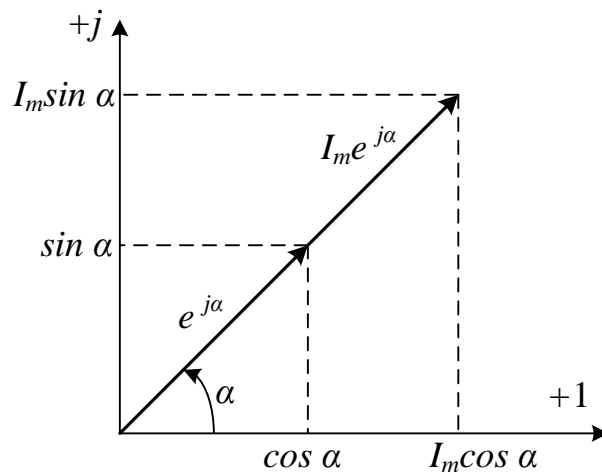


Рис.4.8. Зображення синусоїдальної функції на комплексній площині

Форма запису (4.1) є правомірною також для напруг та ЕРС.

При визначенні потужності в колах змінного струму потрібно пам'ятати, що окрім **активної потужності**  $P$ , характерної для резисторів, в таких колах присутня також **реактивна потужність**  $Q$ , яка описує процеси перерозподілу енергії електричного і магнітного полів в конденсаторах та котушках індуктивності відповідно. Тому користуються поняттям **повної потужності**  $S$ :

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad [VA].$$

Повна потужність може бути записана в комплексній формі:

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^* = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ,$$

де  $\dot{I}^*$  - комплексно спряжене значення струму:

$$\dot{I}^* = I e^{-j\psi}.$$

Важливо пам'ятати, що при розрахунку потужностей використовуються виключно діючі значення струмів та напруг як в звичайній, так і в комплексній формі запису!

### Особливості вимірювання фаз

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

Тому при вимірюваннях потрібно враховувати, співпадають чи не співпадають напрями напруг у колі  $U_{AB}$  та  $U_{BC}$  з напрямками напруг  $U_1$  та  $U_2$ , кут зсуву фаз яких вимірює прилад (рис. 4.9,а).

Так, покази кута  $\varphi$  для приладу, підключеного згідно з рис.4.9,а відповідають зсуву за фазою напруги  $U_2 = U_{BC}$  відносно  $U_1 = U_{AB}$  (векторна діаграма на рис.4.9.б). Причому початкова фаза напруги  $U_{BC}$  буде визначатися через початкову фазу напруги  $U_{AB}$ , з урахуванням кута  $\varphi$  та коригувального коефіцієнта  $\pm\pi$ :

$$\psi_{BC} = \psi_{AB} + \varphi \pm \pi.$$

Оскільки значення кута  $\varphi$  можуть бути додатними або від'ємними (на рис. 4.9,б позитивному куту відповідає вектор  $U_{BC}$ , а негативному  $-U_{BC}$ ), за рахунок коригувального коефіцієнта забезпечується правильне значення фазового зсуву між векторами: якщо взаємні напрями напруг у колі та на приладі співпадають, то корекція значення  $\psi$  на величину  $\pi$  не потрібна.

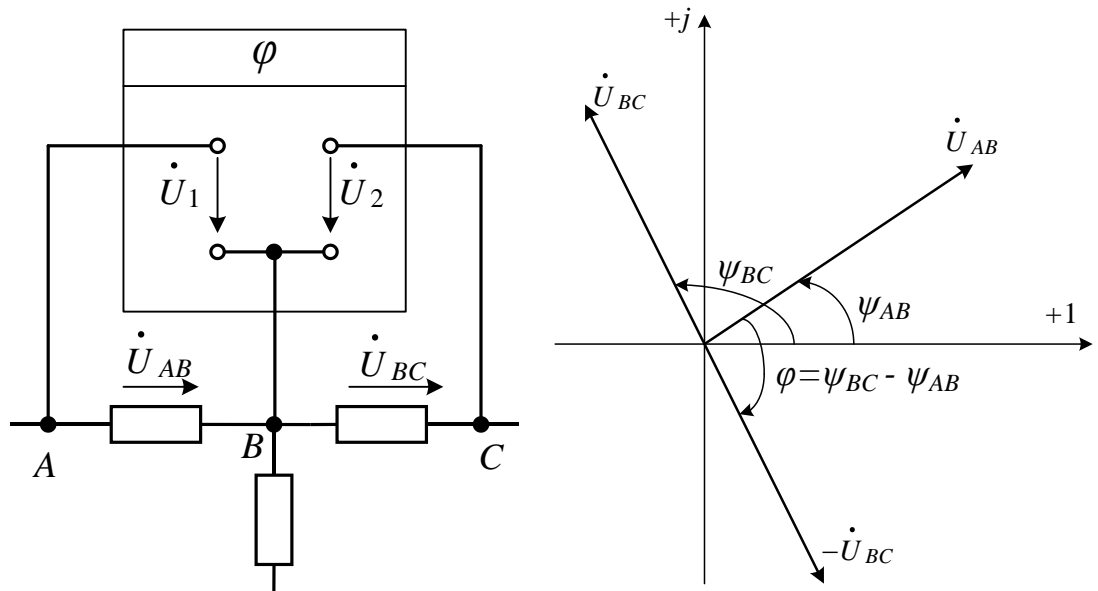


Рис. 4.9. Підключення фазометра в коло

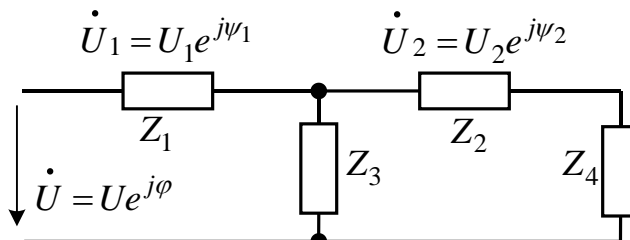


Рис. 4.10

Початкові фази струмів та напруг визначаються відносно заданої величини. У лабораторній роботі такою величиною є ЕРС джерела, значення та початкова фаза якої задані у вихідних даних.

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. 4.10 спочатку визначають  $\psi_1$  для елемента  $z_1$  за відомим значенням  $\psi$ , а потім  $\psi_2$  за значенням  $\psi_1$ .



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

з кредитного модуля: „*Теорія електричних кіл*”

Тема: «*Дослідження електричного резонансу*»

*Роботу виконав студент \_\_\_-го курсу  
факультету \_\_\_\_\_  
групи \_\_\_\_\_*

\_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

Київ 20\_\_ р.

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

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати послідовний коливальний контур (рис.5.1.1). В ролі котушки та конденсатора використовувати блоки змінних індуктивностей та ємностей. Встановити номінальні значення параметрів згідно варіанту завдання (табл.5.1).

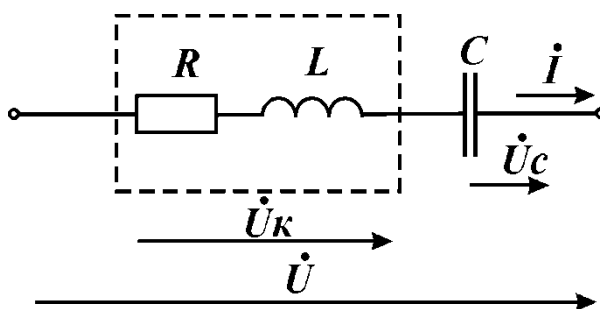


Рис. 5.1.1. Схема електрична принципова

Таблиця 5.1. Варіанти завдання

Варіант	1, 11	2, 12	3, 13	4, 14	5, 15	6, 16	7, 17	8, 18	9, 19	10, 20
$L$ , мГн	30	30	30	40	40	50	50	60	60	60
$C$ , мкФ	0,25	0,1	0,13	0,1	0,2	0,15	0,06	0,11	0,06	0,05
$U$ , В	10	5	7	6	10	8	6	7	6	5

2. З'єднати контур з блоком змінної напруги синусоїдальної форми.

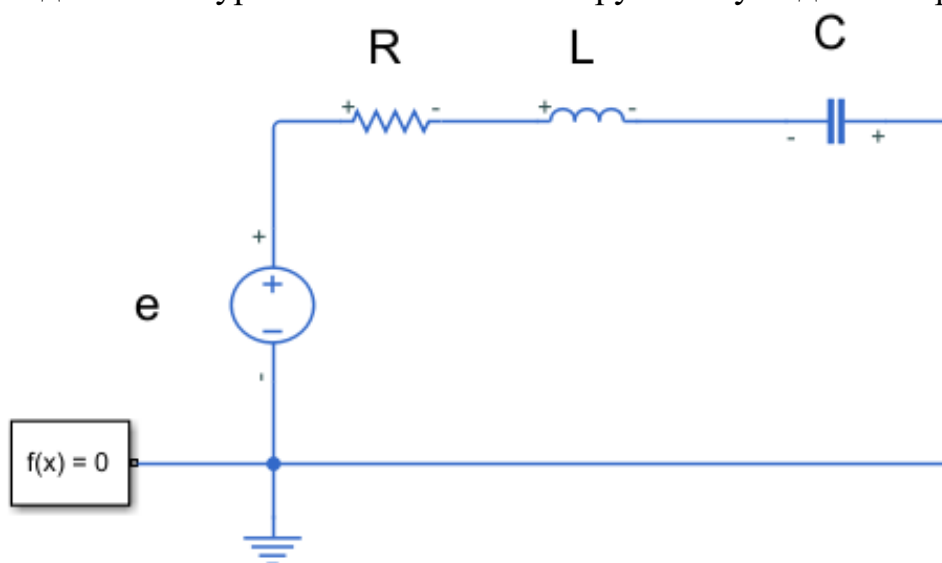


Рис. 5.1.2. Послідовний коливальний контур для дослідження резонансу в програмному середовищі Matlab Simulink

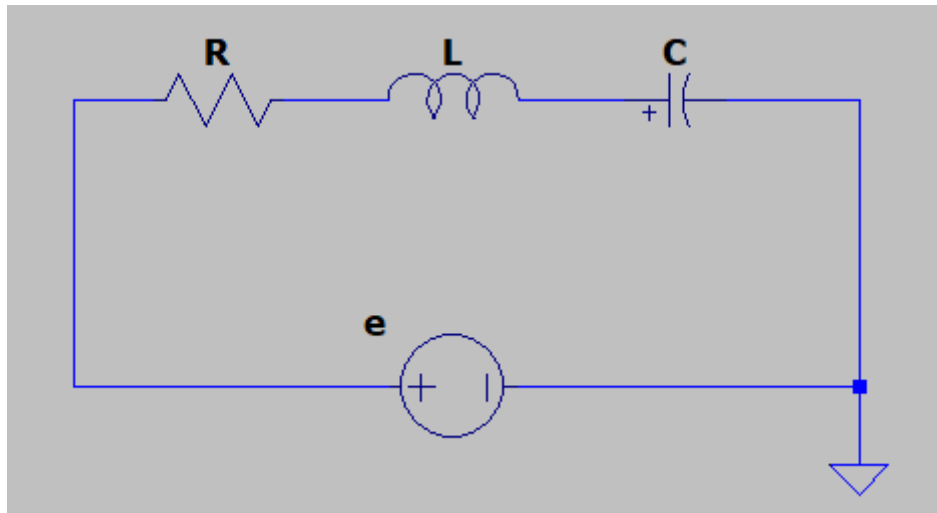


Рис. 5.1.3. Послідовний коливальний контур для дослідження резонансу в програмному середовищі LTspice

Таблиця 5.2. Фактичні параметри коливального контуру

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

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

3. За даними п.2 обчислити фактичні параметри контуру  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , а також характеристичний опір  $\rho$ , добротність  $Q$  та коефіцієнт загасання  $q$ . 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 постійною вхідну напругу контуру, виміряти струм  $I$ , напругу котушки  $U_K$  і конденсатора  $U_C$  та зсув фаз  $\varphi$  для (8...12) значень відносних частот  $f/f_0$  у діапазоні (0,5...1,5). Виміряні значення занести до табл. 5.3. Розрахувати фазовий зсув між напругою і струмом, використавши формулу:

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

Результати занести до табл. 5.3 й порівняти з експериментально знятими значеннями.

Таблиця 5.3. Частотні характеристики

№	$f/f_0$	$f$ , 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								
11								
12								

5. За даними табл. 5.3 побудувати в полі рис.5.2 графіки частотних характеристик:  $I(f/f_0)$ ,  $U_C(f/f_0)$ ,  $U_K(f/f_0)$ ,  $\varphi(f/f_0)$ ,  $Z(f/f_0)$ .



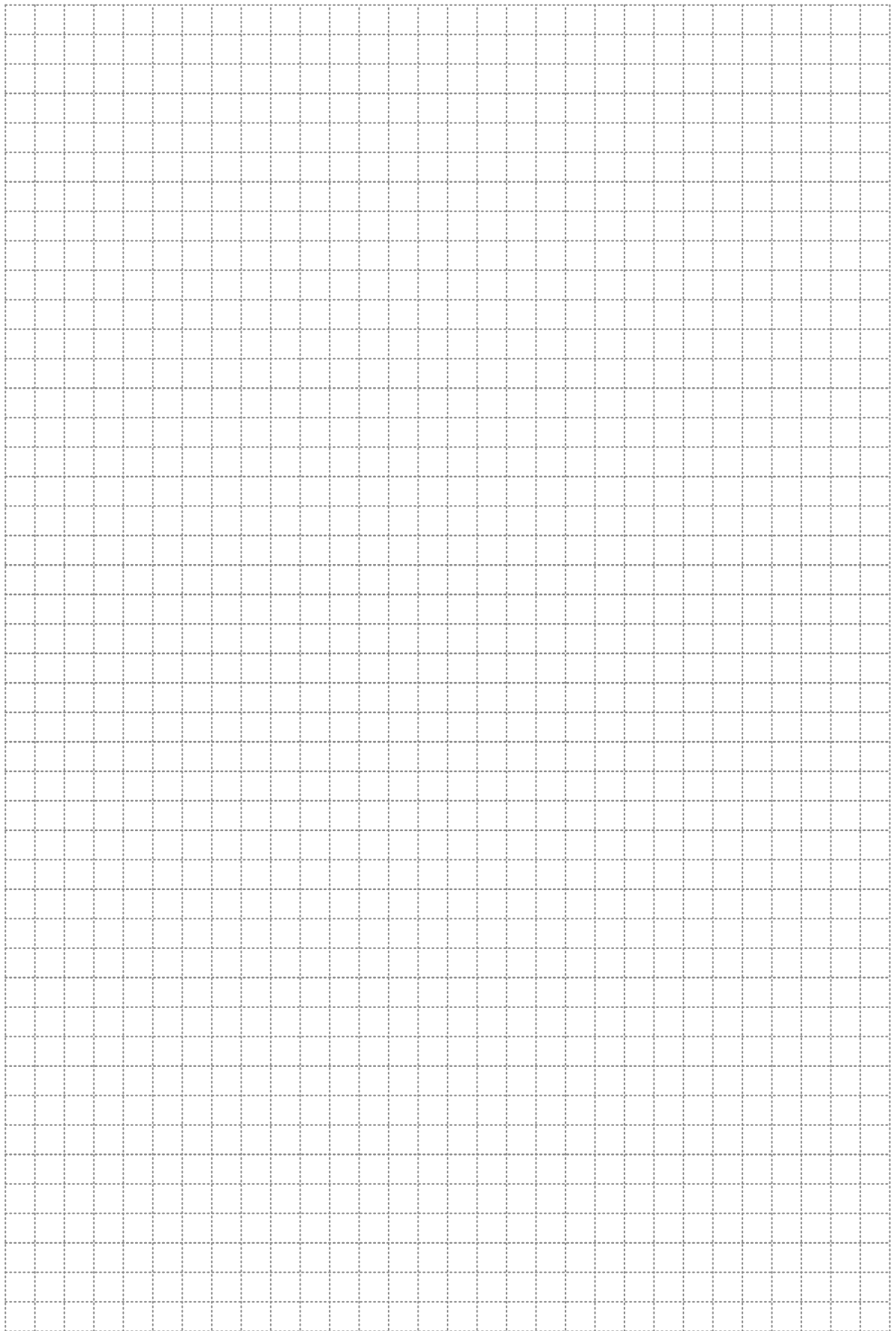


Рис. 5.2. Частотні характеристики  $I(f/f_0)$ ,  $U_c(f/f_0)$ ,  $U_k(f/f_0)$ ,  $\varphi(f/f_0)$ ,  $Z(f/f_0)$

6. Увімкнути послідовно з котушкою й конденсатором блок змінних опорів.

Розрахувати значення додаткового опору  $R_d = (\rho/Q) - R$ , при якому  $Q=10$ , і встановити його на блоці змінних опорів. При зміні відносної частоти  $f/f_0$  у діапазоні  $(0,5 \dots 1,5)$  виміряти значення струму у колі. Повторити експеримент для значень  $Q=5$  і  $Q=2,5$ . Результати занести до табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Частотна характеристика  $I/I_0 = F(f/f_0)$  при різних  $Q$

№	$f/f_0$	$f$ , Гц	$Q = 2,5$		$Q = 5$		$Q = 10$	
			$I$ , А	$I/I_0$	$I$ , А	$I/I_0$	$I$ , А	$I/I_0$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

7. За даними табл. 5.3 і табл. 5.4 побудувати в полі рис.5.3 ряд характеристик  $I/I_0(f/f_0)$  при різних значеннях добротності  $Q$ .

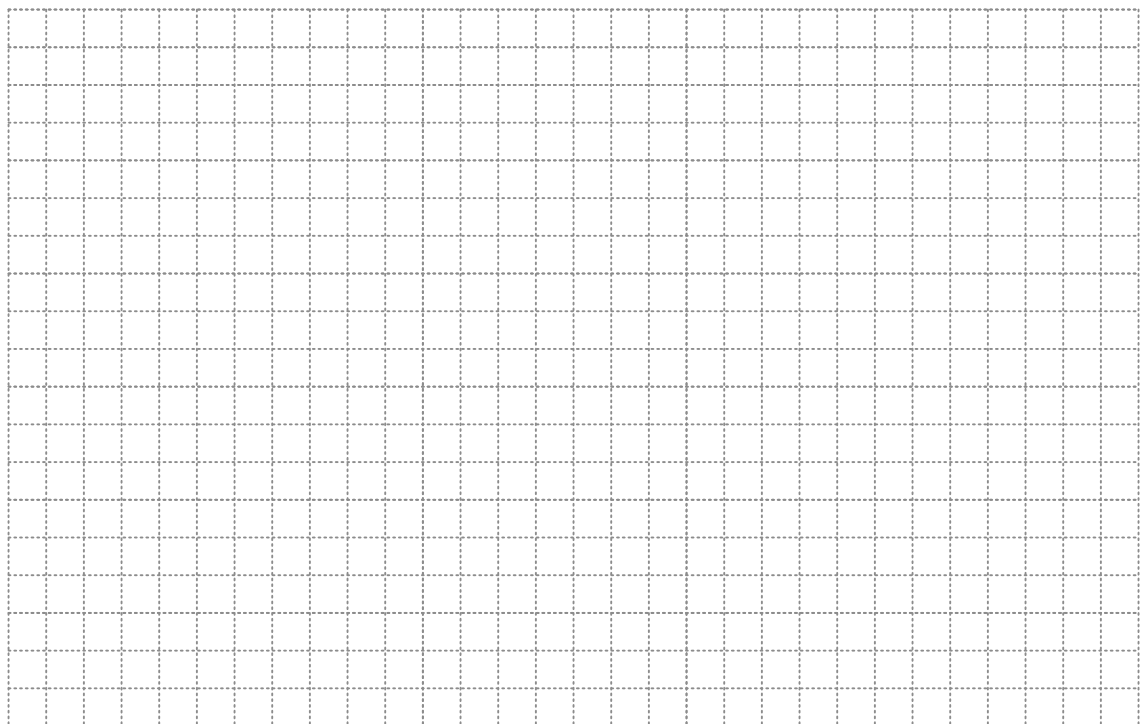


Рис. 5.3. Визначення смуги пропускання

З графіків рис.5.3 визначити смугу пропускання, результати звести до табл.5.5.

У останній рядок табл. 5.5 занести результати обробки даних п.4 для контуру без додаткового опору. Порівняти отримані результати.

Таблиця 5.5. Визначення смуги пропускання

$Q$	$f_1$	$f_2$	$(f_1 - f_2)$ , за даними п.7	$(f_1 - f_2)$ за формулою $f_1 - f_2 = f_0/Q$
2,5				
5				
10				
...				

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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### **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.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

Звіт містить титульний лист і такі розділи:

1. Мета.
2. Порядок і результати виконання досліджень.
3. Принципові схеми досліджуваних кіл.
4. Розрахункові формули і розрахунки.
5. Висновки.

## ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

**Резонанс** - це такий режим у пасивному електричному колі, що містить індуктивність та ємності, при якому реактивний опір та реактивна провідність кола дорівнюють нулю. По відношенню до зовнішнього кола двополюсник веде себе як чисто активний опір, а тому струм та напруга на вході двополюсника співпадають за фазою. 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).

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

Частоти, при яких спостерігається явище резонансу, мають назву **резонансних частот**.

Для **послідовного резонансного контуру** (рис.5.4) комплексний опір дорівнює

$$Z = R + j(\omega L - 1/\omega C).$$

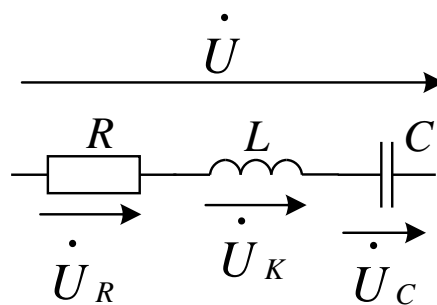


Рис. 5.4. Послідовний резонансний контур

Умова виникнення **резонансу напруг**

$$(\omega L - 1/\omega C) = 0.$$

При цьому, резонансна частота дорівнює:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (5.1)$$

Реактивні опори індуктивності та ємності на резонансній частоті:

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

де  $\rho$  – хвильовий (характеристичний) опір.

На резонансній частоті  $\omega_0$  опір кола мінімальний  $z_0=R$ , а струм контуру досягає свого максимального значення:

$$I_0 = E/R.$$

**Добротністю контуру** називають величину

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \rho/R. \quad (5.2)$$

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

$$U_{L_0} = U_{C_0} = QE.$$

Величина, обернена до добротності, називається **коефіцієнтом загасанням**

$$d = 1/Q. \quad (5.3)$$

**Смугою пропускання (прозорості)** резонансного контуру називають смугу частот поблизу резонансу, на границях якої струм зменшується до  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$  від резонансного значення  $I_0$ .

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{1}{Q} = d. \quad (5.4)$$

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 вибіркових властивостей послідовного контуру (зменшення смуги пропускання) потрібне джерело напруги з малим внутрішнім опором.

**Паралельним коливальним контуром** (рис.5.5) називають коло з двома паралельно з'єднаними гілками.

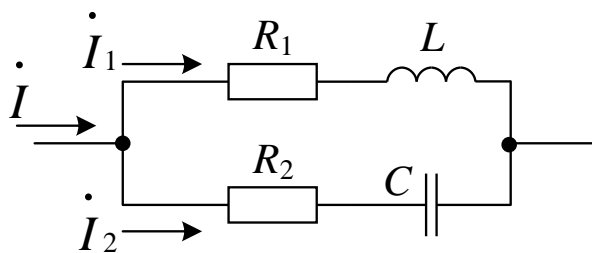


Рис.5.5. Паралельний резонансний контур

Резонанс у такому колі настає, коли вхідна реактивна провідність дорівнює нулю. Тому для реактивних опорів можна записати:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1/\omega C}{R_2^2 + 1/\omega^2 C^2}. \quad (5.5)$$

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 (5.5) 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 одне таке значення.

Резонансна частота паралельного контуру:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}. \quad (5.6)$$

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 повний опір кола  $Z = \rho$ , буде чисто активним і не залежить від частоти. Тому струм буде співпадати за фазою з напругою на будь-якій частоті, а його значення буде величиною постійною і рівною:

$$I_0 = E/\rho.$$

У радіоелектронних пристроях використовують контури з малими втратами, а тому  $R_1$  та  $R_2 \ll \rho$ . За таких умов  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . 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 вибіркових якостей) широко застосовують двоконтурні резонансні кола: два резонансних контури, кожний з яких окремо настроюють на одну і ту ж резонансну частоту. Контури можуть бути зв'язані індуктивно (трансформаторно або автотрансформаторно) чи ємнісно.

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

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

Тому якщо реактивний опір  $X(\omega) = 0$ , та 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**

1.  $dX(\omega)/d\omega > 0$  – опір з ростом частоти зростає.
2. Нулі та полюси функції  $X(\omega)$  чергуються (поряд двох нулів чи двох полюсів бути не може).
3. Число резонансних частот на одну одиницю менше числа приведених реактивних елементів кола.
4. При  $\omega=0$ :  $X(\omega)=0$  або  $X(\omega) \rightarrow -\infty$ ;  
При  $\omega \rightarrow \infty$ :  $X(\omega)=0$  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

з кредитного модуля: „*Теорія електричних кіл*”

Тема: «*Дослідження трифазного кола при з’єднанні фаз джерела та приймача зіркою*»

Роботу виконав студент \_\_\_-го курсу  
факультету \_\_\_\_\_  
групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(ПІБ студента)

Київ 20\_\_ р.



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

### ПОРЯДОК ТА МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1.  $R_1-R_3 = 200 \text{ Ом}$ ,  $C_1-C_3 = 5 \text{ мкФ}$ ,  $R_L = 10 \text{ Ом}$  (імітують опір лінійних проводів).

Таблиця 6.1. Варіанти завдань

Варіант	Симетричний режим			Аварійний режим	
	Джерело	Приймач (навантаження)			
	$E_\phi, \text{ В}$	Елементи	З'єднання елементів	Причина виникнення	$R_0, \text{ Ом}$
1, 11	12	R1-R3, C1-C3	Паралельно	К. з. фази А приймача	50
2, 12	24	R1-R3	-----	Обрив фази А	0
3, 13	36	R1-R3, C1-C3	Послідовно	Обрив фази В	0
4, 14	20	C1-C3	-----	К. з. фази В приймача	50
5, 15	22	R1-R3, C1-C3	Паралельно	Зниження $E_A$ на 50%	0
6, 16	25	R1-R3	-----	Зниження $E_C$ на 50%	0
7, 17	30	R1-R3, C1-C3	Послідовно	Обрив фази С	0
8, 18	15	R1-R3, C1-C3	Послідовно	К. з. фази С приймача	50
9, 19	24	R1-R3, C1-C3	Послідовно	Зниження $E_A$ на 50%	0
10, 20	20	R1-R3, C1-C3	Паралельно	Обрив фази А	0

Таблиця 6.2. Параметри елементів згідно варіанту

Елемент	R1	R2	R3	C1	C2	C3	$R_L$
Значення							

2. Увімкнути блок трифазних напруг, встановити значення фазних ЕРС  $E_\phi$  на холостому ході згідно табл. 6.1. Зібрати трифазне джерело, з'єднане зіркою. Виміряти лінійні напруги при об'єднанні у нульову точку: а) початків усіх фаз; б) початків фаз В та С і кінця фази А; в) початку фази С та кінців фаз

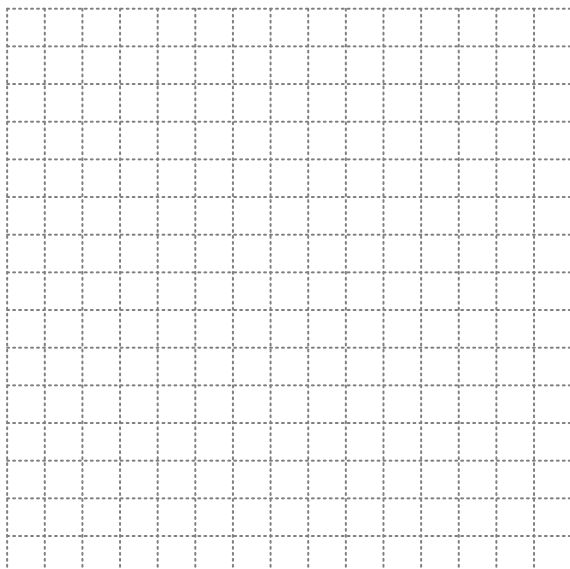
$A$  та  $B$ ; г) кінців усіх фаз. Результати занести до табл. 6.2. Отримані результати пояснити за допомогою векторних діаграм (побудова в полі рис.6.1).

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

Таблиця 6.2. Лінійні напруги

Лінійна напруга	У нульову точку об'єднані			
	Початки усіх фаз (рис.6.1.а)	Початки фаз $B, C$ й кінець фази $A$ (рис.6.1.б)	Початок фази $C$ й кінці фаз $A$ та $B$ (рис.6.1.в)	Кінці усіх фаз (рис.6.1.г)
$U_{AB}, V$				
$U_{BC}, V$				
$U_{CA}, V$				

Схема з'єднання джерела



Топографічні діаграми

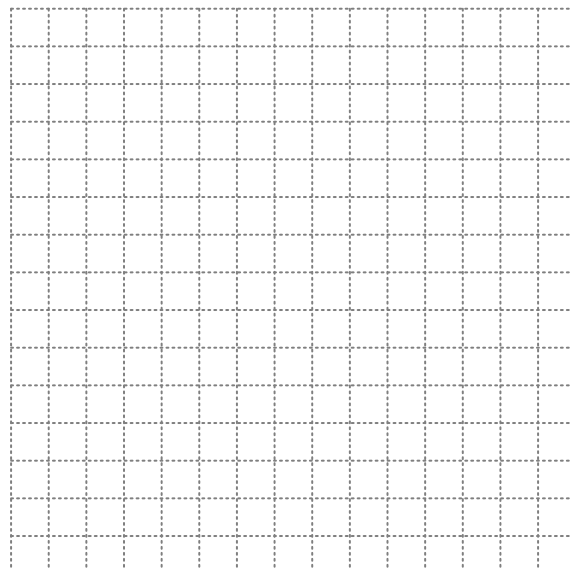


Рис. 6.1. а) Топографічні діаграми напруг - з'єднані початки усіх фаз

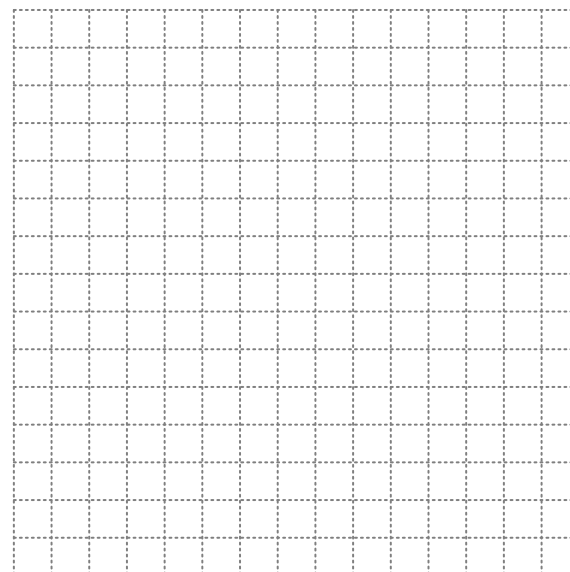
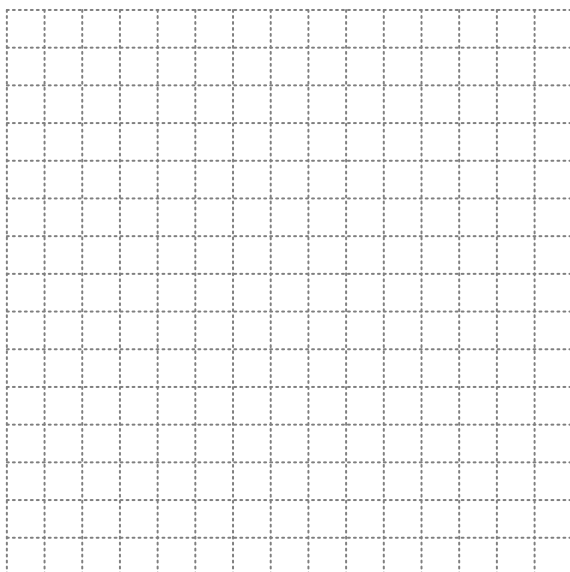


Рис. 6.1. б) Топографічні діаграми напруг – з'єднані початки фаз  $B, C$  й кінець фази  $A$

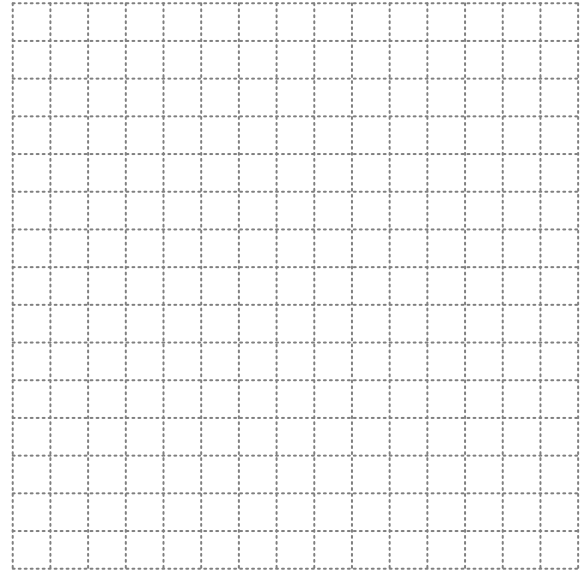
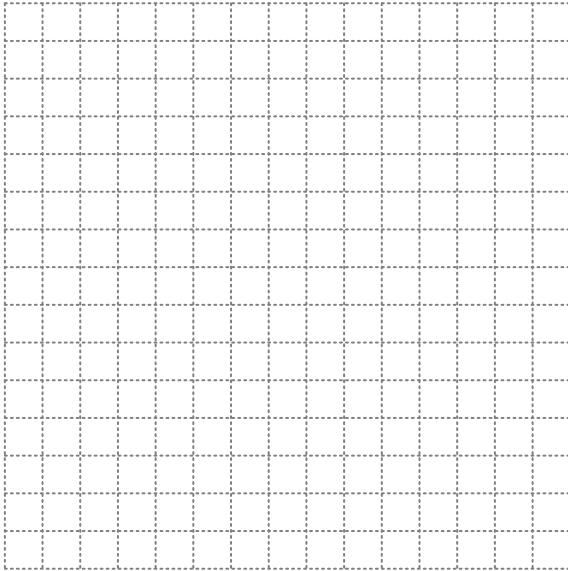


Рис. 6.1. в) Топографічні діаграми напруг - з'єднані початок фази  $C$  й кінці фаз  $A$  та  $B$

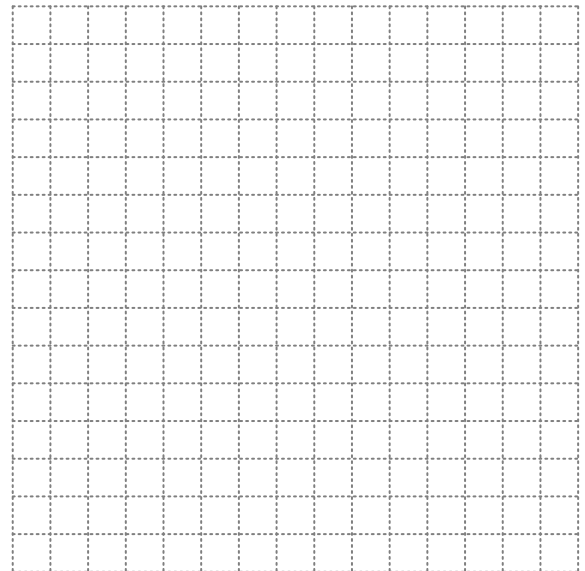
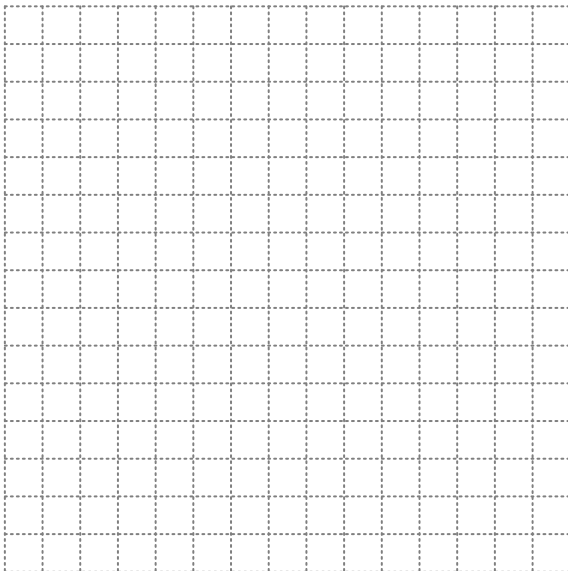


Рис. 6.1.г) Топографічні діаграми напруг – з'єднані кінці усіх фаз

3. Зібрати коло симетричного трифазного навантаження згідно з завданням табл. 6.1, рис. 6.2.1. Нульові точки джерела  $O$  та приймача  $O'$  - з'єднати накоротко.

4. Виміряти напругу окремих фаз джерела при заданому навантаженні. 6.1. Виміряти фазні струми  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  та струм нульового проводу  $I_0$  в **симетричному режимі** і занести їх значення до табл. 6.3.

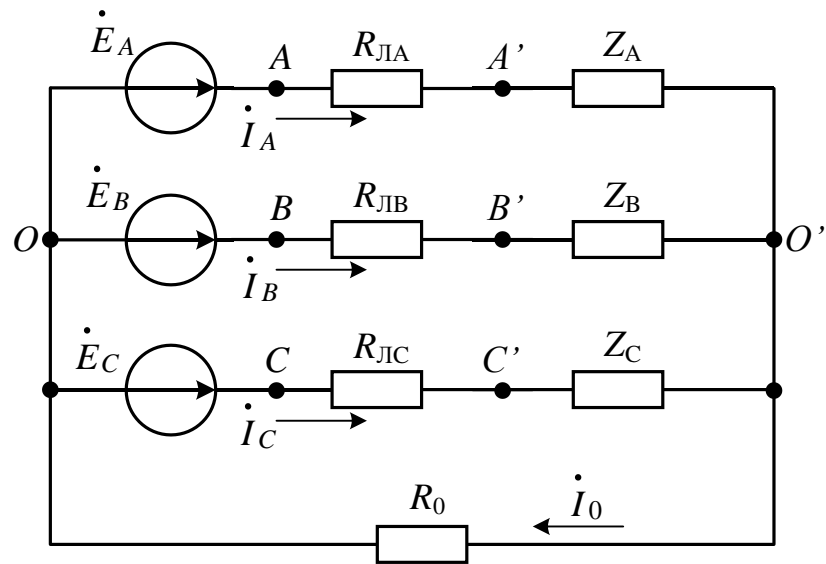


Рис.6.2.1. Схема електрична принципова

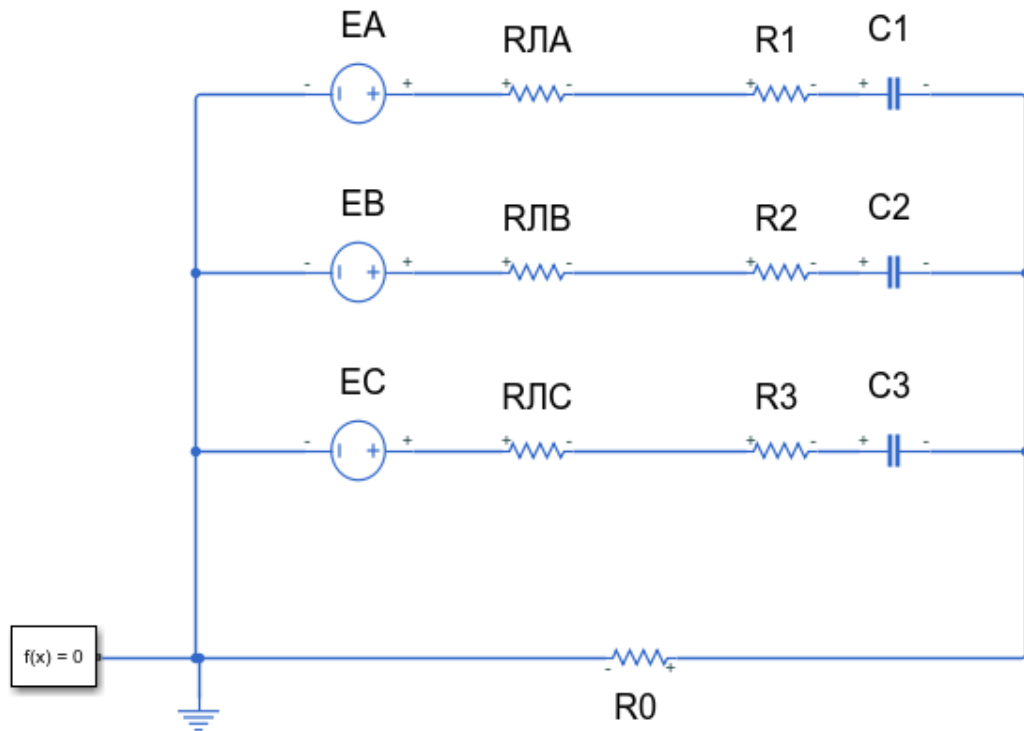


Рис.6.2.2. Приклад електричного трифазного кола для варіанту 3 у програмному середовищі Matlab Simulink

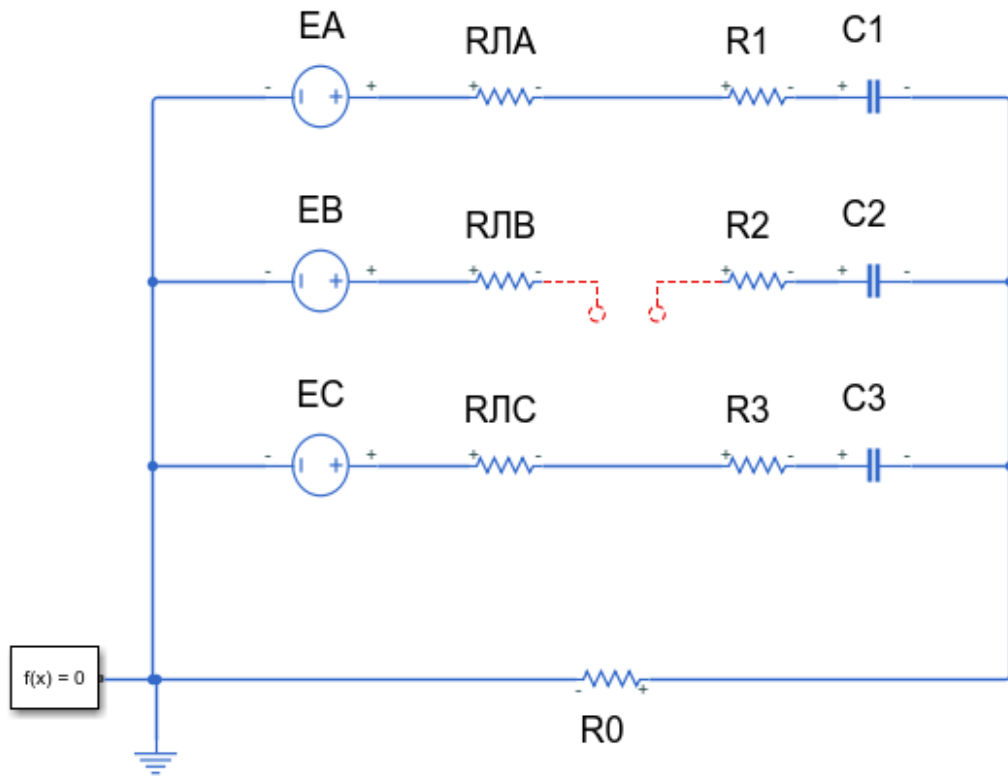


Рис.6.2.3. Приклад електричного трифазного кола для варіанту 3 в режимі аварії програмному середовищі Matlab Simulink

у

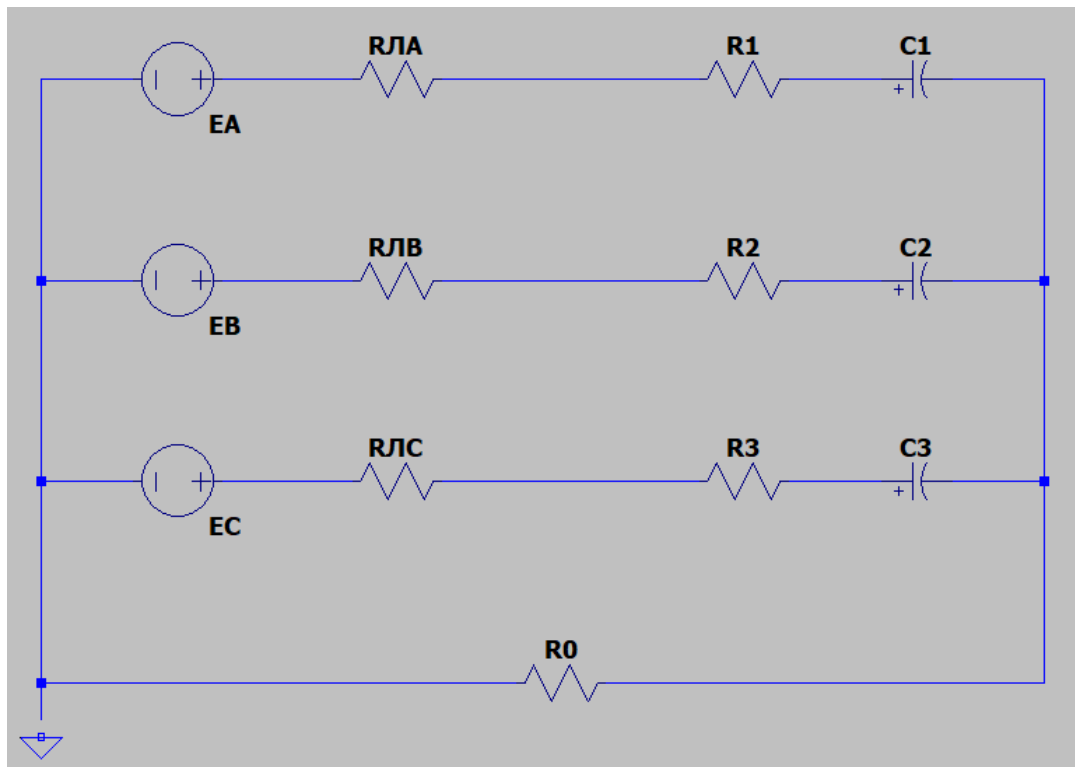


Рис.6.2.4. Приклад електричного трифазного кола для варіанту 3 у програмному середовищі LTspice

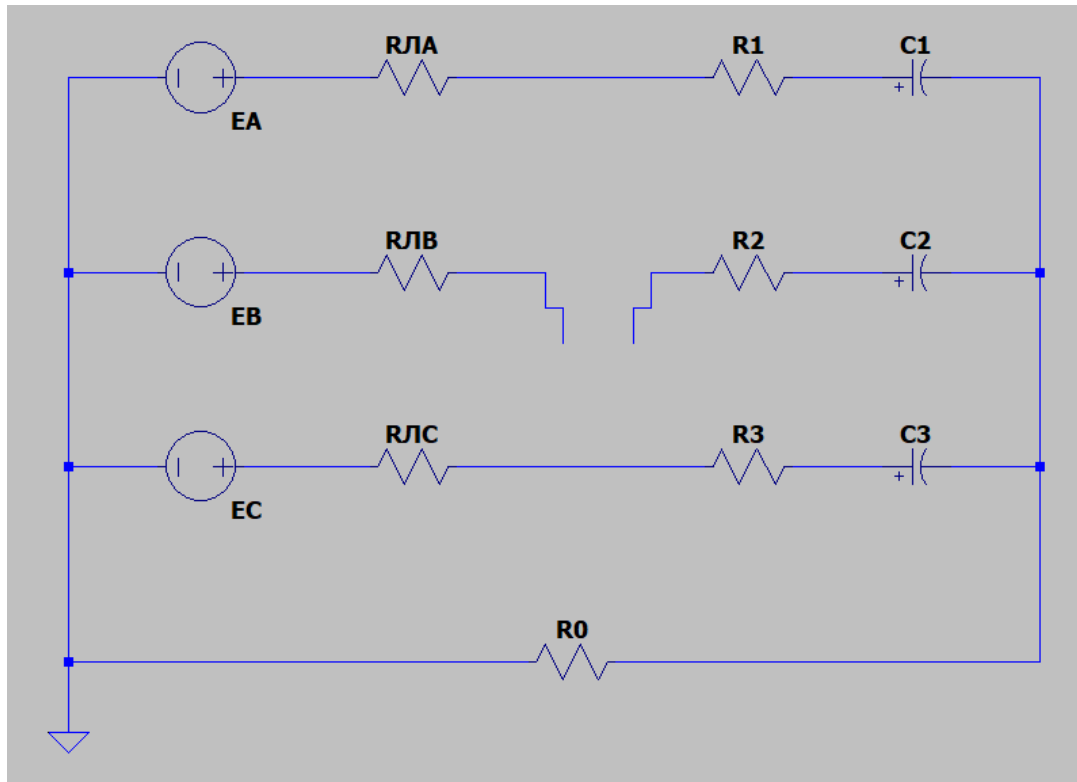


Рис.6.2.5. Приклад електричного трифазного кола для варіанту 3 в режимі аварії у програмному середовищі LTspice

Таблиця 6.3. Струми трифазного кола

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

5. Визначити початкові фази струмів за вимірними параметрами елементів і заданою схемою їх з'єднання, прийнявши для фази  $A$  початкову фазу  $\psi_A=0$ . Виміряти фазові зсуви інших фаз відносно ЕРС фази  $A$ . Порівняти отримані результати та занести їх до табл. 6.3.

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

6. Виміряти фазну та лінійну напруги в **симетричному режимі** та занести їх до табл. 6.4. За результатами вимірювань п.п.4-6 побудувати векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг в полі рис.6.3.

Таблиця 6.4. Напруги трифазного кола

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

7. Зібрати коло, що відповідає **аварійному режиму** (табл. 6.1) Щоб запобігти спрацюванню захисту блоку трифазної напруги при короткому замкненні однієї з фаз **обов'язково** ввести опір нульового проводу (блок змінних опорів) згідно з завданням у табл. 6.1.

Виміряти фазні та лінійні струми та напруги в **аварійному режимі з нульовим проводом**. Результати занести відповідно до табл. 6.3 і табл. 6.4.

8. За результатами п.7 побудувати векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг в **аварійному режимі з нульовим проводом** в полі рис.6.4. За діаграмою струмів визначити значення струму нульового поводу в аварійному режимі і порівняти його з вимірним.

9. Відключити нульовий провід і повторити вимірювання для струмів та напруг досліджуваного кола в **аварійному режимі без нульового проводу**. Результати занести до табл. 6.3 і табл. 6.4. Побудувати векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг в полі рис.6.5.

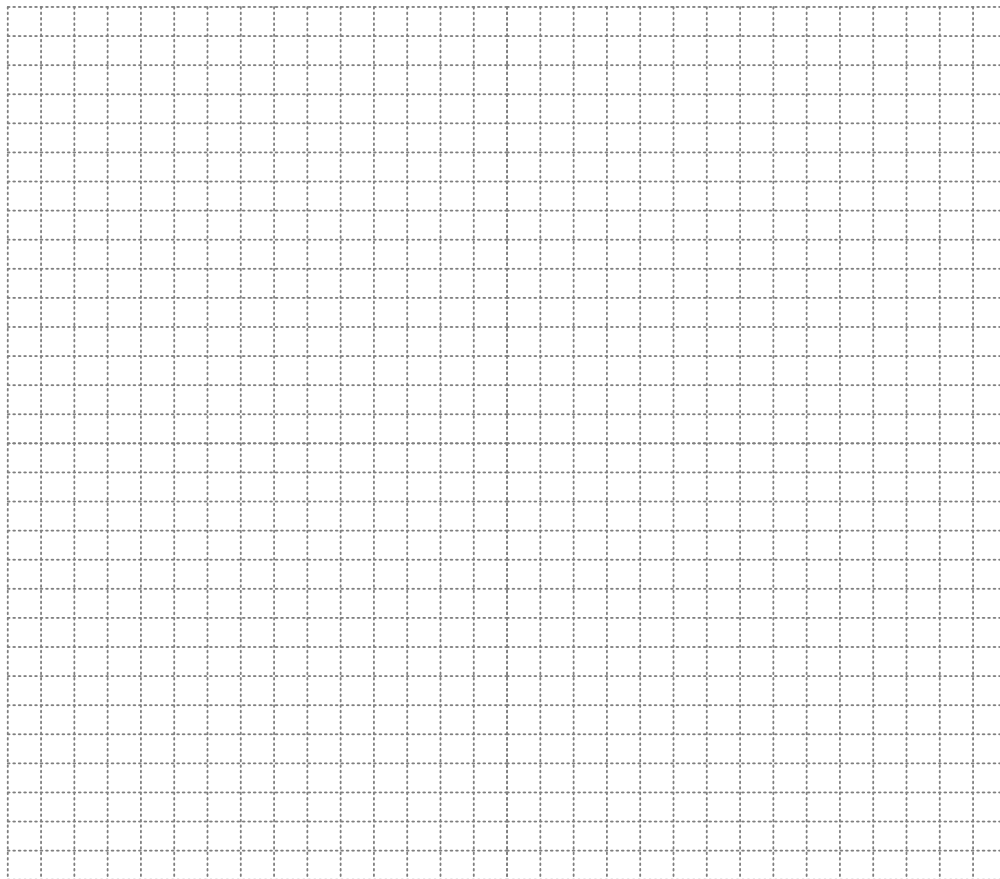


Рис. 6.3. Топографічні та векторні діаграми для симетричного режиму



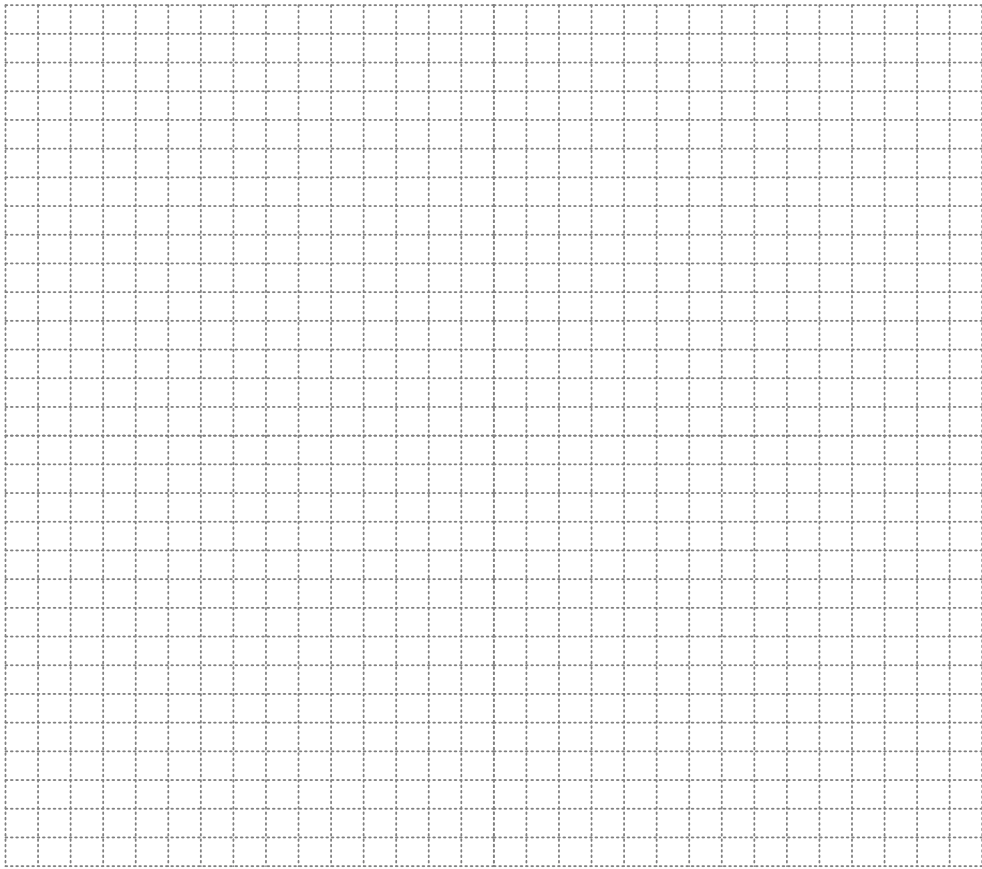


Рис. 6.4. Топографічні та векторні діаграми для аварійного режиму з нульовим проводом

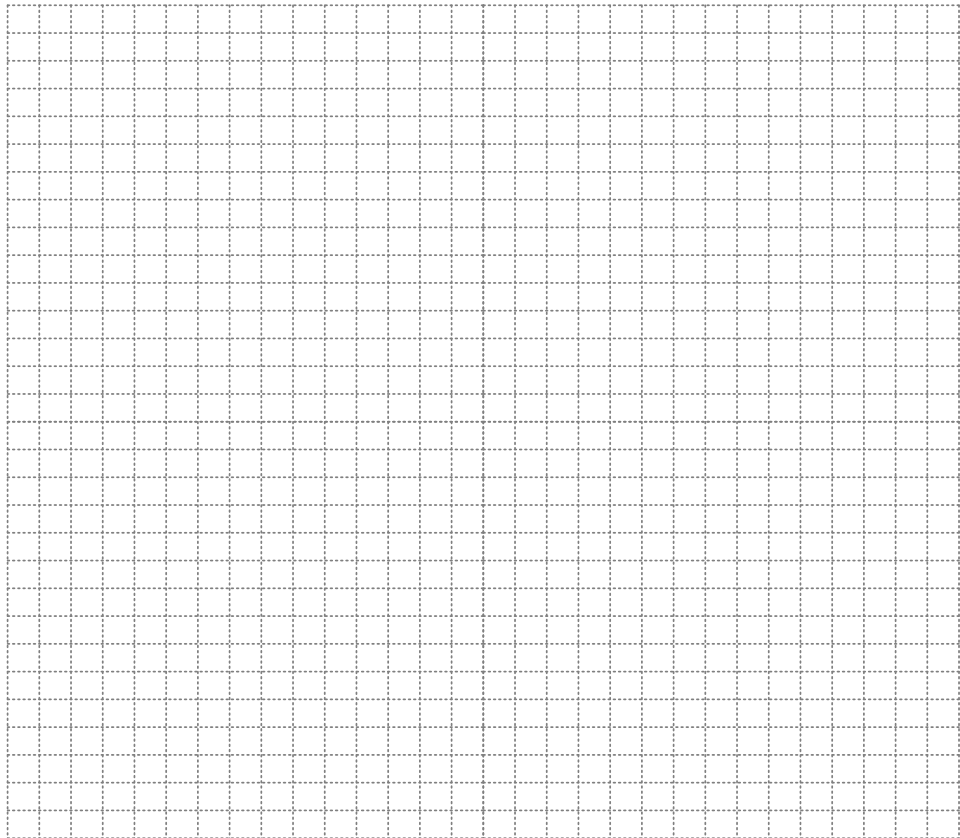


Рис. 6.5. Топографічні та векторні діаграми для аварійного режиму без нульового проводу

10. Визначення положення нульової точки приймача на топографічній діаграмі виконується за точкою перетину відрізків, які дорівнюють у вибраному масштабі фазним напругам приймача (з урахуванням напруг на лінійних проводах), або за вимірним кутом зсуву фаз напруг  $U_{OO}$  та  $U_A$ .

Розрахувати  $U_{O'O}$  за методом двох вузлів. Порівняти визначені за топографічною діаграмою та розраховані значення модулю та аргументу  $U_{O'O}$ . У випадку значного розходження значень – повторити розрахунок, побудову графіків або експеримент.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

11. 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 ЕРС, 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 трифазного кола; вимірювання та розрахунок струмів та напруг.
5. Несиметричний режим роботи три фазного кола; вимірювання та розрахунок струмів та напруг.
6. Потужність в три фазного кола; її розрахунок та вимірювання.

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ**

Звіт містить титульний лист і такі розділи:

1. Мета.
2. Порядок і результати виконання досліджень.
3. Принципові схеми досліджуваних кіл.
4. Розрахункові формули і розрахунки.
5. Висновки.

## ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Генератори з декількома обмотками, у яких наводяться ЕРС однакової частоти, але зміщені одна відносно іншої за фазою, називають багатофазними генераторами [4].

Сукупність електричних кіл з багатофазними джерелами живлення називають багатофазною системою електричних кіл. Окремі її частини називають фазами.

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

Трифазне коло, фази якого електрично не з'єднані поміж собою, називають не з'єднаним (наразі не застосовується).

Трифазне коло, фази якого електрично з'єднані поміж собою називають з'єднаним трифазним колом.

Сукупність ЕРС, напруг та струмів, що діють в окремих фазах, називають трифазною системою ЕРС, напруг або струмів.

Розрізняють симетричні та несиметричні системи ЕРС, струмів, напруг.

Симетричною називають таку трифазну систему ЕРС (напруг, струмів), для якої виконуються умови:

- 1) всі ЕРС (напруги, струми) рівні за величиною;
- 2) кожна ЕРС (напруга, струм) відстає за фазою від попередньої на один і той же фазний кут, що дорівнює  $\alpha = q 2\pi/3$ ,  $q = \overline{1,3}$ .

Якщо хоча б одна з цих вимог не виконується, то система ЕРС (напруг, струмів) є несиметричною.

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

$$\begin{aligned} e_A(t) &= \sqrt{2}E \sin \omega t; & \dot{E}_A &= E; \\ e_B(t) &= \sqrt{2} E \sin (\omega t - 2\pi/3); & \dot{E}_B &= E e^{-j2\pi/3} = a^2 E; \\ e_C(t) &= \sqrt{2} E \sin (\omega t - 4\pi/3) = & \dot{E}_C &= E e^{j2\pi/3} = a \cdot E; \\ &= \sqrt{2} E \sin (\omega t - 2\pi/3), \end{aligned}$$

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

Сума трьох векторів, що утворюють симетричну зірку, дорівнює нулю:

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

При  $q = 2$ ,  $\alpha = 4\pi/3$  будемо мати *систему зворотної (від'ємної) послідовності фаз*  $\dot{E}_A = E$ ;  $\dot{E}_B = a \cdot E$ ;  $\dot{E}_C = a^2 \cdot E$ , для якої також

справедливо

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

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:

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

Будь-яку несиметричну систему векторів можна розкласти на ці три симетричні системи. В подальшому під трифазною системою ЕРС (напруг, струмів) будемо розуміти систему прямої послідовності фаз.

Багатофазні системи, для яких сума миттєвих потужностей всіх 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  $O$ , яку називають нульовою точкою генератора.

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

Навантаження у трифазному колі також може бути з'єднане зіркою або трикутником. Виділяють п'ять 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 однієї фази навантаження, оскільки при цьому порушуються електричні режими в інших фазах.

З'єднання навантаження трикутником дозволяє використовувати нерівномірні навантаження, які за необхідності можуть підключатися або відключатися незалежно одне 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 більші, ніж фазні  $U_{Л} = \sqrt{3}U_{\phi}$ , а лінійні струми дорівнюють фазним  $I_{Л} = I_{\phi}$ ;

= при з'єднанні трикутником  $U_{Л} = U_{\phi}$ , 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, то струм у нульовому проводі

$$\dot{I}_0 \neq 0 \quad \text{і} \quad \text{напруга} \quad \dot{U}_{0'0} = z_0 \dot{I}_0 \neq 0,$$

де  $z_0$  – опір нульового проводу.

При розрахунках та побудові топографічних та векторних діаграм треба враховувати те, що навіть у симетричних трифазних колах лінійні та фазні напруги при з'єднанні зіркою, а також лінійні та фазні струми при з'єднанні трикутником, мають фазові зсуви.

## ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленними параметрами : підручник / Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький ;

під ред. проф. Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с. ISBN 978-966-641-438-3

2. Розрахунок електричних кіл постійного струму: для студентів електротехнічних напрямів підготовки 0906 “Електротехніка”, 0914 “Електроніка”, 0914 “Компютеризовані системи, автоматика і управління”, 0915 “Компютерна інженерія”./ Уклад.: І. А. Курило, І. Н. Намацалюк, А. А. Щерба. – К.: НТУУ”КПІ”, 2006.-51 с.

3. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. - К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. - Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. - 272 с: іл. ISBN 966-622-042-3

4. Косенков В.Д., Пастернак Л.В. Практикум з теорії лінійних електричних кіл: Навчальний посібник. – Хмельницький: ХНУ, 2007. ISBN 996-7789-45-4.

5. Теоретичні основи електротехніки :[підруч.] / Г. П. Балан, П. О. Кравченко, Ю. Ф. Свергун, О. Є. Щербаков – К. : Інтас, 2007.

6. Воробкевич, А. Ю. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки [Текст] / А. Ю. Воробкевич, О. І. Шегедин, В. С. Маляр, Р. Я. Совин. – К.: Магнолія Плюс, 2004. – 224 с.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
2. <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
3. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленними параметрами : підручник / Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький ; під ред. проф. Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с. ISBN 978-966-641-438-3, с. 19.
4. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. - К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. - Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. - 272 с: іл. ISBN 966-622-042-3, с. 48.