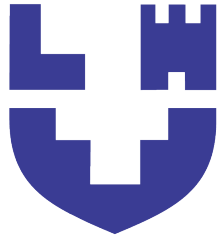


Міністерство освіти та науки України
Луцький національний технічний університет



ЕЛЕКТРОТЕХНІКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Методичні вказівки до лабораторних занять
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
спеціальності G3 Електрична інженерія
денної та заочної форм навчання

УДК 621.3.01(075)

E50

До друку

Голова вченої ради

факультету архітектури, будівництва та дизайну _____

О.В.Андрійчук

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозиторій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Затверджено вченою радою факультету архітектури, будівництва та дизайну ЛНТУ,

протокол № від « ____ » _____ 2025 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії ЛНТУ, протокол № від « ____ » _____ 2025 року.

Завідувач кафедри електричної інженерії _____ Ю.В. Грицюк

Укладач: _____ А.В. Гадай, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії ЛНТУ

Рецензент: _____ В. І. Волинець, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії ЛНТУ

Відповідальний

за випуск: _____ Ю.В. Грицюк, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії ЛНТУ

E50 Електротехніка в електроенергетиці [Текст] : методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності G3 Електрична інженерія денної та заочної форм навчання / уклад. А.В. Гадай. – Луцьк : ЛНТУ. 2025. 254 с.

Видання містить теоретичні відомості та завдання, необхідні для засвоєння основних положень та набуття практичних навичок з дисципліни.

Призначене для студентів спеціальності G3 Електрична інженерія денної та заочної форми навчання.

© А.В. Гадай, 2025

ЗМІСТ

1 Дослідження кіл постійного струму	5
2 Змішане з'єднання опорів	13
3 Робота джерела ЕРС у генераторному та акумуляторному режимах	18
4 Експериментальна перевірка законів Кірхгофа	23
5 Метод накладання	27
6 Коло постійного струму зі змінним опором навантаження	32
7 Дослідження нелінійних кіл змінного струму. Ферорезонанс напруги	37
8 Дослідження однофазних кіл синусоїдного струму в середовищі Matlab.	48
9 Дослідження лінійних кіл синусоїдного струму	52
10 Послідовне RC -з'єднання у колі синусоїдного струму	57
11 Послідовне RL -з'єднання у колі синусоїдного струму	62
12 Послідовне LC -з'єднання. Резонанс напруг	67
13 Паралельне RC -з'єднання у колі синусоїдного струму	79
14 Паралельне RL -з'єднання у колі синусоїдного струму	84
15 Паралельне LC -з'єднання у колі синусоїдного струму. Резонанс струмів	89
16 Дослідження трифазних кіл з'єднання споживачів електроенергії зіркою	99
17 Дослідження трифазних кіл з'єднання споживачів електроенергії трикутником	107
18 Дослідження трифазних кіл синусоїдного струму комплексним методом	114
19 Дослідження симетричних складових трифазної системи напруг	121
20 Дослідження електричних кіл періодичного несинусоїдного струму	133
21 Вивчення спектрів періодичних негармонічних сигналів	151
22 Аналіз лінійного кола періодичного несинусоїдного струму.	157
23 Дослідження перехідних процесів у колах з індуктивністю	163
24 Дослідження перехідних процесів зарядження та розрядження конденсатора	170
25 Дослідження перехідних процесів у нерозалужених лінійних електричних колах	177
26 Аналіз перехідних режимів у розалужених лінійних електричних колах	183

27	Дослідження перехідних процесів під час вимкнення індуктивності	187
28	Дослідження перехідних процесів в нерозгалуженому колі з котушкою при підключенні її до джерела синусоїдної напруги	197
29	Дослідження перехідних процесів зарядження конденсатора через резистор в лінійних колах з синусоїдною ерс	204
30	Дослідження довгої однорідної лінії без втрат	212
Додаток А Розробка моделей електричних кіл у середовищі <i>MATLAB/SIMULINK</i>		222
Рекомендована література		252

1 ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Вивчення та практичне застосування методів розрахунку та математичного моделювання електричних кіл постійного струму середовищі *Matlab/Simulink*.

2. Теоретична частина

Вивчіть рекомендації щодо розробки та дослідження математичних моделей електричних кіл у середовищі *Matlab/Simulink* (див. Додаток А).

3. План роботи

1. Вивчення середовища *MatLab* та правил застосування її функцій.

1.1. Робочий стіл *MatLab* може містити до п'яти вікон: *Current Folder* (*Поточна папка*), *Live Editor* (*Редактор реального часу*), *Workspace* (*Робоча область*), *Details* (*Деталі*), *Command Window* (*Командне вікно*) (рис.1.1).

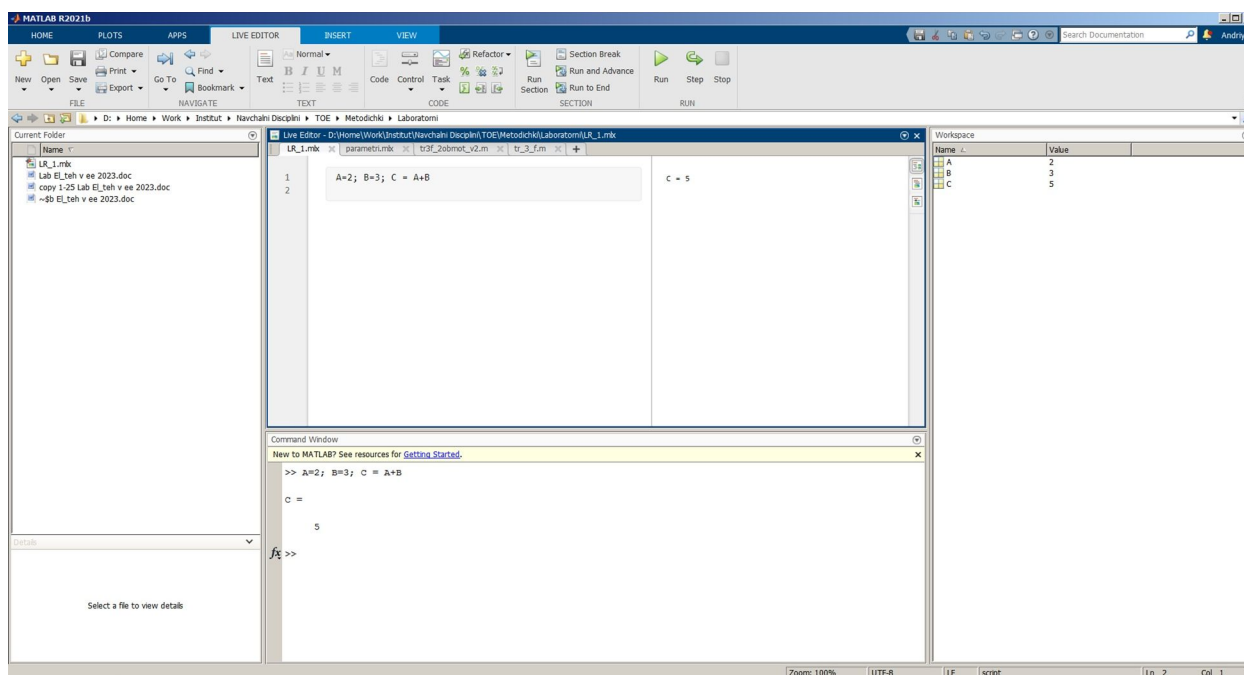


Рисунок 1.1 – Схема робочого столу *MatLab*

Вікно *Current Folder* показує список папок та файлів, які є в поточному каталозі, і дозволяє відкривати ці файли.

Вікно *Live Editor* – це інтерактивні документи, які поєднують код MATLAB із вбудованим виводом, форматованим текстом, рівняннями та зображеннями в єдиному середовищі

Вікно *Workspace* містить інформацію про всіх змінних, що зберігаються

на даний момент у пам'яті системи, їх розмірності, об'єм пам'яті і тип даних, що займається.

Вікно *Details* містить створені дані, або імпортовані з файлів.

Вікно *Command Window* призначене для введення вихідних даних, програм обробки та виведення результатів розрахунку.

1.2. Вихідні дані та програма їхньої обробки вводяться у *Command Window* після символу запрошення до діалогу \gg . Змінним призначаються буквені ідентифікатори, яким прирівнюються чисельні значення, наприклад:

$\gg A=2; B=3; C = A+B$

Якщо після введення команд натиснути *Enter*, команди будуть виконані, а результат обчислення виведений на екран

$C=5$.

Якщо після команди поставлено знак; (крапка з комою), то команда буде виконана, але результат збережено у пам'яті. В одному рядку може бути записано кілька виразів (команд), розділених знаком; (крапка з комою). Якщо довгий вираз не міститься в рядку, можна поставити ... (три точки), натиснути *Enter*, перейти на наступний рядок і продовжити введення наступного рядка. При цьому, символ запрошення \gg не з'являється.

Якщо необхідно змінити вихідні дані або скоригувати програму їх обробки, слід скопіювати виконану програму, вставити її після запрошення, відредагувати і клавішею *Enter* відправити на виконання.

Для створення *Live Editor*

1.3. Перелік основних команд наведено у табл. 1.1. Щоб переглянути всі команди елементарних функцій, потрібно ввести в поле команд команду

help elfun.

Таблиця 1.1 – Таблиця 1.1. Перелік основних команд

+ – команда арифметичної складання	[abc] – вектор із трьох елементів
- – команда арифметичного віднімання	[abc;def] – матриця із двох векторів
* – команда арифметичного множення	.^ – команда поелементного зведення у ступінь вектора

/ – команда арифметичного розподілу		... – команда перенесення кінця довгого виразу до наступного рядка
^ – команда зведення у ступінь		; – кінець виразу, рядки
<i>Trigonometric</i>	<i>Complex</i>	<i>Exponential</i>
sin – синус	Real – дійсна частина комплексного числа	exp – експонента
asin – арксинус	imag – уявна частина комплексного числа	log – натуральний логарифм
cos – косинус	abs – модуль комплексного числа	log10 – десятковий логарифм
acos – арккосинус	angle – аргумент комплексного числа	sqrt – корінь квадратний
tan – тангенс	conj - комплексне число (спряжене)	
atan – арктангенс		

1.4. Змінні може бути скалярами, векторами, матрицями. Одномірний масив (вектор) – це укладене у квадратні дужки перерахування елементів масиву, розділених пробілами $V=[4\ 5\ 6]$. Як елемент вектора можна використовувати раніше введені змінні або вирази $V=[2*ACA*B]$.

Двовимірний масив (матриця) - це укладений у квадратні дужки перелік елементів масиву, розділених пробілами. Знак; (точка з комою) ставиться наприкінці кожного рядка $M=[1\ 2\ 3;4\ 5\ 6;7\ 8\ 9]$.

1.5. Виконати прямі обчислення у вікні команд

Завдання (N – номер за списком)	Результат розрахунку
N	
N+2	
2-N	
N*2	
N/2	
2^N	

Завдання (N – номер за списком)	Результат розрахунку
$\sin(\pi/N)$	
$\text{atan}(N)*180/\pi$	
$\text{sqrt}(N)$	
$V=[1\ 2\ 3]; V+N$	
$V*N$	
$V.^N$	

2. Розрахунок кіл постійного струму серед *MatLab*.

2.1. Для кола постійного струму (рис. 1.2) методом контурних струмів розрахувати струми гілок та скласти баланс потужностей.

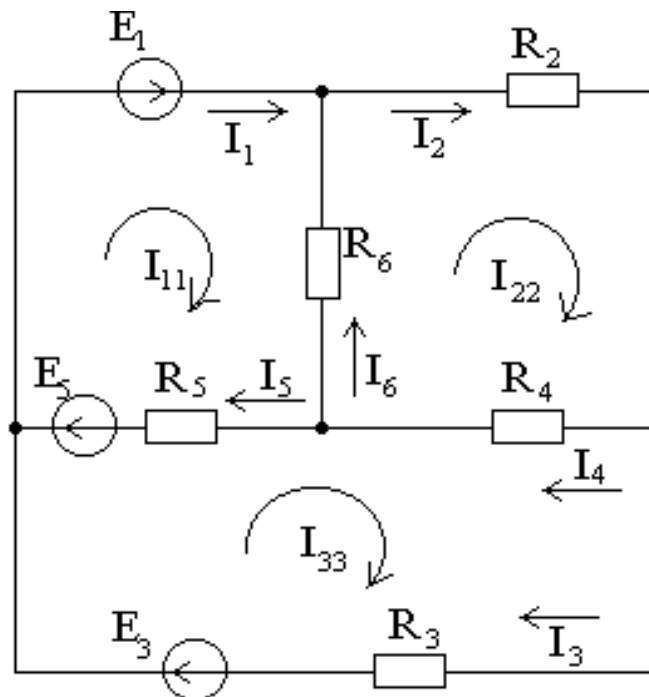


Рисунок 1.2 – Схема електричного кола

Вихідні дані:

$E1 = 22; E2 = 0; E3 = 12; E4 = 0; E5 = 5.5; E6 = 0; R1 = 0; R2=6; R3=1.5;$
 $R4=8; R5 = 1.7; R6=4.5$

2.2. Програма розрахунку

```
>> E11 = E1 + E5; E22 = 0; E33 = E3-E5;
```

```
R11 = R6 + R5; R22 = R2 + R4 + R6; R33 = R3 + R5 + R4;
```

```
R12=-R6; R21=-R6; R23=-R4; R32=-R4; R13=-R5; R31=-R5;
```

```

E=[E11; E22; E33]; R=[R11 R12 R13; R21 R22 R23; R31 R32 R33];
I=inv(R)*E; I1=I(1); I2=I(2); I3=I(3); I4=I(2)-I(3); I5=I(1)-I(3); I6=I(2)-I(1);
PG=E1*I1+E3*I3+E5*I5;
PP=I1^2*R1+I2^2*R2+I3^2*R3+I4^2*R4+I5^2*R5+I6^2*R6;
format bank;
ans=[I1 I2 I3 I4 I5 I6 PG PP]

```

2.3. Введіть (скопіюйте) цю програму у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) вихідні дані, приклад програми розрахунку та натисніть **Enter**.

```

ans =
9.02 4.39 5.09 -0.69 3.93 -4.63 281.13 281.13

```

3. Дослідження кола постійного струму на моделі у середовищі **Matlab/Simulink**.

3.1. Запустіть **MatLab**, натисніть кнопку **Simulink**, натисніть кнопку **Blank Model** відкрийте вікно нової моделі та створіть у ньому модель кола постійного струму (рис. 1.3).

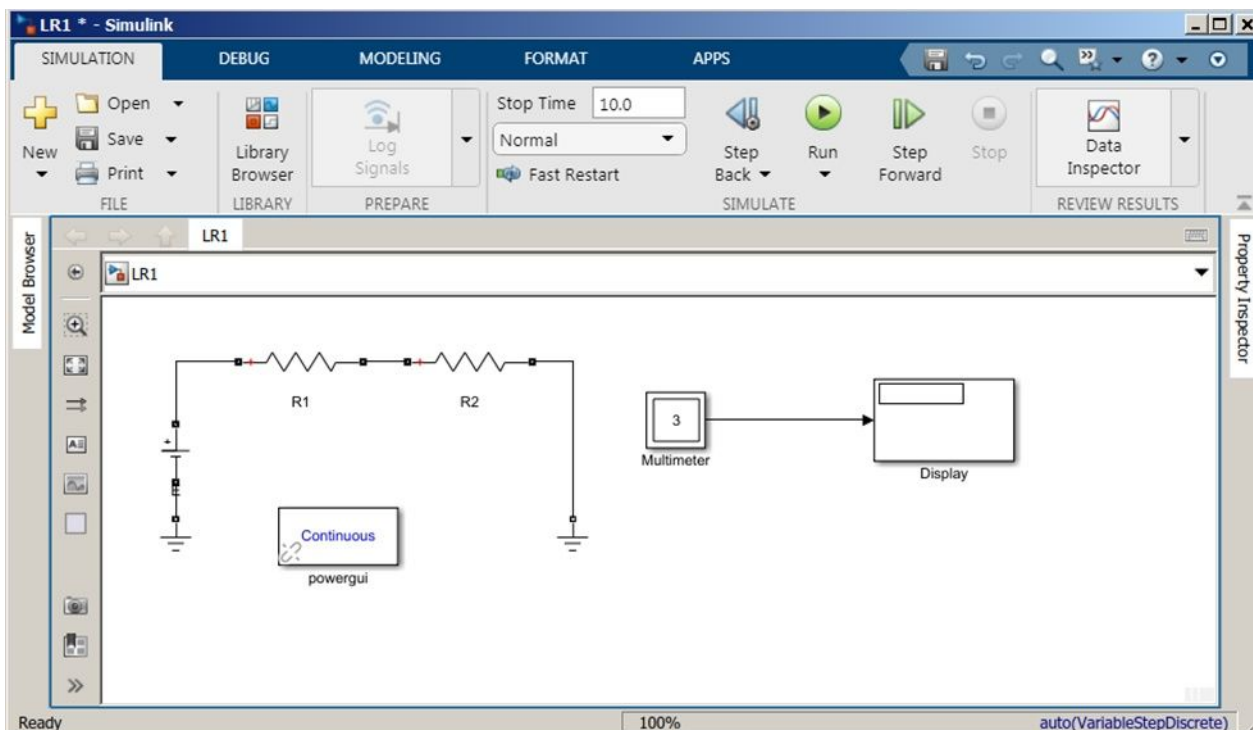


Рисунок 1.3 – Схема моделі кола постійного струму

Знайдіть джерело постійної ЕРС **DC Voltage Source** (папка **Library Browser / Simscape /Electrical / Specialized Power Systems / Sources**),

перетягніть його мишкою у вікно моделі та перейменуйте на *E*. Відкрийте подвійним лівим кліком мишки таблицю параметрів елемента *E* та введіть:

Amplitude – $100 * N$;

Measurement – *Voltage*.

Знайдіть елемент кола з послідовним з'єднанням резистора, індуктивності та ємності *Series RLC Branch* (папка *Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*), перетягніть його мишкою у вікно моделі та перейменуйте на *R1*. Задайте блоку *R1* параметри (рис. 1.4):

- з випадаючого списку *Branch type* виберіть *R*
- *onip* – $10 + N$;
- *Measurement* – *Branch Voltage & Current*.

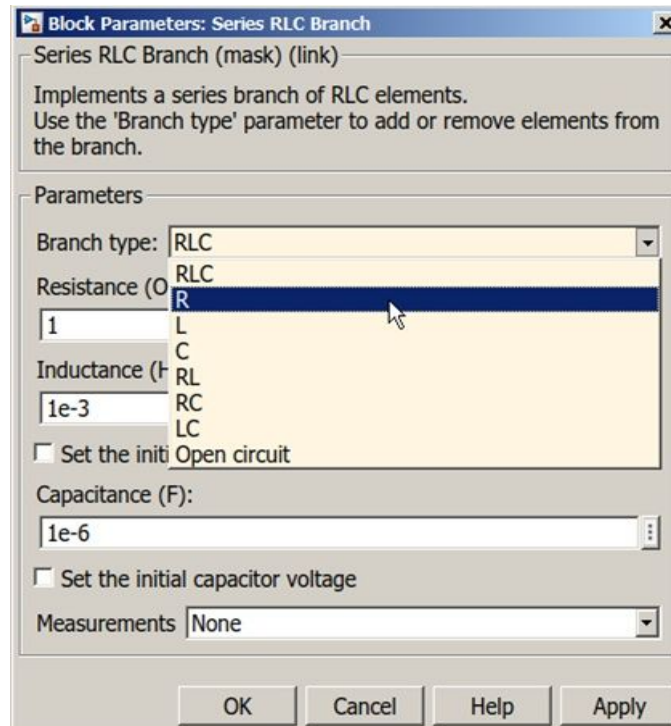


Рисунок 1.4 – Задання параметрів для блоку *R1*

Скопіюйте блок *R1*, вставте копію *R1* у модель, перейменуйте його на *R2* та змініть значення опору на $100 + N$.

Знайдіть заземлювачі *Ground* (папка *Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities*) та перетягніть їх мишкою у вікно моделі.

Знайдіть вимірювач *Multimeter* (папка *Library Browser*

/ *Simscape /Electrical / Specialized Power Systems /Sensors and Measurements*) та перетягніть його мишкою у вікно моделі.

Знайдіть цифровий реєструючий прилад *Display* (папка *Library Browser / Simulink / Sinks*) і перетягніть його мишкою у вікно моделі.

Знайдіть блок середовища для моделей Simscape Electrical Specialized Power Systems *Powergui* (папка *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems*) і перетягніть його мишкою у вікно моделі. Без цього блоку модель не працюватиме і видасть помилку розрахунку.

Перемістіть елементи кола та з'єднайте їх відповідно до схеми рис. 1.3). При необхідності повернути блок користуйтеся правим кліком мишки та командами *format* , *flip* та *Rotate*.

Відкрийте вікно вхідних параметрів *Multimeter*, знайдіть доступні результати вимірювання *Available Measurements* (напряга навантаження U_{R2} , струм навантаження I_{R2} та ЕРС джерела E) та перемістіть їх у вихідне вікно *Selected Measurements*.

3.2. Запустіть моделювання (кнопка *Run*) та запишіть його результати до табл. 1.2.

3.3. Повторіть моделювання для інших значень опору навантаження:

$$R_2=50+N; R_2=20+N; R_2=10+N; R_2 = 5 + N; R_2 = 2 + N; R_2 = 1 + N.$$

Таблиця 1.2 – Результати моделювання

Вихідні дані			Результати моделювання		Результати розрахунку		
$E, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$I_{R2}, А$	$U_{R2}, В$	$P_{R2}, Вт$	$P_E, Вт$	ККД

3.4. За результатами моделювання (струм навантаження I_{R2} та напряга навантаження U_{R2}) розрахуйте у вікні команд *MatLab*:

- потужність навантаження $P_{R2} = I_{R2} \cdot U_{R2}$,

- потужність джерела $P_E = I_{R2} \cdot E$,

- коефіцієнт корисної дії кола $ККД = \frac{P_{R2}}{P_E}$.

3.5. Побудуйте графіки залежностей напруги навантаження U_{R2} , потужності навантаження P_{R2} і ККД від струму джерела $I=I_{R2}$ і переконайтеся,

що максимум потужності навантаження відповідає режиму узгодженого навантаження, коли опір навантаження дорівнює внутрішньому опору джерела.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Досліджувані схеми. Таблиці. Графіки.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Як призначаються змінні в MatLab?
2. Як в MatLab змінити вихідні дані або скоригувати програму?
3. Як в MatLab вводиться вектор?
4. Як розраховуються кола постійного струму в середовищі MatLab?
5. Як досліджуються кола постійного струму в середовищі

MatLab/Simulink.

2 ЗМІШАНЕ З'ЄДНАННЯ ОПОРІВ

1. Мета роботи

Відпрацювання практичних навичок проведення експерименту; дослідження зміни струмів та напруг в Т-подібному колі при вимірюванні опорів на різних ділянках кола.

2. Теоретична частина

Німецький фізик Георг Ом експериментально дослідив, що сила струму I , яка тече через однорідний металевий провідник, пропорційна до напруги U між кінцями цього провідника

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.1)$$

Величину R називають електричним опором провідника. Електричний опір вимірюється в Омах (Ω). Електричний опір 1 Ом має така частина кола, на якій при силі струму 1 А напруга дорівнює 1 В (V).

Опір провідника залежить від його довжини ℓ і площі поперечного перерізу S , а також від матеріалу

$$R = \rho \frac{\ell}{S}. \quad (2.2)$$

Величину ρ називають *питомим опором* матеріалу. Одиниці виміру питомого опору Ом·м ($\Omega \cdot \text{m}$).

Провідники в схемах можуть з'єднуватись послідовно, паралельно та за схемою змішаного з'єднання.

Розглянемо схему послідовного з'єднання провідників (рис. 2.1).

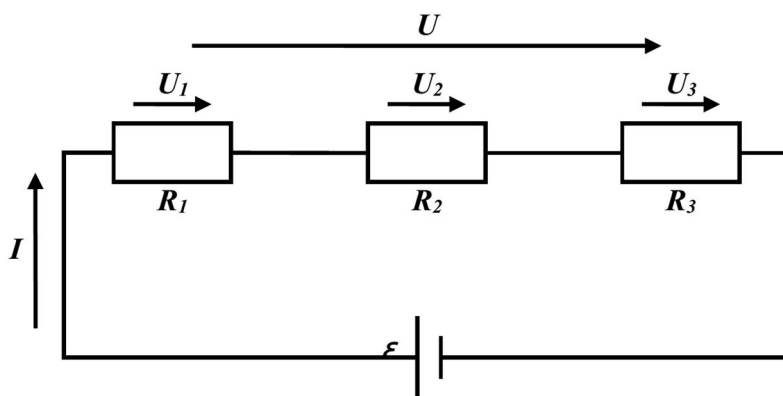


Рисунок 2.1 – Схема послідовного з'єднання провідників

Напруга на такій ділянці кола складається з напруг на кожному провіднику:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (2.3)$$

Запишемо закон Ома для ділянки кола:

$$U = RI, U_1 = R_1 I, U_2 = R_2 I, U_3 = R_3 I, \quad (2.4)$$

де R - повний опір кола, I - загальний струм в колі.

З (2.3), (2.4) одержуємо

$$RI = R_1 I + R_2 I + R_3 I,$$

звідки повний опір кола послідовно з'єднаних провідників

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

Отже, повний опір послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі всіх опорів провідників:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (2.5)$$

де n - кількість послідовно з'єднаних провідників; R - величина опору кожного провідника.

Розглянемо схему паралельного з'єднання провідників, зображену на рис. 2.2.

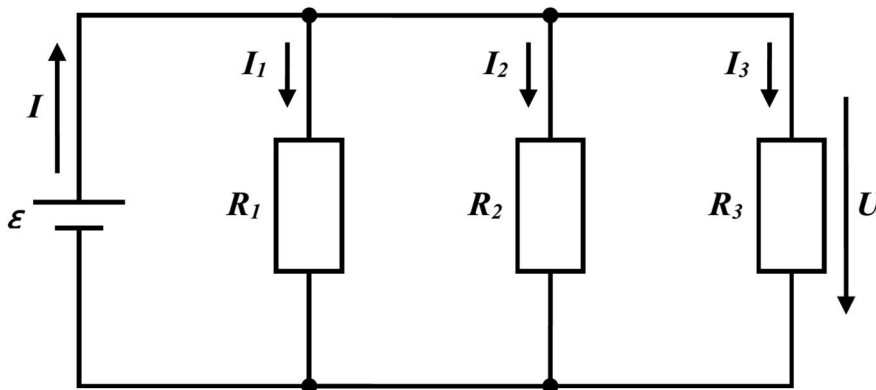


Рисунок 2.2 – Схема паралельного з'єднання провідників

Повний струм I :

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2.6)$$

За законом Ома, для ділянок кола:

$$U = RI, U = R_1 I, U = R_2 I, U = R_3 I, \quad (2.7)$$

З виразів (2.6) і (2.7) отримуємо:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3},$$

звідки

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (2.8)$$

У разі паралельного з'єднання n провідників величина, обернена до опору кола, дорівнює сумі обернених величин опорів усіх паралельно з'єднаних провідників:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (2.9)$$

При змішаному з'єднанні провідників для кожної ділянки кола використовують формули для послідовного та паралельного з'єднання провідників, де спочатку на ділянці кола використовують формули для всіх паралельно з'єднаних провідників, а потім цю ділянку кола замінюють розрахованим опором провідника і далі використовують формули для послідовно з'єднаних провідників.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 2.3) на робочому полі з параметрами елементів згідно з варіантом (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань і розрахунків

Дослід	Виміряні величини											
	$E, \text{В}$	$R_0, \text{Ом}$	$R_1, \text{кОм}$	$R_2, \text{кОм}$	$R_3, \text{кОм}$	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_3, \text{мА}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$U, \text{В}$
1	12	5	N	N	N							
2	12	5	N	2 + N	N							
3	12	5	0,5 + N	2 + N	N							
	Розраховані величини											

N – номер варіанта.

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку

Run.

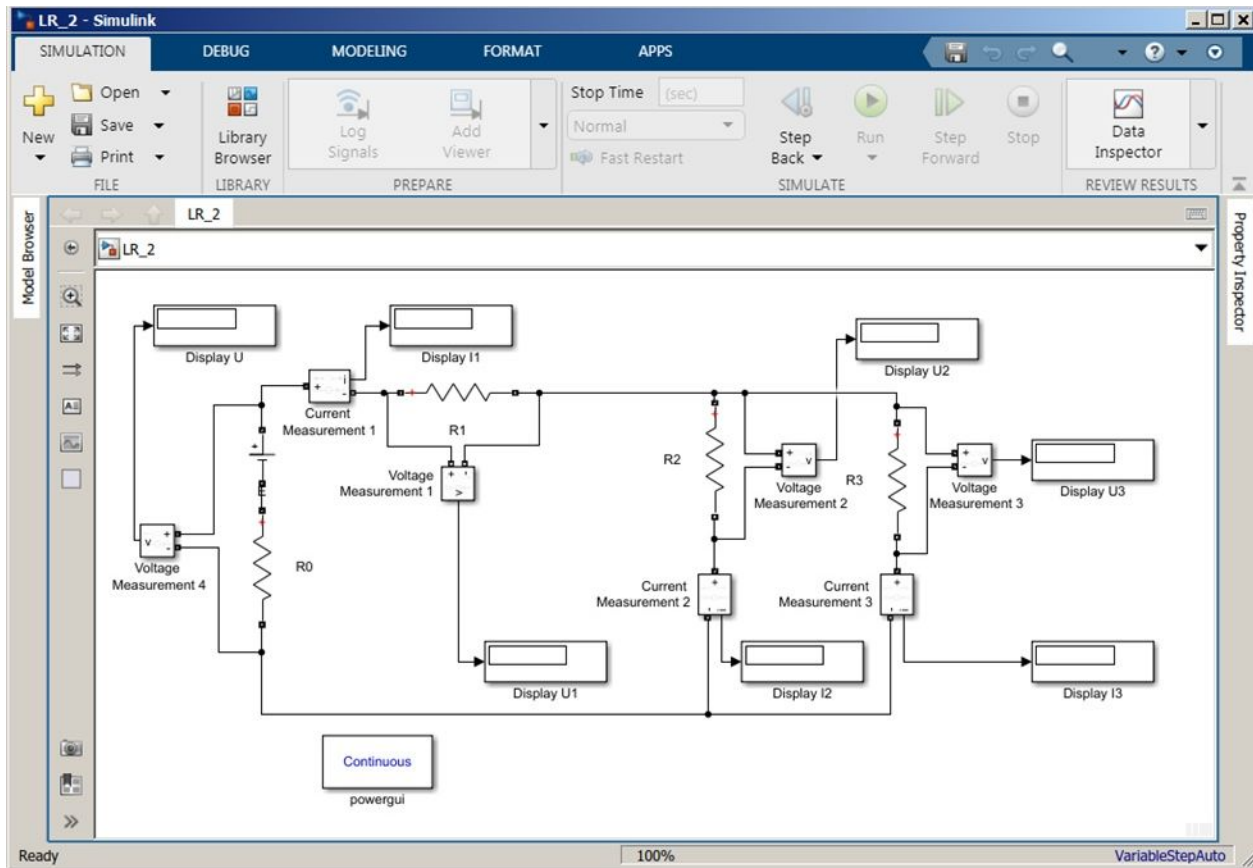


Рисунок 2.3 – Досліджувана схема

Дослід 1. Увімкніть джерело постійного струму і виконайте вимірювання струмів I_1 , I_2 , I_3 та напруг, результати досліду запишіть у табл. 2.1.

Дослід 2. Змініть значення опорів електричного кола згідно зі значеннями табл. 2.1 і повторіть дослід 1.

Дослід 3. Змініть значення опорів електричного кола згідно зі значеннями табл. 2.1 і повторіть дослід 1.

3. За значеннями E , R_1 , R_2 , R_3 проведіть розрахунок струмів на усіх вітках кола та напруг на опорах.

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3};$$

$$I_1 = \frac{E}{R + R_0};$$

$$U_1 = I_1 R_1;$$

$$U_2 = U_3 = I_1 \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3};$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2};$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}.$$

4. Порівняйте розраховані та експериментальні значення величин.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.
5. Контрольні запитання та завдання

5. Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
2. Як виглядає закон Ома для повного кола?
3. Як розрахувати опір послідовно з'єднаних резисторів?
4. Як розрахувати опір паралельно з'єднаних резисторів?
5. Який порядок розрахунку змішаного з'єднання резисторів?
6. Як підключаються амперметр та вольтметр і які величини вони вимірюють?

3 РОБОТА ДЖЕРЕЛА ЕРС У ГЕНЕРАТОРНОМУ ТА АКУМУЛЯТОРНОМУ РЕЖИМАХ

1. Мета роботи

Набуття практичних навичок дослідження роботи джерел електрорушійної сили в режимах генератора та акумулятора електричної енергії.

2. Теоретична частина

Система заряджених тіл є носієм енергії. Ця енергія надається системі джерелами в процесі утворення зарядів і може бути знову повернена джерелам або перетворена в інші види енергії. Для одержання виразу енергії розглянемо роботу, яку необхідно виконати для перенесення заряду q з точки a до точки b провідного середовища однакового поперечного перерізу.

Робота, яка виконується силами електричного поля при перенесенні заряду q на шляху $d\ell$ провідного середовища, дорівнює

$$dA = (\bar{F} d\bar{\ell}) = qdu. \quad (3.1)$$

Рівняння (3.1) можна подати так:

$$dA = qdu = uidt. \quad (3.2)$$

Повну роботу на шляху $a - b$ провідного середовища отримаємо після інтегрування рівняння (3.2) в межах від a до b :

$$A_{ab} = \int_a^b qdu = q u_{ab}. \quad (3.3)$$

Швидкість виконання роботи, тобто швидкість перетворення електромагнітної енергії за одиницю часу, називається миттєвою потужністю:

$$p = \frac{dA}{dt}. \quad (3.4)$$

У колі постійного струму $A = qU$, $q = It$, тоді

$$p = \frac{A}{t} = UI. \quad (3.5)$$

Одиницею вимірювання потужності є *ват* [W]:

$$[P] = [U][I] = 1V \cdot 1A = 1 \text{ Вт}.$$

Робота сторонніх сил по переміщенню одиничного додатного заряду називається електрорушійною силою (ЕРС) ε . Тоді закон Ома для повного кола – сила струму в колі дорівнює відношенню електрорушійної сили джерела до суми опорів зовнішньої R і внутрішньої $R_{\text{вн}}$ ділянок кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + R_{\text{вн}}}. \quad (3.6)$$

Джерело напруги працює в *режимі генератора*, якщо $P > 0$. Умовою цього є узгоджений напрям ЕРС та струму на даній ділянці.

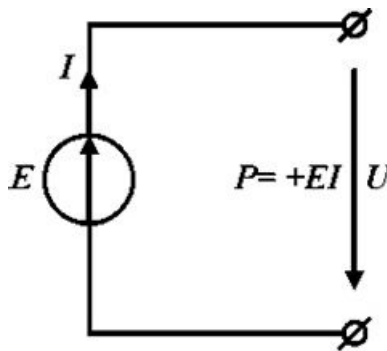


Рисунок 3.1 – Узгоджений напрям ЕРС та струму

Джерело напруги працює в *режимі акумулятора (споживача)*, якщо $P < 0$, що має місце при зустрічному напрямку ЕРС та струму даної ділянки.

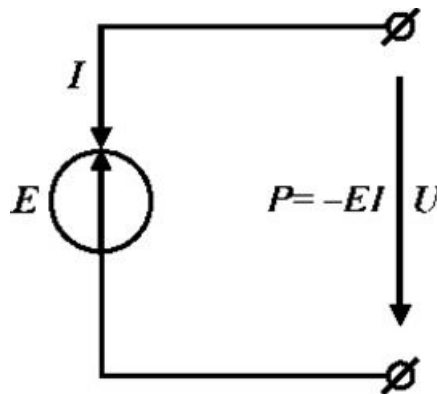


Рисунок 3.2 – Зустрічний напрям ЕРС та струму

3. План роботи

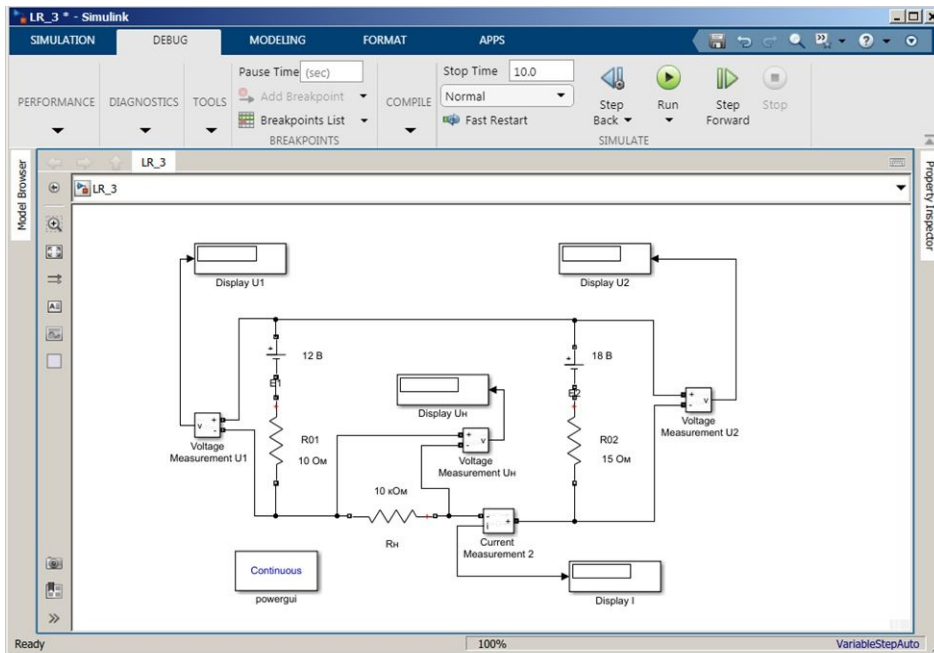
1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 3.3). Внутрішні опори джерел ЕРС на схемі представлені резисторами, відповідно, R_{01} та R_{02} . Навантаження на схемі представлено резистором $R_{\text{н}}$.
 $R_{01}=50+N$; $R_{02}=20+N$; $R_{\text{н}}=10 \cdot N$.

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку

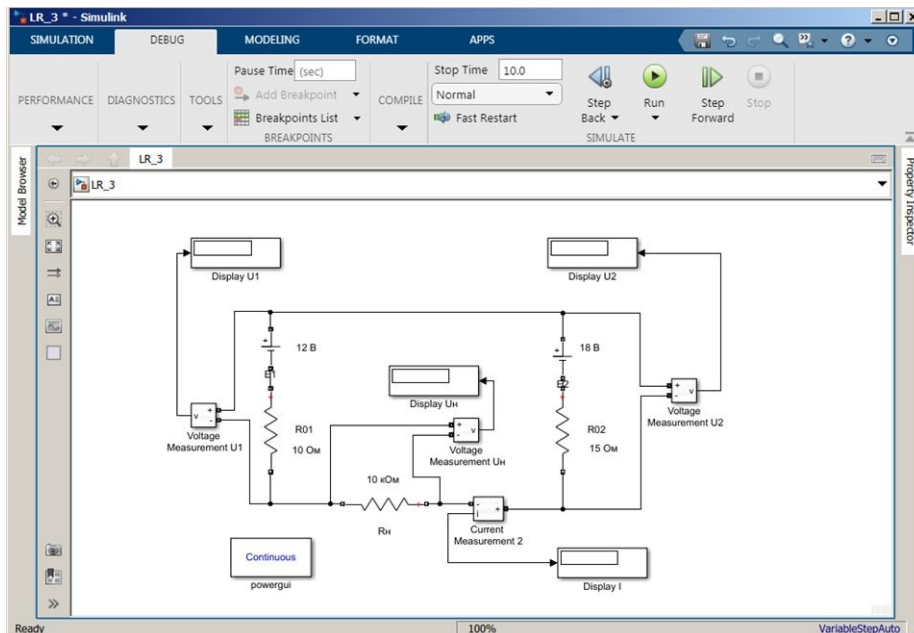
Run.

Використовуючи вольтметр, необхідно виміряти напруги E_1 ; E_2 ; E_H та струм у колі для першої схеми із *узгодженим* включенням джерел ЕРС (рис. 3.3,а).

Далі необхідно провести аналогічні вимірювання напруг на E_1 , E_2 і R_H та струму в колі для схеми з *зустрічним* включенням джерел ЕРС (рис. 3.3,б).



а)



б)

Рисунок 3.3 – Схема експерименту:

а – узгоджене включення; б – зустрічне включення.

3. Провести розрахунки для обох режимів, результати занести в табл.

3.1. Напряга U_0 розраховується окремо для режимів генератора та акумулятора.

$$U_0 = E - U \text{ (генератор);}$$

$$U_0 = U - E \text{ (акумулятор);}$$

$$P = I_{(ексн)} \cdot U;$$

$$R_o = \frac{U_0}{I_{(ексн)}};$$

$$I_{(розр)} = \frac{E_1 \pm E_2}{R_{01} + R_{02} + R_n};$$

$$U_H = I_{(розр)} \cdot R_n;$$

$$P_n = U_n \cdot I;$$

$$P_0 = U_0 \cdot I;$$

$$\eta = \frac{P_n}{P_1 + P_2},$$

Таблиця 3.1 – Результати вимірювань і розрахунків

З'єднання джерел	Дослідні дані											
	$E_1, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_n, \text{В}$	$I_n, \text{мА}$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$				
Узгоджене з'єднання	5+N		3+N									
Зустрічне з'єднання	5+N		3+N									
З'єднання джерел	Розрахункові дані											
	$U_{01}, \text{В}$	$U_{02}, \text{В}$	$R_{01}, \text{Ом}$	$R_{02}, \text{Ом}$	$I, \text{мА}$	$U_n, \text{В}$	$P, \text{мВт}$	$P_2, \text{мВт}$	$P_{01}, \text{мВт}$	$P_{02}, \text{мВт}$	$P_n, \text{мВт}$	η
Узгоджене з'єднання												
Зустрічне з'єднання												

де N – номер варіанта.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схеми дослідження. Таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунок зустрічного і узгодженого

з'єднання джерел ЕРС за результатами досліджень.

4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. За якої умови джерело електричної енергії буде працювати в генераторному режимі?

2. За якої умови джерело електричної енергії буде працювати в акумуляторному режимі?

3. Як визначається потужність електричного струму?

4. Сформулюйте узагальнений закон Ома.

5. Назвіть одиниці вимірювання струму, напруги, опору, провідності, потужності та енергії.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ КІРХГОФА

1. Мета роботи

Дослідження зміни струмів та напруг у розгалуженому електричному колі, розуміння суті законів Кірхгофа.

2. Теоретична частина

Електричні схеми характеризуються електричними вузлами та вітками.

Вузол – це точка електричного кола, в якій з'єднані три або більше віток. Кількість вузлів у електричному колі позначимо літерою n .

Вітка – це частина електричної схеми з одним струмом між двома вузлами. У гілці всі елементи з'єднані послідовно і проходить тільки один струм. Кількість віток в електричному колі позначимо літерою m .

Закони Кірхгофа є основними законами електротехніки, які однозначно визначають співвідношення між ЕРС, струмами та напругами електричного кола.

Перший закон Кірхгофа випливає з принципу неперервності електричного струму і є його наслідком для замкненої поверхні S , що охоплює вузол електричного кола, в якому збігаються струми і провідності віток.

Згідно з принципом неперервності електричного струму для електричних кіл постійного струму, отримаємо:

$$\sum I_k = 0. \quad (4.1)$$

Перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів віток, які належать до даного вузла електричного кола, дорівнює нулю.

Для запису рівняння за першим законом Кірхгофа необхідно спочатку позначити стрілками напрямки струмів у вітках схеми. Наприклад припустимо, що $I > 0$, якщо його стрілка спрямована до вузла, та $I < 0$, якщо від вузла. Тоді рівняння за цим законом для вузла (рис. 4.1) запишемо так:

$$I_1 + I_2 - I_3 + \dots + I_p = 0. \quad (4.2)$$

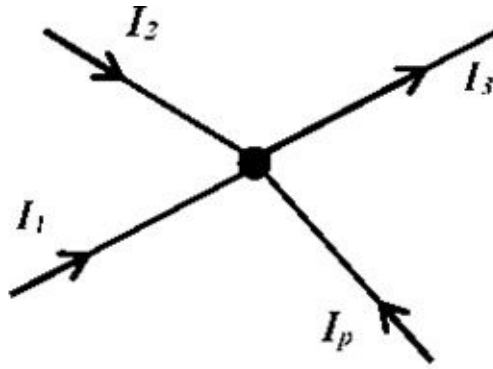


Рисунок 4.1 – Напрямок струмів у вузлі

Розглянемо замкнений контур (рис. 4.2) деякого електричного кола. У загальному випадку в контурі діє кілька джерел електроенергії з ЕРС: E_1, E_2, E_3, \dots . У вітках цього контуру проходять струми I_1, I_2, I_3, \dots . У вузлах a, b, c, \dots відгалужуються струми I_a, I_b, I_c, \dots . Позначимо через R_1, R_2, R_3, \dots опори віток, при чому ці опори враховують внутрішні опори джерел енергії E_1, E_2, E_3, \dots .

Тоді

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{k=1}^n E_k \quad (4.3)$$

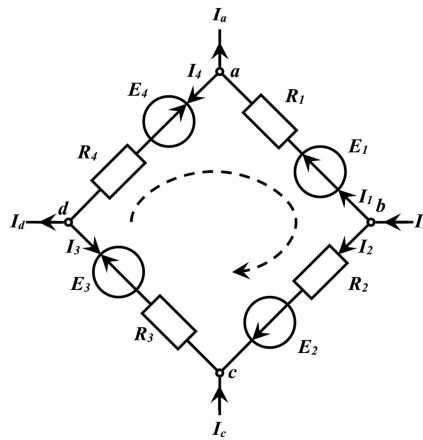


Рисунок 4.2 – Замкнений контур

Рівняння (4.3) виражає **другий закон Кірхгофа**: алгебраїчна сума спадів напруг на всіх елементах замкненого контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі.

Для наведеного прикладу спочатку оберемо додатний напрям обходу контуру - за годинниковою стрілкою, тоді

$$- I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4 = - E_1 + E_2 + E_3 + E_4.$$

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему рис. 4.3.

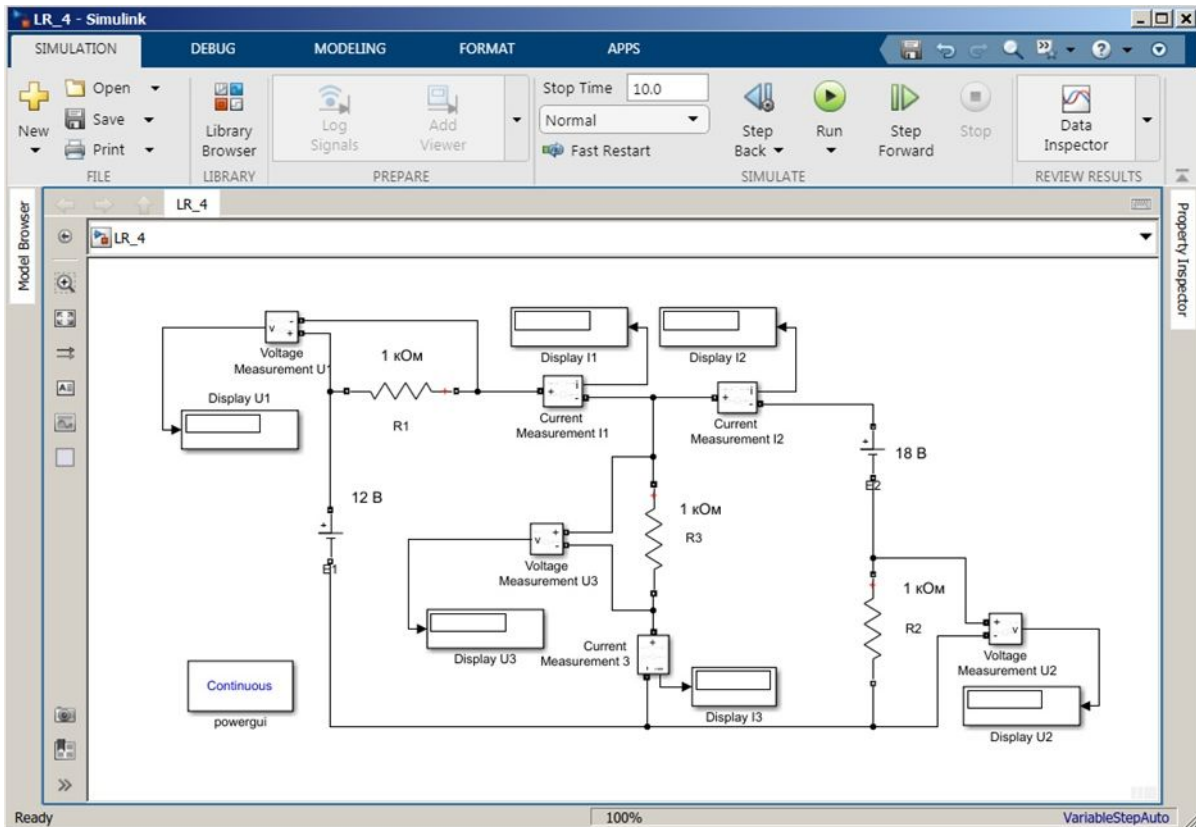


Рисунок 4.3 – Досліджувана схема

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку **Run**.

Дослід 1. Виміряти і записати значення E_1 та E_2 в табл. 4.1.

Дослід 2. Увімкнути схему й виміряти струми та напруги на опорах.

Дані вимірювань занести в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Таблиця 4.4.1 Результати вимірювань і розрахунків

	Величини										
	E_1 , В	E_2 , В	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В
Дослід	$2 + N$	$4 + N$	$1 + N$	$2 + N$	$3 + N$						
Розрахунок	***	***	***	***	***						

де *** – вказані комірки не заповнюються; N – номер варіанта

3. Перевірити перший закон Кірхгофа для всіх вузлів кола.

4. Перевірити другий закон Кірхгофа для двох контурів.

5. За даними E_1 та E_2 і відомими значеннями опорів розрахувати на основі законів Кірхгофа струми I_1 , I_2 , I_3 , занести їх у табл. 4.1 і порівняти з

експериментальними даними.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Сформулюйте та запишіть перший закон Кірхгофа.
2. Сформулюйте та запишіть другий закон Кірхгофа.
3. Як розрахувати електричне коло, використовуючи закони Кірхгофа?
4. Поясніть, як було розраховане досліджуване електричне коло.
5. Поясніть отримані результати та розбіжності між експериментальними та теоретичними даними.

5 МЕТОД НАКЛАДАННЯ

1. Мета роботи

Перевірити на досліді, що струм у довільній вітці складного кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створених кожною ЕРС окремо.

2. Теоретична частина

Якщо коло має кілька джерел живлення, то для його розрахунку можна застосовувати метод накладання (*суперпозиції*). Цей метод використовує принцип незалежності дії ЕРС. Струми, які створюються кількома ЕРС, є алгебраїчною сумою струмів, що створюються кожним джерелом окремо. Цей метод має змогу замінити обчислення складних кіл розрахунком елементів кіл з одним джерелом живлення в кожному.

Обчислення складних кіл із кількома джерелами живлення можна здійснити в такий спосіб:

1) складне коло замінюють кількома елементарними колами, кожне з яких має одне джерело, інші замінюють опорами, що дорівнюють опорам внутрішніх джерел;

2) обчислюють елементарні кола, визначаючи величини та напрямки часткових струмів у кожній вітці;

3) у кожній вітці знаходять справжні струми як алгебраїчну суму відповідних часткових струмів.

Наприклад, розглянемо коло, наведене на рис. 5.1.

Спочатку розглянемо коло, в якому залишимо джерело E_1 , а замість джерела E_2 встановимо перемичку (рис. 5.2), оскільки внутрішній опір цієї ЕРС дорівнює нулю.

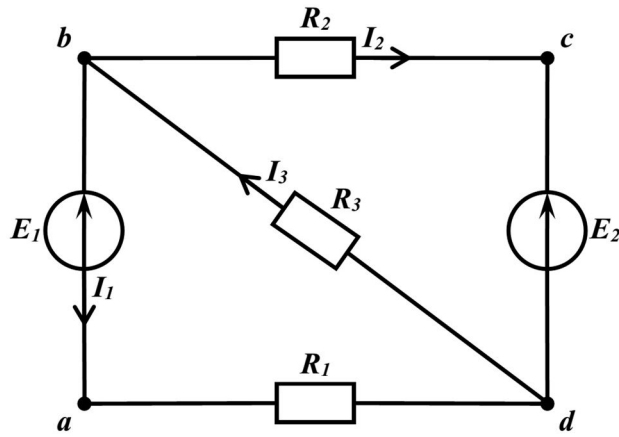


Рисунок 5.1 – Досліджувана схема

Усі часткові струми у вітках позначимо зі штрихом. Тоді, за законом Ома, можна записати:

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}};$$

$$I'_3 = \frac{-E_1 + I'_1 R_1}{R_3};$$

$$I'_2 = I'_3 - I'_1.$$

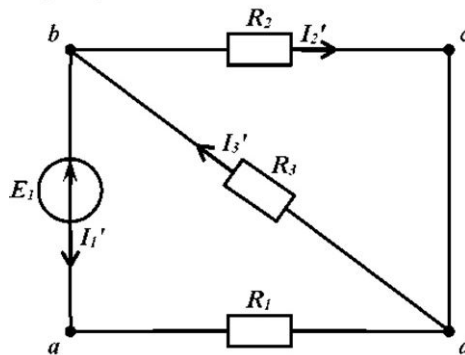


Рисунок 5.2 – Схема без джерела E_2

Далі можна розглянути коло без джерела E_1 , але врахувати його внутрішній опір R_1 (рис. 5.3). Часткові струми позначимо двома штрихами:

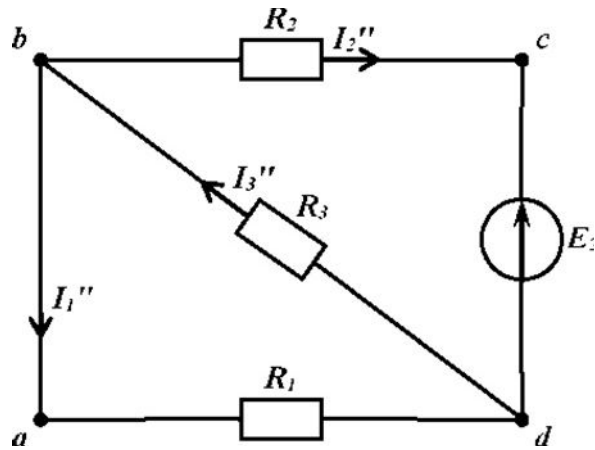


Рисунок 5.3 – Схема без джерела E_1

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}};$$

$$I_3'' = \frac{-E_2 + I_2'' R_2}{R_3};$$

$$I_1'' = I_3'' - I_2''.$$

Справжні струми є сумою відповідних часткових струмів електричних кіл, тобто:

$$I_1 = I_1' + I_1'';$$

$$I_2 = I_2' + I_2'';$$

$$I_3 = I_3' + I_3''.$$

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 5.4).

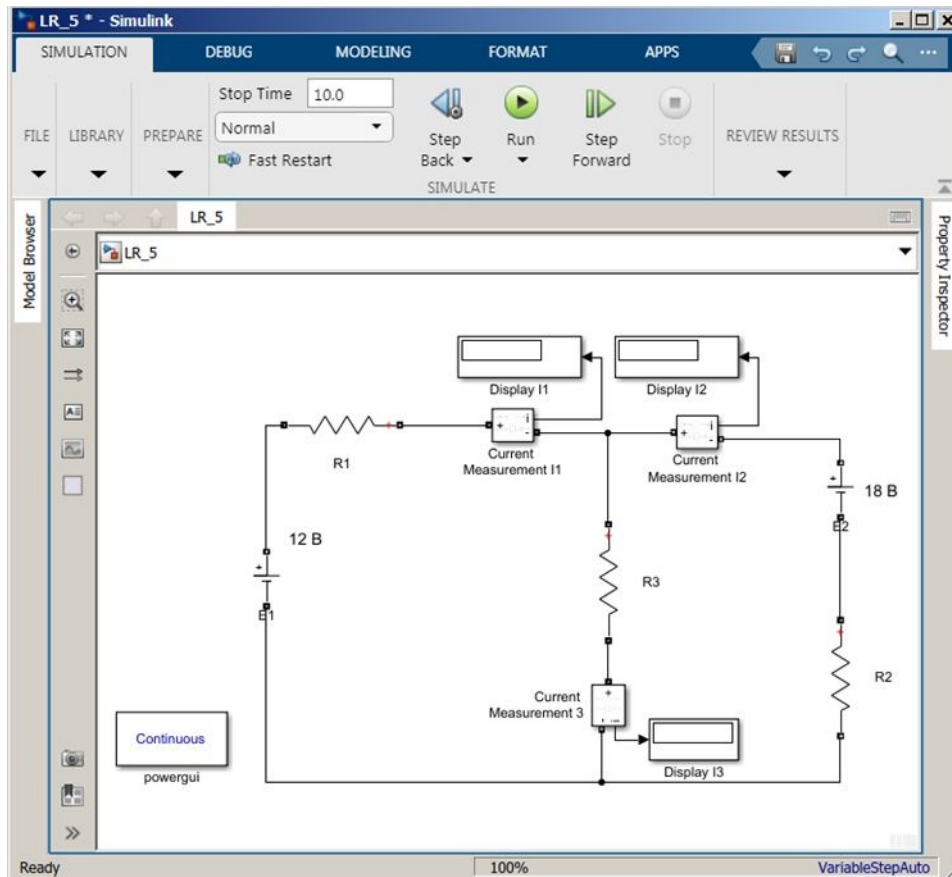


Рисунок 5.4 – Досліджувана схема

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку **Run.**

Дослід 1. Увімкнути схему й виміряти струми I_1, I_2, I_3 .

Дослід 2. Вимкнути джерело E_2 і виміряти часткові струми I'_1, I'_2, I'_3 .

Дослід 3. Вимкнути джерело E_1 і виміряти часткові струми I''_1, I''_2, I''_3 .

Результати вимірювань занести в табл. 5.1.

При проведенні експерименту внутрішнім опором джерел нехтуємо. При вимірюванні струмів зверніть увагу на напрям струмів!

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань і розрахунків

	$E_1,$ В	$E_2,$ В	$R_1,$ кОм	$R_2,$ кОм	$R_3,$ кОм	$I_1,$ мА	$I_2,$ мА	$I_3,$ мА
Результати дослідження	$2 + N$	$4 + N$	N	$N + 1$	$N + 5$			
Розрахунок за дослідними даними	***	***	***	***	***			
Розрахунок за початковими даними	$2 + N$	$4 + N$						

Таблиця 5.2 – Результати вимірювань і розрахунків

	I'_1 , мА	I'_2 , мА	I'_3 , мА	I''_1 , мА	I''_2 , мА	I''_3 , мА
Результати досліджу						
Розрахунок за дослідними даними	***	***	***	***	***	***
Розрахунок за початковими даними						

де *** – вказані комірочки не заповнюються; N – номер варіанта

3. Користуючись методом накладання провести розрахунок струмів у вітках за початковими та дослідними даними.

4. Порівняти розраховані та дослідні дані.

5. Контрольні запитання

1. Сформулюйте принцип накладання.

2. Який порядок розрахунку електричних кіл методом накладання?

3. Яке призначення та характеристики використаних у роботі елементів електричного кола?

4. Сформулюйте та запишіть закони Кірхгофа.

5. Поясніть отримані результати та розбіжності між експериментальними та теоретичними даними.

6 КОЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗІ ЗМІННИМ ОПОРОМ НАВАНТАЖЕННЯ

1. Мета роботи

Набуття практичних навичок дослідження роботи джерел електрорушійної сили в режимах генератора та акумулятора електричної енергії.

2. Теоретична частина

Розрізняють характерні режими роботи джерел живлення:

- номінальний;
- неробочий (або режим неробочого ходу);
- короткого замикання;
- узгоджений.

Режим роботи визначається співвідношенням між опором навантаження R_n та внутрішнім опором джерела живлення R (рис. 6.1)

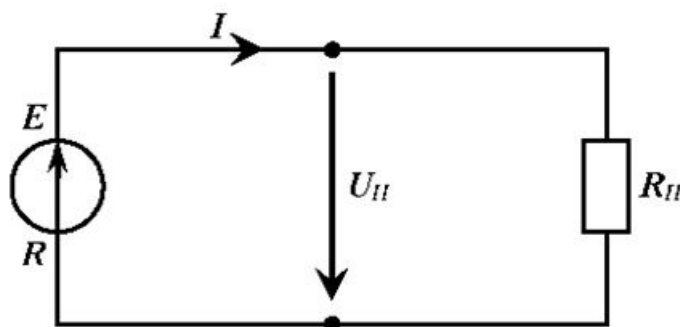


Рисунок 6.1 – Коло постійного струму зі змінним опором

Номінальний режим гарантує оптимальні параметри джерела живлення, досить високий ККД, надійність і довговічність.

Неробочий режим – це режим, за якого зовнішнє коло розімкнене. Напруга на клеммах джерела максимальна і дорівнює ЕРС, струм у колі відсутній. Цей режим також називають неробочим ходом (НХ).

Режим короткого замикання (КЗ) реалізується тоді, коли опір навантаження дорівнює нулю ($R_n = 0$). Напруга на приймачі енергії відсутня, струм короткого замикання дуже великий.

Узгоджений режим – це такий режим, за якого у навантаження

передається максимальна потужність від джерела. При цьому ККД передачі нижчий за ККД у номінальному режимі.

Режими роботи джерел живлення визначаються співвідношеннями опорів зовнішнього та внутрішнього кіл. Передавання потужності в навантаження характеризують такі величини:

P – потужність, що розвиває джерело живлення;

P_n – потужність, що передається у навантаження;

η – ККД передавання потужності.

Використовуючи закон Ома для розглянутого кола

$$I = \frac{E}{R + R_n},$$

потужність, що розвиває джерело живлення, можна описати співвідношенням

$$P = E \cdot I = \frac{E^2}{R + R_n}.$$

Дослідження залежності $P = P(R_n / R)$ у різних режимах роботи показують:

1) у режимі НХ ($R_n \rightarrow \infty$) $I=0, P = 0$;

2) у режимі КЗ ($R_n = 0$) $I = I_k = \frac{E}{R}, P = \frac{E^2}{R}$;

3) в узгодженому режимі ($R_n = R$), $P = \frac{E^2}{2R}$.

Залежність $P = P(R_n / R)$ наведена на (рис. 6.2). Вісь ординат у цьому разі характеризує режим короткого замикання, а неробочий режим (НР) визначається нескінченністю на вісі абсцис.

Коли зовнішній та внутрішній опори однакові ($R_n / R = 1$), джерело розвиває половину максимальної потужності.

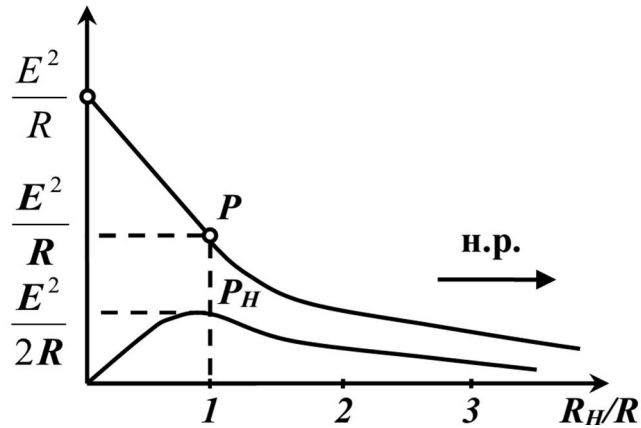


Рисунок 6.2 – Залежність $P = P(R_n/R)$

Потужність, що передається до навантаження.

$$P_n = I^2 R_n = \frac{E_2 R_n}{(R + R_n)^2}.$$

У граничних режимах:

- 1) неробочого ходу ($R_n \rightarrow \infty$), $P_n = 0$;
- 2) короткого замикання ($R_n = 0$), $P = 0$.

Дослідимо $P = P(R_n/R)$ на екстремум, для чого продиференціюємо вираз за R_n і частинну похідну прирівняємо до нуля. Тоді отримаємо умову $R_n = R$,

при цьому $R_n = \frac{E^2}{4R}$. Отже, максимальна потужність передається до навантаження, коли $R_n = R$. Цей режим називається *узгодженим* (УР).

Залежність $\eta = \eta(R_n/R)$ визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{R_n}{R + R_n} = \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R}}.$$

У граничних режимах:

- 1) неробочому ($R_n \rightarrow \infty$), $\eta \rightarrow 1$;
- 2) короткого замикання ($R_n \rightarrow 0$), $\eta = 0$;
- 3) узгодженому $R_n = R$, $\eta = 0,5$.

Отже номінальний режим забезпечується, коли $R_n > R$. У цьому режимі значна частина потужності передається в навантаження при досить великому ККД ($\eta > 0,5$).

Режими роботи джерела визначаються співвідношенням R_n/R . Якщо

джерело живлення має дуже малий внутрішній опір ($R \rightarrow \infty$), то таке джерело підтримує порівняно сталу напругу на навантаженні й називається *джерелом ЕРС*.

Є джерела живлення, що мають дуже великий внутрішній опір. Струм у колі з таким джерелом майже не залежить від опору навантаження й підтримується порівняно сталим. Таке джерело називається *джерелом струму*.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 6.3), $R_0 = N$ кОм, де N – номер варіанта.
2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку **Run**.

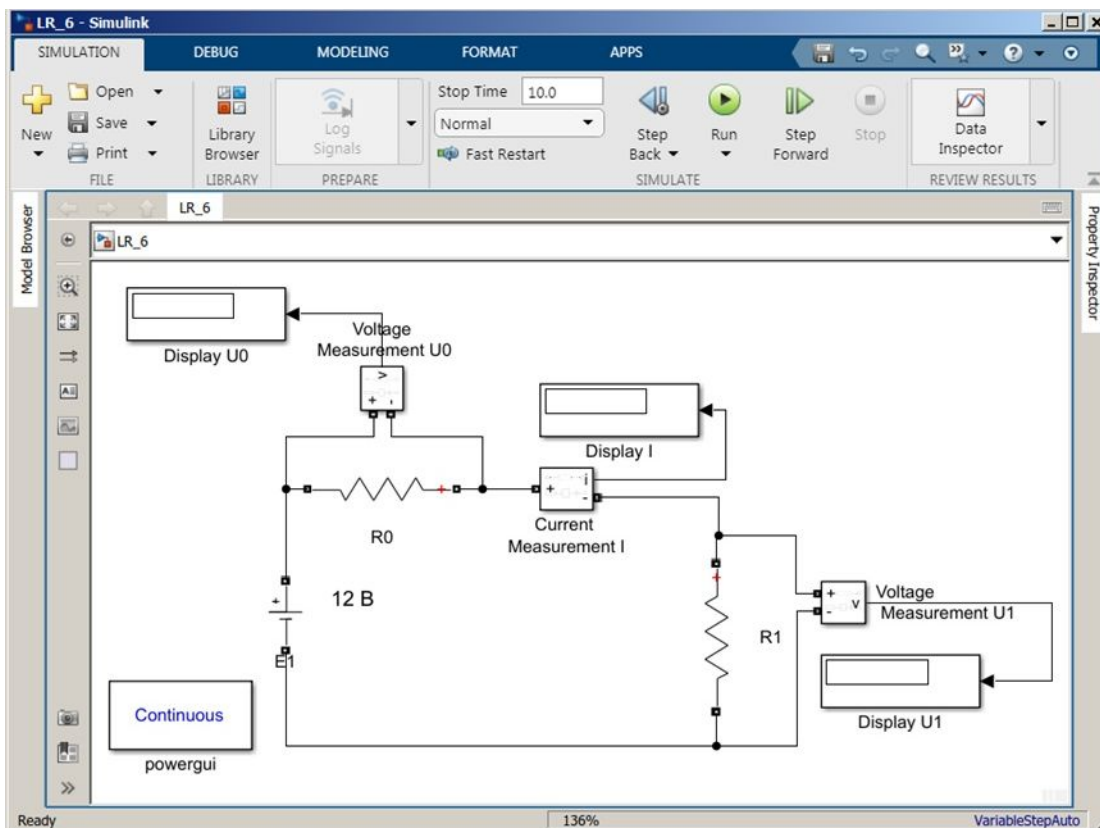


Рисунок 6.3 – Досліджувана схема

Дослід 1. При $R_1 = 0$ провести вимірювання струму і напруг U_0 , U_1 .
Результати вимірювань занести в табл. 6.1.

Дослід 2. При $R_1 = 0,5R_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0 , U_1 .
Результати вимірювань занести в табл. 6.1.

Дослід 3. При $R_1 = R_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0 , U_1 .

Результати вимірювань занести в табл. 6.1.

Дослід 4. При $R_1 = 2R_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 .

Результати вимірювань занести в табл. 6.1.

Дослід 5. При $R_1 = 3R_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 .

Результати вимірювань занести в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Таблиця 4.6.1 Результати вимірювань і розрахунків

№ досліду	Результати дослідів				Розраховані величини					
	$E, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$U_0, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$R_0, \text{кОм}$	$R_1, \text{кОм}$	$P, \text{Вт}$	$P_0, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	$\eta, \%$
1. $R_1 = 0$										
2. $R_1 = 0,5R_0$										
3. $R_1 = R_0$										
4. $R_1 = 2R_0$										
5. $R_1 = 3R_0$										

3. Розрахувати потужності P, P_0, P_1 та ККД η передачі енергії.

4. Побудувати графічні залежності напруг U_1, U_0 , потужностей P, P_0, P_1 і ККД від струму.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця. Графіки
3. Розрахункові формули. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Яка умова передачі максимальної потужності від джерела до навантаження?
2. Як визначається коефіцієнт корисної дії передачі енергії від джерела до навантаження?
3. Що таке умова узгодженого навантаження і чому дорівнює ККД при цій умові?
4. Поясніть порядок розрахунку досліджуваного кола.
5. Поясніть з яких міркувань обирають опір навантаження.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ.

ФЕРОРЕЗОНАНС НАПРУГИ

1. Мета роботи

Придбання практичних навичок при дослідженні режиму ферорезонансу напруга в електричних колах, що містять послідовно з'єднані конденсатор і індуктивну котушку з феромагнітним осердям

2. Теоретичні відомості

Резонанс напруги у колі, що містить котушку з насиченим феромагнітним магнітопроводом, з'єднану послідовно з конденсатором називається ферорезонансом напруги.

У колах з нелінійною індуктивністю, що містять ємність, плавна зміна напруга може викликати скачки фази й амплітуди основної гармоніки струму, і, навпаки, плавна зміна струму може супроводжуватися стрибкоподібною зміною фази й амплітуди основної гармоніки напруги на деяких ділянках кола.

Під *ферорезонансом напруги* розуміють стрибкоподібну зміну знака кута зсуву фаз між основними гармоніками напруги й струму, а також різку зміну величини силу струму при незначній зміні напруги на вході кола.

Ці явища пов'язані з нелінійністю котушки зі сталлю.

У лінійних колах подібні явища принципово неможливі.

Розглянемо розрахункову схему послідовно з'єднаних ідеальних конденсатора й котушки з феромагнітним осереддям (рис. 7.1).

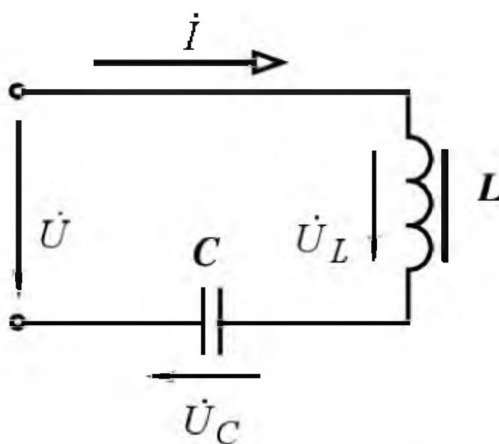


Рисунок 7.1 – Розрахункова схема послідовно з'єднаних ідеального конденсатора й котушки з феромагнітним осереддям

Котушка з феромагнітним осердям є нелінійним елементом, то при синусоїдній напрузі і синусоїдному магнітному потоці струм має несинусоїдну форму (рис. 7.2).

Аналіз ферорезонансу з урахуванням несинусоїдності форми кривої струму представляє значні труднощі, тому застосуємо метод еквівалентних синусоїд (еквівалентний струм i_e).

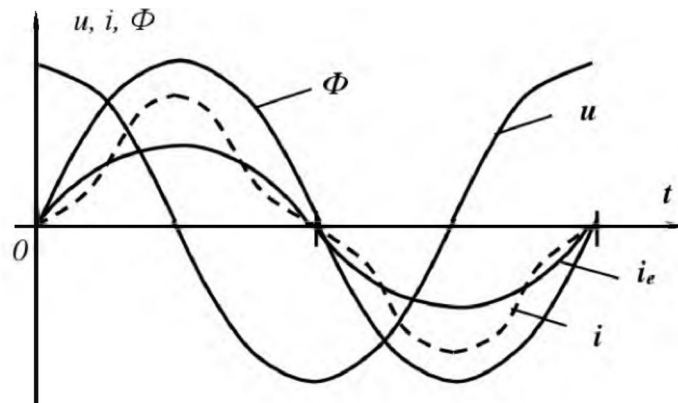


Рисунок 7.2 – Графічні залежності миттєвої напруги, магнітного потоку, струму і еквівалентного струму у котушці з феромагнітним осердям

Крім того, для спрощення міркувань приймемо, що котушка з феромагнітним магнітопроводом, яка включена в електричне коло, не має петлі гістерезису, вихрових струмів ($R_m = 0$), активний опір проводу обмотки дорівнює нулю ($R = 0$) тобто вона ідеальна і конденсатор ідеальний. Тоді векторна діаграма електричного кола з урахуванням спрощень має вигляд (рис. 7.3).

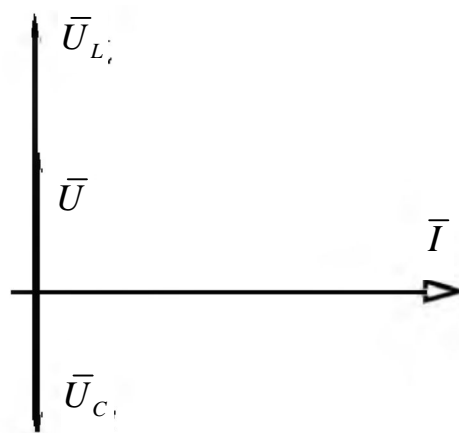


Рисунок 7.3 – Векторна діаграма напруг і струму з урахуванням спрощень при ферорезонансі напруг

Прийmemo початкову фазу напруга на індуктивності \bar{U}_L рівною 90° , тобто напруга випереджає струм на 90° , напруга на ємності \bar{U}_C відстає від струму на 90° (рис. 7.3).

Прикладена напруга на затискачах кола

$$\bar{U} = \bar{U}_L + \bar{U}_C. \quad (7.1)$$

Оскільки вектори \bar{U}_L й \bar{U}_C спрямовані протилежно (рис. 7.3), тоді величина прикладеної напруги до затискачів кола визначається як

$$U = |U_L - U_C|. \quad (7.2)$$

ВАХ котушки $U_L(I)$ є кривою лінією. ВАХ конденсатора $U_C(I)$ є похилою прямою, що проходять через початок координат (рис. 7.4). Величину ємності завжди можна вибрати такою, щоб ВАХ конденсатора перетнула ВАХ котушки з феромагнітним осердям. Різниця між залежностями $U_L(I)$ і $U_C(I)$ утворюють криву $U(I)$, ординати якої визначають значення прикладеної напруги при різних значеннях струму (рис. 7.4).

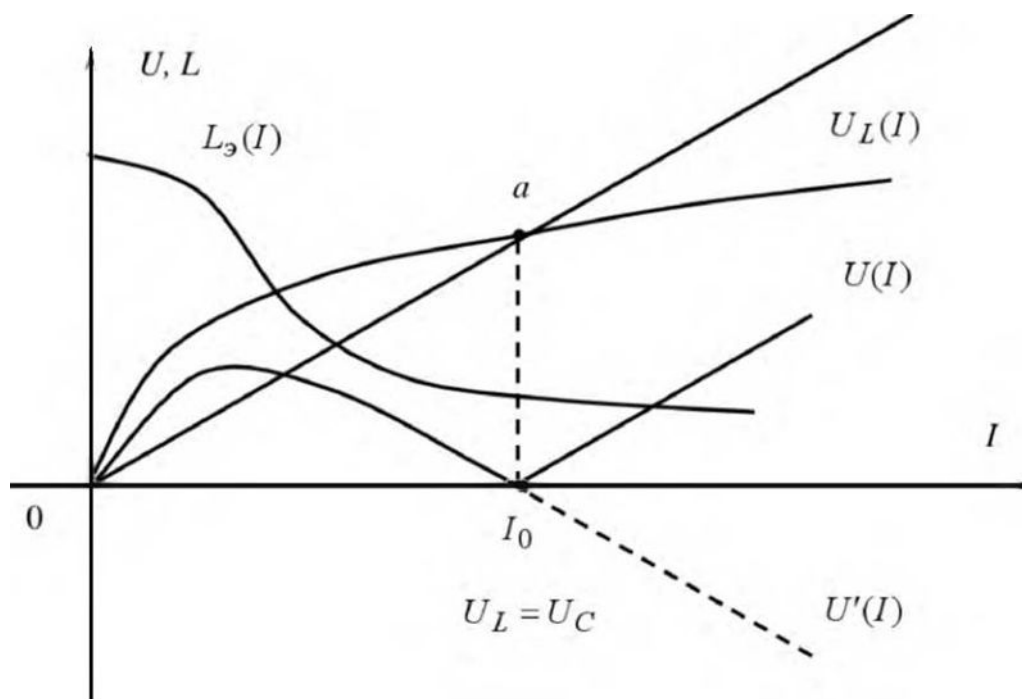


Рисунок 7.4 – ВАХ ідеальної котушки з феромагнітним осердям, ідеального конденсатора і електричного кола при послідовному з'єднанні котушки і конденсатора

Точка «а» перетину $U_L(I)$ і $U_C(I)$ відповідає ферорезонансу напруги, тобто $U_L(I) = U_C(I)$.

Ферорезонанс напруг настапує за рахунок зміни індуктивності, магнітної проникненості феромагнітного матеріалу магнітопроводу котушки. Однак, на відміну від лінійних кіл, зміна індуктивності відбувається наслідок залежності від струму кола. Еквівалентну індуктивність котушки з феромагнітним магнітопроводом можна визначити

$$L_e = \frac{U_L}{\omega \cdot I}. \quad (7.3)$$

Область характеристики $U(I)$ поблизу точки I_0 має теоретичний характер.

Практично через втрати в сталі і в проводі котушки, а особливо через несинусоїдну форми кривої струму, графічна залежність ВАХ $U(I)$ електричного кола має вигляд на рис. 7.5.

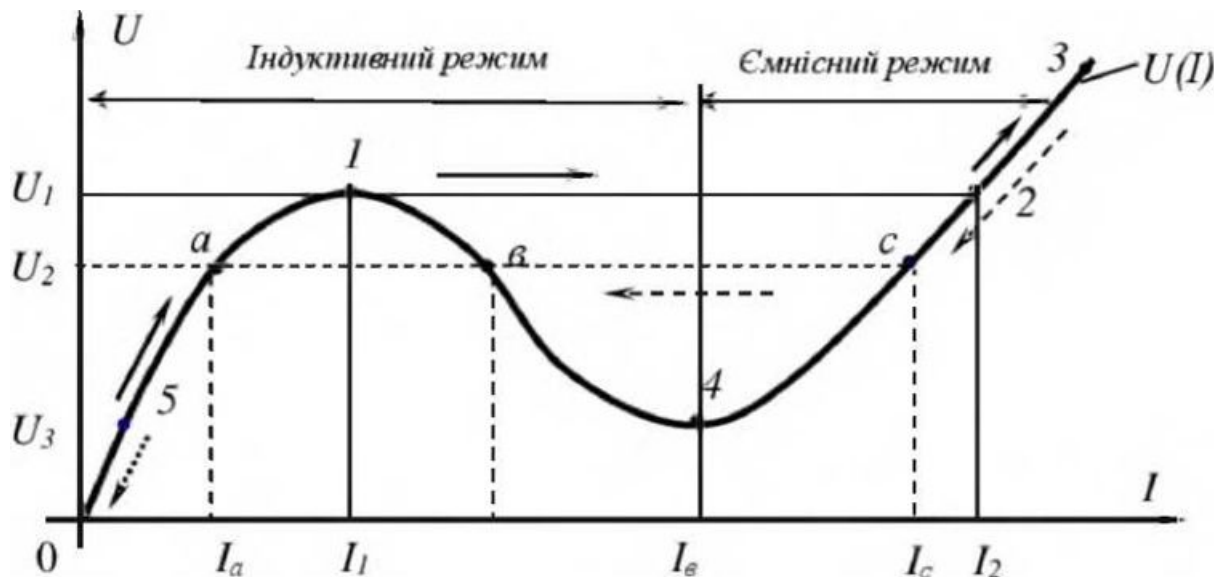


Рисунок 7.5 – ВАХ електричного кола з послідовно з'єднаними реальною котушкою зі сталлю і конденсатором

При зміні напруги U від нуля до U_1 струм по фазі відстає від напруги - індуктивний режим. Зміна режиму відбувається при досягненні точки 1. У точці 1 спостерігається стрибок струму, при якому струм зростає з I_1 до величини I_2 , що відповідає точці 2. За фазою струм I_2 вже випереджає напругу (перекидання фази) – ємнісний режим. Подальше зростання напруги викликає плавне збільшення струму (точка 3).

Зменшення напруги до величини U_3 (точка с) знову викликає зворотній

стрибок струму з I_c до I_a , що відповідає переходу I_3 точки 3 у точку 5. З характеристики (рис. 7.5)) видно, що при одній напрузі U_2 на затискачах електричного кола можливі три значення струму: I_a , I_b , I_c . У двох перших випадках струм відстає від напруги ($U_L > U_C$). А у третьому випадку – випереджає його ($U_L < U_C$). Така невизначеність – декілька значень струму в колі при одній і тій же напрузі – може мати місце лише в колах з нелінійними характеристиками. Режим роботи електричного кола при струмах I_a і I_1 стійкий, оскільки ділянці з підйомом характеристики при збільшенні напруги U струм зростає, а при зменшенні напруги зменшується. Режим при струмі I_2 – нестійкий, оскільки на спадаючій ділянці ВАХ із зменшенням U струм зростає і з підвищенням напруги спадає, таким чином, що найменша зміна напруги викликає перехід від даного режиму роботи електричного кола до першого або третього режиму.

Характерно, що при кожному стрибку фаза струму по відношенню до прикладеної напруга U змінюється на 180° . Явище різкої зміни струму при незначній зміні напруги на вході називається тригерним ефектом у послідовному ферорезонансному колі.

3. План роботи

1. Виконати експериментальне дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям.

1.1. Скласти схему для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям (рис. 7.6).

Знайдіть нелінійну індуктивність *Nonlinear Inductor* (папка *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*), перетягніть його мишкою у вікно моделі та перейменуйте на L . Залиште параметри блоку L без змін.

Знайдіть елемент кола *RMS* (папка *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements*), перетягніть його мишкою у вікно моделі. Залиште параметри блоку згідно з рис. 7.7.

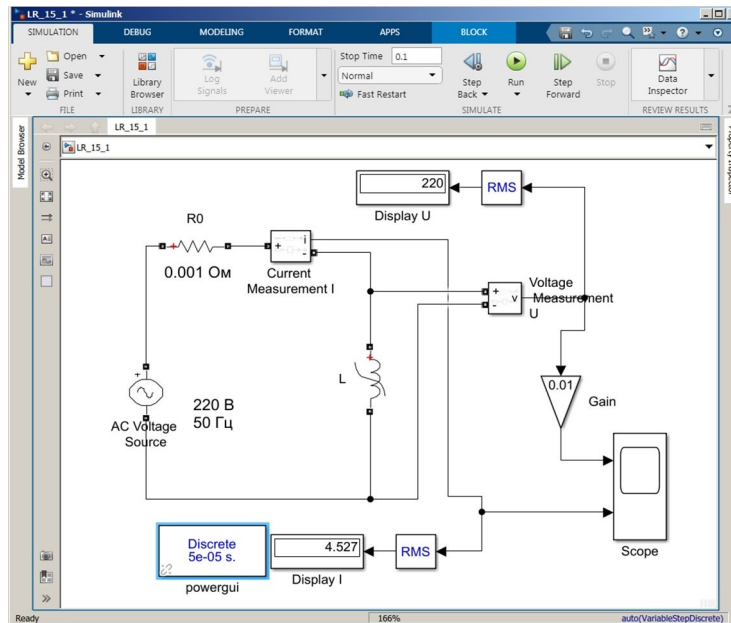


Рисунок 7.6 – Принципова схема для дослідження ВАХ котушки з феромагнітним осердям

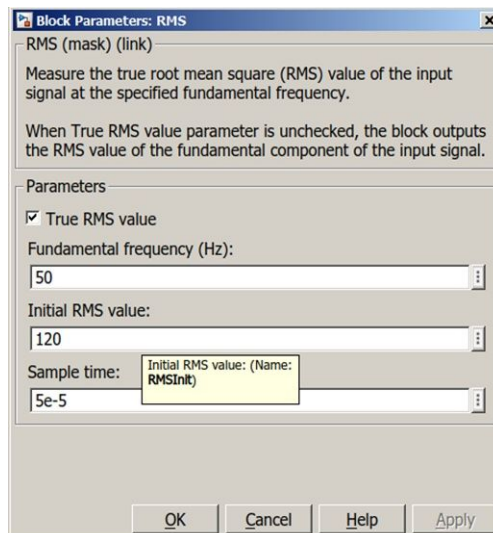


Рисунок 7.7 – Параметри блоку **RMS**

Знайдіть елемент кола **Display** (папка **Simulink / Sinks**), перетягніть його мишкою у вікно моделі і назвіть **Display I**.

1.2. Запустити моделювання.

1.3. Змінюючи напругу джерела живлення від 0 до 220 В, зняти покази приладів у колі котушки з феромагнітним осердям, результати занести в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики котушки з феромагнітним осердям $U_L(I_L)$

Покази приладів									
U_L , В	0								
I_L , А									

2. Виконати експериментальне дослідження ВАХ конденсатора

2.1. Скласти схему для дослідження ВАХ конденсатора (рис. 7.8).

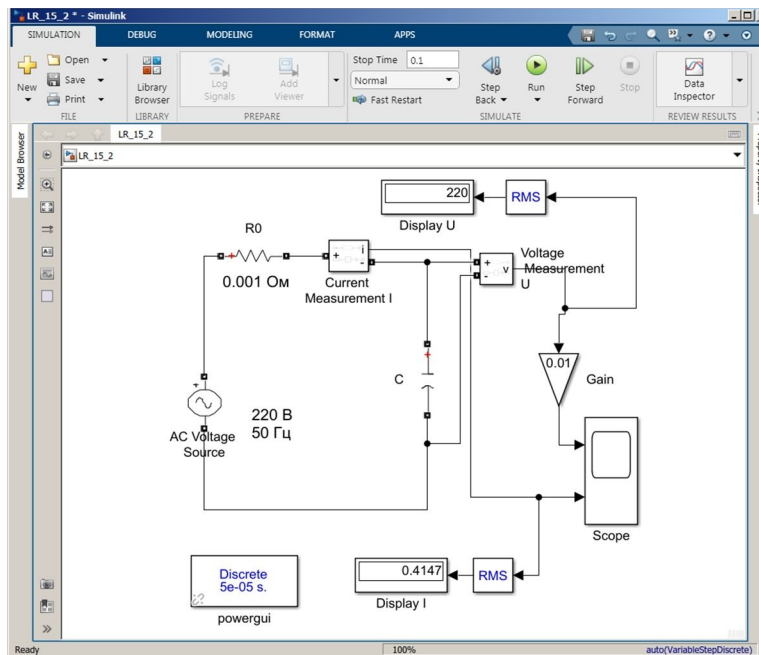


Рисунок 7.8 – Принципова схема для дослідження ВАХ конденсатора

2.1. Встановити ємність конденсатора 50...70 мкФ.

2.2. Запустити моделювання.

2.3. Змінюючи напругу від 0 до 220 В, зняти покази приладів у колі конденсатора, результати занести в табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики конденсатора $U_C(I_C)$

Покази приладів									
U_C , В	0								
I_C , А									

3. Побудувати графіки ВАХ котушки з феромагнітним осердям $U_L(I_L)$ і ВАХ конденсатора $U_C(I_C)$ в одних осях. Визначити: чи можливий режим

ферорезонансу напруги у колі при обраній ємності конденсатора, для цього знайдіть точку перетину графіків ВАХ котушки і конденсатора.

4. Побудувати в тій же площині графік ВАХ електричного кола $U(I)$ при послідовному з'єднанні котушки з феромагнітним осердям і конденсатора, використовуючи рівняння (7.3).

5. Визначити за допомогою графіка ВАХ електричного кола $U(I)$.

- напругу в колі $U_{стр}$, при якій відбувається стрибок струму;
- силу струму на початку стрибка I_1 ;
- силу струму на при кінці стрибка I_2 ;
- визначити напругу на котушці з феромагнітним осердям при ферорезонансі напруги $U_L^{рез}$;
- визначити напругу на конденсаторі при ферорезонансі напруги $U_C^{рез}$;
- визначити силу струму при ферорезонансі напруги $I^{рез}$;
- визначити еквівалентну індуктивність котушки в момент ферорезонансу напруги

$$L_e = \frac{U_L^{рез}}{\omega I^{рез}}; \quad (7.4)$$

- визначити реактивний опір конденсатора в момент ферорезонансу напруги

$$X_C = \frac{U_C^{рез}}{I^{рез}}; \quad (7.5)$$

- визначити ємність конденсатора в момент ферорезонансу напруги

$$C = \frac{1}{\omega X_C}. \quad (7.6)$$

Результати розрахунку електричного кола при ферорезонансі напруги занести в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Таблиця 3 - Результати розрахунку електричного кола

Фізичні величини, що характеризують коло							
$U_{стр}$, В	I_1 , А	I_2 , А	$I^{рез}$, А	$U_L^{рез}$, В	L_e , Гн	$U_C^{рез}$, В	C , Ф

6. Побудувати векторну діаграму напруг і струму для режиму ферорезонансу в масштабі.
7. Виконати експериментальне дослідження ферорезонансу напруги.
- 7.1. Скласти схему для дослідження ферорезонансу напруга (рис. 7.9).

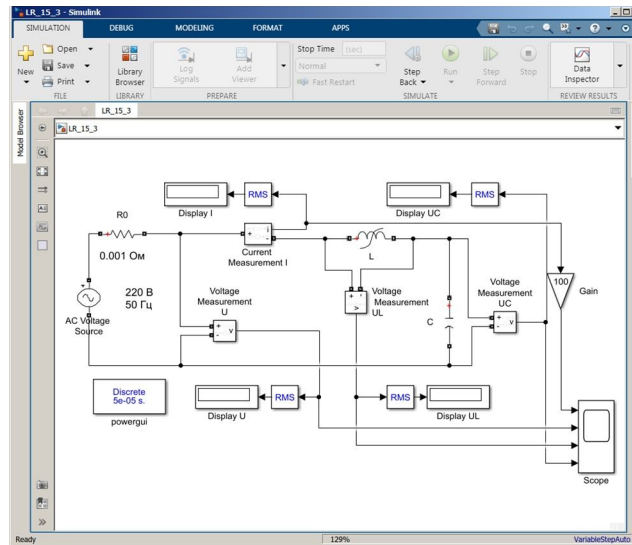


Рисунок 7.9 – Принципова електрична схема експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги

Розрахункова схема електричного кола для дослідження ферорезонансу напруги наведена на рис. 7.10.

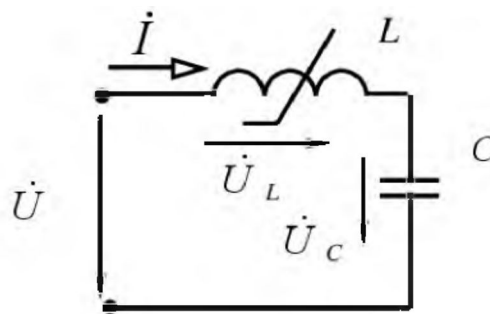


Рисунок 7.10 – Розрахункова схема електричного кола експериментальної установки для дослідження ферорезонансу напруги

На розрахунковій схемі введені наступні умовні позначення:

- \bar{U} – напруга на затискачах котушки з феромагнітним осердям, В;
- I – сила струму в електричному колі, А;
- L – нелінійна індуктивність котушки з феромагнітним осердям, Гн;
- C – ємність конденсатора, Ф.

7.2. Запустити моделювання.

7.3. Змінюючи напругу за допомогою автотрансформатора від 0 до величини, за якої струм буде вдвічі перевищувати найбільший струм попередніх дослідів, зняти експериментальну вольт-амперну характеристику $U_H(I_H)$ електричного кола, покази приладів у електричному колі занести в табл. 7.4.

7.4. Побудувати в тій же площині графік експериментальних досліджень В АХ електричного кола $U_H(I_H)$ при дослідженні ферорезонансу напруга.

Таблиця 7.4 – Результати експериментальних досліджень вольт-амперної характеристики кола $U_H(I_H)$

Умови проведення експерименту	Покази приладів									
Реостат R_H введений	$U_H, В$	0								
	$I_H, А$									

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Що розуміється під резонансом напруг?
2. При яких умовах виникає резонанс напруг?
3. Що розуміється під ферорезонансом напруг?
4. Що загального і у чому різниця між резонансом напруг у лінійних колах і ферорезонансом?
5. Чому у нелінійних кола з послідовно з'єднаними котушкою з феромагнітним осердям і конденсатором при зміні напруга виникає ферорезонанс напруг?
6. Як змінюється індуктивність котушки з феромагнітним магнітопроводом при збільшенні напруги на її затискачах?
7. Чому дорівнює кут зсуву фаз при ферорезонансі напруг?
8. Що розуміється під явищем «перекидання фази»?

9. Що розуміється під «тригерним ефектом» у ферорезонансному колі?
10. Які фізичні процеси спостерігаються у електричному колі при ферорезонансі напруги?
11. Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг при ферорезонансі напруг?
12. Як визначити еквівалентний індуктивний опір котушки з феромагнітним магнітопроводом при ферорезонансі напруг в електричному колі?
13. Як визначити еквівалентну індуктивність котушки при резонансі напруг в електричному колі?
14. Як визначити реактивний ємнісний опір конденсатора при ферорезонансі напруг в електричному колі?
15. Як визначити ємність конденсатора при резонансі напруг в електричному колі?
16. Як визначити напругу на індуктивності котушки в електричному колі?
17. Як визначити напругу на ємності конденсатора в електричному колі?
18. Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг при ферорезонансі напруг?
19. Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг до ферорезонансу напруг?
20. Який вигляд має векторна діаграма струму і напруг після ферорезонансу напруг?
21. Як визначити енергію, що накопичується у магнітному полі котушки з феромагнітним магнітопроводом в момент ферорезонансу?
22. Як визначити енергію, що накопичується у електричному полі конденсатора в момент ферорезонансу?

8 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB.

1 .Мета роботи

Вивчення та практичне застосування методів розрахунку електричних кіл синусоїдального струму середовищі *Matlab*.

2. Теоретична частина

Вивчіть рекомендації щодо розробки та дослідження математичних моделей електричних кіл у середовищі *Matlab/Simulink* (див. Додаток А).

3. Зміст роботи

Електричне коло (табл. 8.1, рис. 8.1) містить 4 паралельно з'єднаних гілки.

Розрахувати струми та потужності гілок і всього кола комплексним методом у середовищі *MATLAB*.

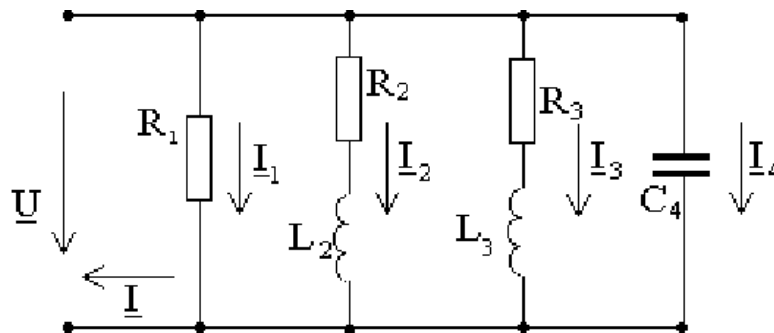


Рисунок 8.1 – Електрична схема кола

Таблиця 8.1 – Вихідні дані

Варіант	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$L_1,$ мГн	$L_2,$ мГн	$L_3,$ мГн	$L_4,$ мГн	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ	$C_3,$ мкФ	$C_4,$ мкФ
Приклад	7	5	6	0,01	0	0,01	0,03	0	inf	inf	inf	700e-6
N	2·N	1+N	2+N	N	N-10	N-15	N-20	N-25	10-N	15-N	20-N	25-N

Якщо розрахована величина L (або C) вийшла від'ємною, то відповідна величина L (або C) не входить у вітку.

1. Відкрийте *MatLab*, і введіть у вікно *Script (Live Script)* (скрипт) чи *Command Windows* (вікно команд) вихідні дані прикладу (якщо індуктивність відсутня, введіть $L=0$, якщо відсутня ємність, введіть $C=inf$, якщо активний опір відсутній, введіть активний опір наприклад, 0.01)

$$\gg U = 220; f=50;$$

$$R1=7; L1 = 0; C1 = inf; R2=5; L2 = 0.01; C2 = inf;$$

$$R3=6; L3 = 0.03; C3 = inf; R4 = 0.01; L4 = 0; C4 = 700e-6;$$

2. Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму розрахунку комплексів повного опору гілок

$$\gg Z1=R1+j*(2*pi*f*L1-1/(2*pi*f*C1));$$

$$Z2=R2+j*(2*pi*f*L2-1/(2*pi*f*C2));$$

$$Z3=R3+j*(2*pi*f*L3-1/(2*pi*f*C3));$$

$$Z4=R4+j*(2*pi*f*L4-1/(2*pi*f*C4));$$

3. Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму розрахунку комплексів струмів гілок та комплексу струму всього кола

$$\gg I1=U/Z1; I2=U/Z2; I3=U/Z3; I4=U/Z4; I=I1+I2+I3+I4;$$

4. Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму розрахунку комплексів повної потужності гілок та комплексу повної потужності всього кола

$$\gg S1=U*conj(I1); S2=U*conj(I2); S3=U*conj(I3); S4=U*conj(I4);$$

$$S = U * conj (I);$$

5. Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму виведення результатів розрахунку дійсної, уявної частин, модуля та аргументу комплексів струмів гілок та комплексу струму всього кола, комплексів активної та реактивної потужності гілок та всього кола

format bank;

$$ans=[real(I1) imag(I1) abs(I1) angle(I1)*180/pi real(S1) imag(S1);$$

$$real(I2) imag(I2) abs(I2) angle(I2)*180/pi real(S2) imag(S2);$$

$$real(I3) imag(I3) abs(I3) angle(I3)*180/pi real(S3) imag(S3);$$

$$real(I4) imag(I4) abs(I4) angle(I4)*180/pi real(S4) imag(S4);$$

$$real(I) imag(I) abs(I) angle(I)*180/pi real(S) imag(S)]$$

та натисніть **Enter**.

ans =

31.43 0 31.43 0 6914.29 0

31.55 -19.82 37.26 -32.14 6940.14 4360.62

10.57 -16.61 19.69 -57.52 2326.43 3654.35

0.11 48.38 48.38 89.87 23.41 -10643.66

73.66 11.95 74.62 9.21 16204.26 -2628.70

6. Порівняйте результати розрахунку з результатами розрахунку прикладу та переконайтесь у правильності введеної Вами програми розрахунку.

7. Скопіюйте введено та перевірену Вами програму розрахунку та вставте її у те ж вікно команд *MatLab*, змініть вихідні дані завдання відповідно до варіанта (табл. 8.1) та повторіть розрахунок.

8. Перепишіть вихідні дані варіанта 31–*N* та результати розрахунку на бланк, побудуйте векторну діаграму напруги та струмів (рис. 8.2).

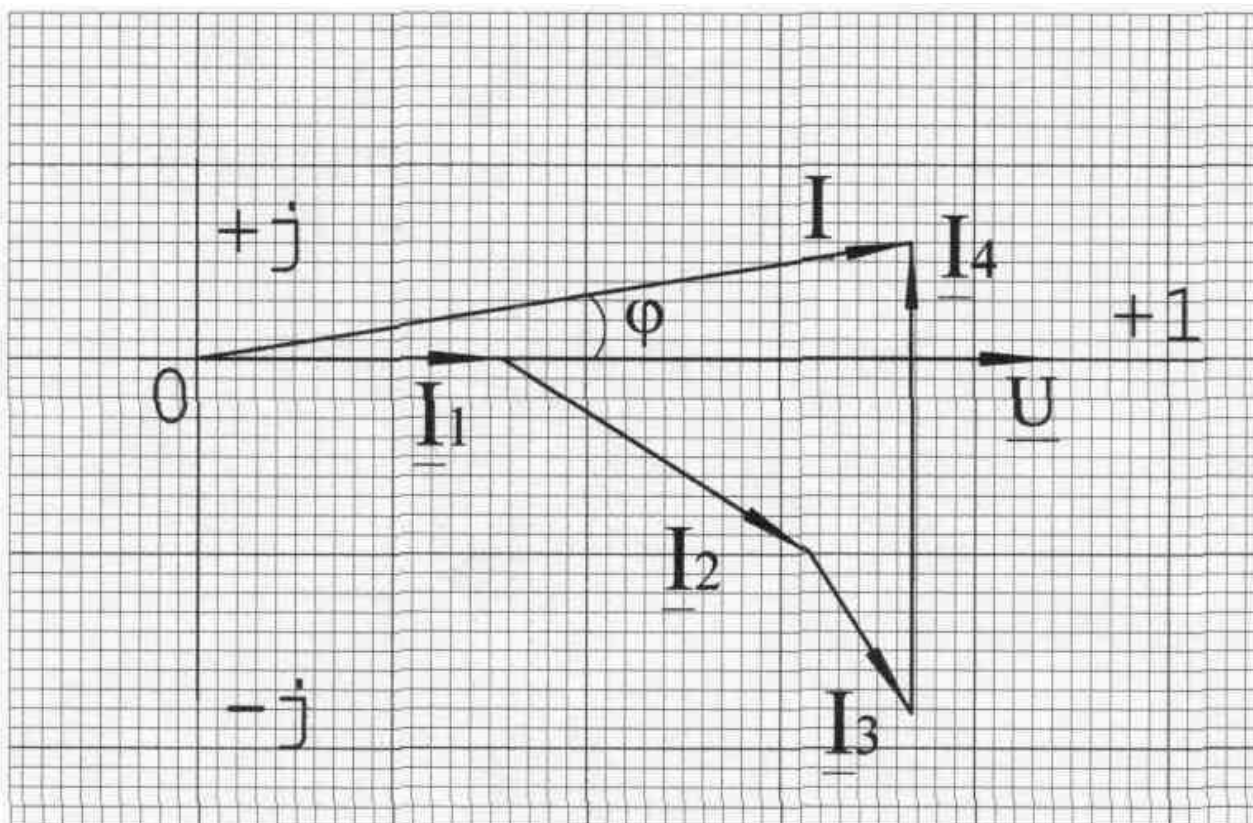


Рисунок 8.2 – Векторна діаграма напруги та струмів прикладу

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.

4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Як у середовищі *MATLAB* розраховуються електричні кола синусоїдного струму комплексним методом?
2. Як визначається комплексний повний опір?
3. Як визначається комплексний струм віток?
4. Як визначається комплексна повна потужність?
5. Як будується векторна діаграма кола.
6. Як в середовищі *MATLAB* моделюється електричне коло синусоїдного струму?

9 ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Вивчення та практичне застосування математичного моделювання електричних кіл синусоїдального струму середовищі *Matlab/Simulink*.

2. Теоретична частина

Вивчіть рекомендації щодо розробки та дослідження математичних моделей електричних кіл у середовищі *Matlab/Simulink* (див. Додаток А).

3. Зміст роботи

1. В *Simulink* зберіть моделі рис. 9.1.

Відкрийте вікно *MatLab*, відкрийте бібліотеку *Simulink* і відкрийте вікно нової моделі (*Contr+N*).

Відкрийте *Simulink/Math Operations*, знайдіть блоки *Product* і *Gain* та перетягніть їх мишкою на вікно моделі. Встановіть блоку *Gain* коефіцієнт передачі 0.01.

Відкрийте *Simulink/Signal Routing*, знайдіть блок *Mux* і перетягніть його на вікно моделі та задайте число входів 3.

Відкрийте *Simulink/Sinks*, знайдіть блок *Scope* та перетягніть його на вікно моделі.

Відкрийте *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems*, знайдіть блок *Powergui* (графічний інтерфейс користувача) та перетягніть його на вікно моделі.

Відкрийте *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements*, знайдіть блоки *Current Measurements*, *Voltage Measurements*, *Multimeter* та перетягніть їх на вікно моделі.

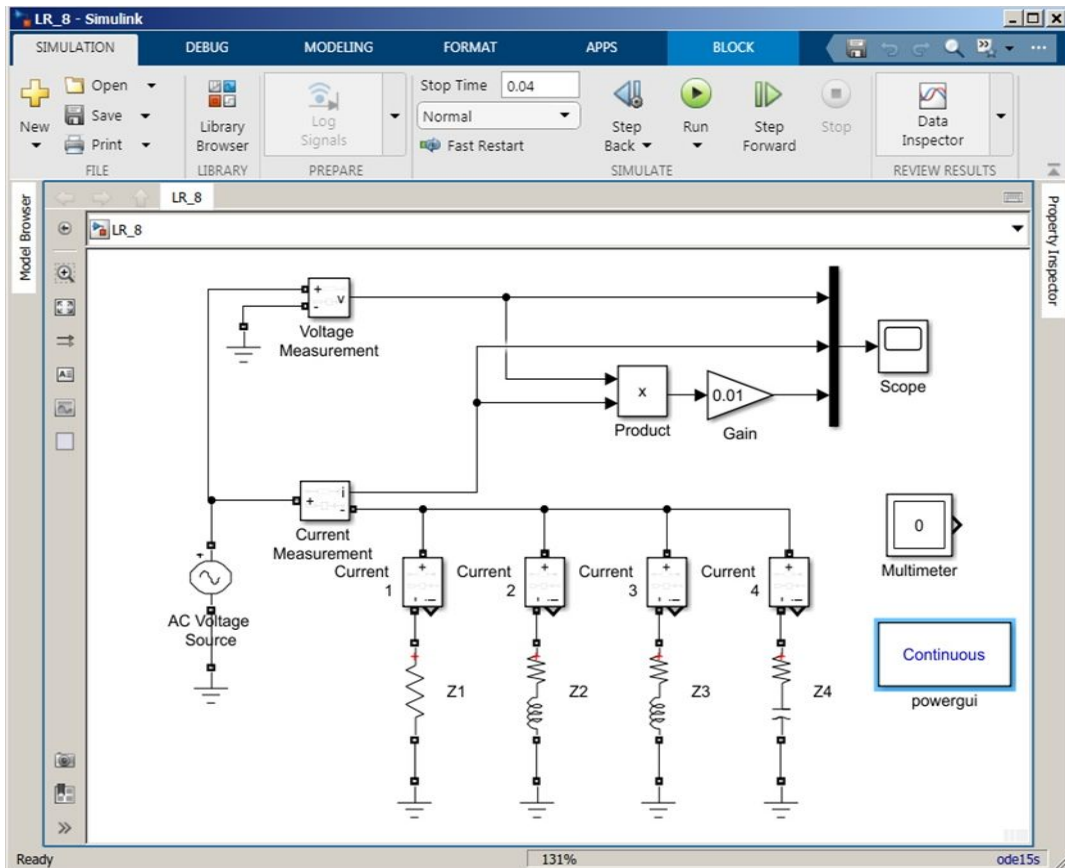


Рисунок 9.1 – Схема моделі кола

Відкрийте *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources*, знайдіть блок *AC Voltage Source*, перетягніть його на вікно моделі.

Відкрийте *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities*, знайдіть блок *Ground* та перетягніть його у вікно моделі.

Відкрийте *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*, знайдіть блок *Series RLC Branch*, перетягніть його на вікно моделі, перейменуйте **Z1**.

Розташуйте блоки у вікні моделі відповідно до схеми рис. 9.1. і зробіть необхідні з'єднання. Для повороту виділеного блоку використовуйте команди *Format / Rotate*.

Виділіть з'єднанні між собою блоки **Z1** і *Ground*, скопіюйте їх, вставте у те саме вікно моделі, перейменуйте в **Z2** і з'єднайте з блоком **Z1**.

Вставте у вікно моделі копію блоків **Z1** і *Ground*, перейменуйте **Z3** і з'єднайте з блоком **Z2**.

Вставте у вікно моделі копію блоків **Z1** і *Ground*, перейменуйте **Z4** і з'єднайте з блоком **Z3**.

Збережіть модель кола.

2. Запустіть моделювання на виконання.

3. Відкрийте таблицю параметрів блоку *AC Voltage Source* і встановіть амплітуду напруги $\sqrt{2} \cdot 20 \cdot N$ (N – номер варіанту), частоту **50** і початкову фазу **0**, *Measurement – Voltage*.

4. Відкрийте таблицю параметрів блоку послідовно включених резистора, індуктивності та ємності **Z1**, задайте активний опір **R1**, індуктивність **L1** та ємність **C1** (згідно з варіантом), у рядку *Measurements* задайте *Branch Current*.

Внесіть аналогічні виправлення до параметрів блоків **Z2**, **Z3**, **Z4**.

5. Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть *Simulation time – Stop time* (час моделювання) **0.04**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode 15s* та запустіть моделювання.

6. Відкрийте вікно параметрів *Powergui*, виберіть *Tools* режим вимірювань *Measurements and States Analyzer*, встановіть вимірювання напруги та струмів *RMS Values*, *Frequency – 50* (рис. 9.2), запишіть результати вимірювань комплексів напруги джерела (*Voltage Measurement*), струму джерела (*Current Measurement*) та гілок (*Current 1*, *Current 2*, *Current 3*, *Current 4*) та порівняйте покази *Powergui* з результатами раніше виконаних розрахунків.

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U	Voltage Measurement	220 Vrms	0.00 °
2	I	Current 1	31.43 Arms	0.00 °
3	I	Current 2	37.26 Arms	-32.14 °
4	I	Current 3	19.69 Arms	-57.52 °
5	I	Current 4	48.38 Arms	89.87 °
6	I	Current Measurement	74.62 Arms	9.21 °
7	Usrc	AC Voltage Source	220 Vrms	0.00 °

Рисунок 9.2 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

7. Відкрийте осцилоскоп **Scope** і знайдіть осцилограми напруги джерела u , струму джерела i та миттєвої потужності джерела p :

- напруга джерела u синусоїдальна, має початкову фазу $\psi_U = 0^\circ$, амплітуду $U_m = 311$ В та період $0,02$ с;

- струм джерела i також синусоїдальний, має початкову фазу $\psi_I = 9^\circ$ (випереджає напругу по фазі), амплітуду $I_m = 104,8$ А та період $0,02$ с;

- миттєва потужність джерела p має $P_{\max} = 3255$ Вт, $P_{\min} = -2,1$ Вт, середнє значення (постійну складову) $P_{\text{сеп}} = (P_{\max} + P_{\min}) / 2 = 1625$ Вт і синусоїдальну складову з амплітудою $S = P_{\max} - P_{\text{сеп}} = 3257,1$ ВА та періодом $0,01$ с (рис. 9.3).

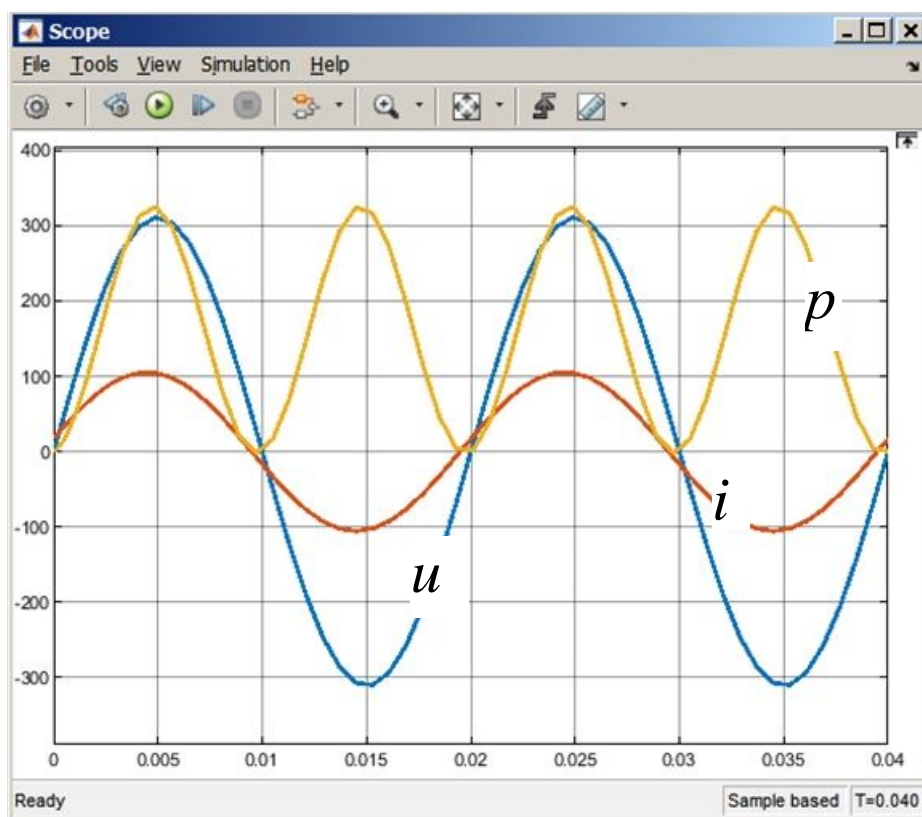


Рисунок 9.3 – Результати вимірювання миттєвих значень напруги, струму та миттєвої потужності джерела у моделі (приклад)

8. Змініть параметри блоків **Z1**, **Z2**, **Z3**, **Z4** відповідно до варіанта (табл. 9.1), повторіть моделювання, занесіть результати моделювання з **Powergui** та **Scope** в звіт.

Таблиця 9.1 – Вихідні дані

Варіант	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	L_4 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	C_4 , мкФ
Приклад	7	5	6	0,01	0	0,01	0,03	0	inf	inf	inf	700e-6
N	2·N	1+N	2+N	N	N-10	N-15	N-20	N-25	10-N	15-N	20-N	25-N

Якщо розрахована величина L (або C) вийшла від'ємною, то відповідна величина L (або C) не входить у вітку.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця. Графік.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Дослідження джерел напруги та струму; дослідження основних величин, що характеризують синусоїдний струм.
2. Дослідження резистивного елемента в колі синусоїдного струму.
3. Дослідження індуктивного елемента в колі синусоїдного струму.
4. Дослідження в колі синусоїдного струму.

10 ПОСЛІДОВНЕ RC-З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Відпрацювання практичних навичок та перевірка на досліді теоретичних положень про розподіл напруг і фазових зсувів у RC-колі.

2. Теоретична частина

У будь-якій електричній установці між проводами і землею (в лініях електропередачі) та іншими елементами струмопровідних конструкцій утворюються ємності. У силових установках конденсатори використовують для підвищення коефіцієнта потужності; у радіотехніці конденсатори застосовують у коливних контурах, фільтрах тощо.

Розглянемо коло змінного струму, в якому послідовно з'єднані резистивний елемент R і конденсатор C (рис. 10.1).

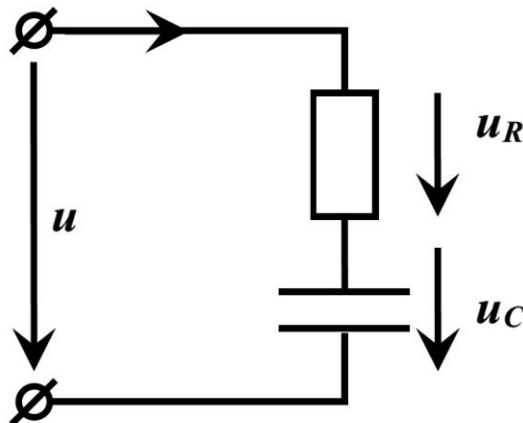


Рисунок 10.1 – RC коло змінного струму

До кола (рис. 10.1) прикладемо ну напругу

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U),$$

відповідно струм у колі теж буде ним:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_I).$$

Оберемо початкову фазу напруги ψ_U так, щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю ($\psi_I = 0$).

Тоді, за другим законом Кірхгофа, повна напруга в колі буде

$$u = u_R + u_C = U_{mR} \sin \omega t + U_{mC} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (10.1)$$

Максимальне значення напруги, прикладеної до кола

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + U_{mC}^2}, \quad (10.2)$$

де $U_m = \sqrt{2} U$ – діюче значення напруги.

Виразивши в рівнянні (10.2) напруги елементів через струм і їх опори, отримаємо

$$U = I \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = I \cdot Z. \quad (10.3)$$

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2}. \quad (10.4)$$

називається **повним опором** ділянки кола.

Звідси отримаємо закон Ома для кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}. \quad (10.5)$$

Залежність кута зсуву фаз від параметрів знаходиться за співвідношенням

$$R = Z \cos \varphi. \quad (10.6)$$

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 10.2), де $R = 10 + N$ Ом, $C = (3 + N)$ мкФ, N – номер варіанта.

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку **Run**.

Дослід 1. Увімкнути джерело і провести вимірювання відповідно до табл. 10.1. Занести отримані дані в табл. 10.1.

Дослід 2. Змінити значення параметрів схеми (відповідно до табл. 10.1) і повторити вимірювання. Занести отримані дані в табл. 10.1.

3. Розрахувати величини

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C},$$

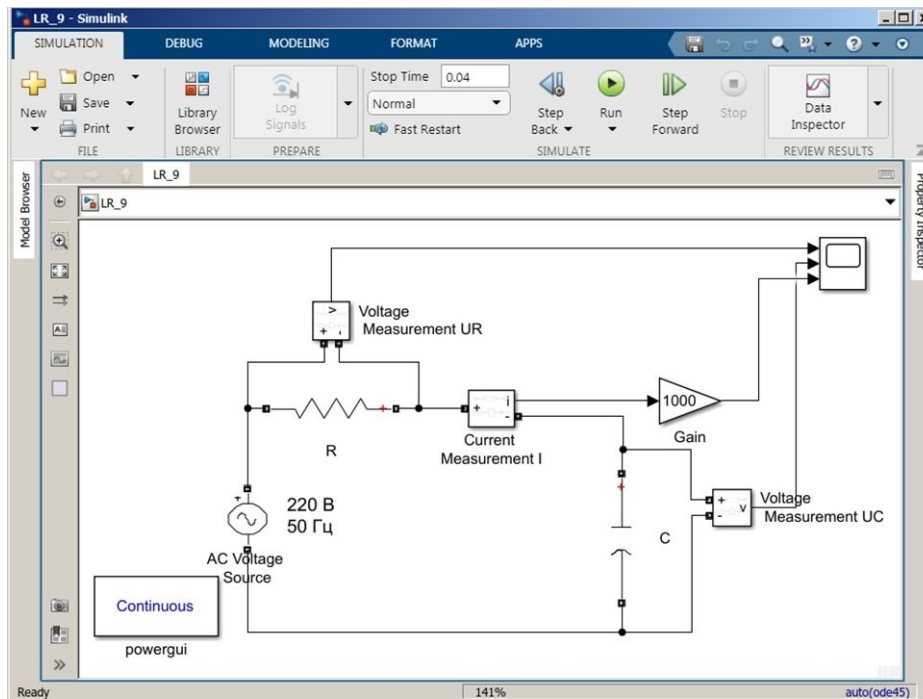


Рисунок 10.2 – Досліджувана схема

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

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

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

4. Отримані дані занести в табл. 10.1.

5. Відкрийте вікно параметрів *Powergui*, виберіть *Tools* режим вимірювань *Measurements and States Analyzer*, встановіть вимірювання напруги та струмів *RMS Values*, *Frequency* – **50** (рис. 10.3), запишіть результати вимірювань комплексів напруги на конденсаторі (*Voltage Measurement UC*), напруги на опорі (*Voltage Measurement UR*), струму (*Current Measurement I*).

6. Відкрийте осцилоскоп *Scope* і знайдіть осцилограми напруги на опорі *UR* та конденсаторі *UC*, а також струму *I*. (рис. 10.4).

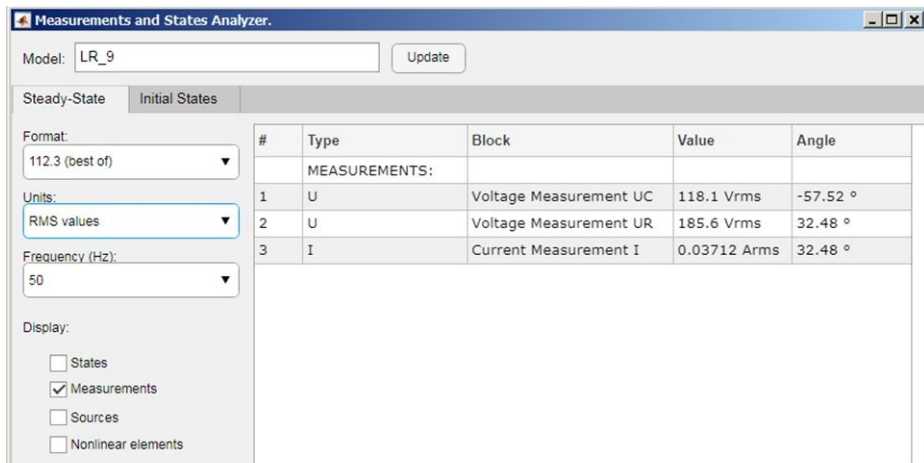


Рисунок 10.3 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

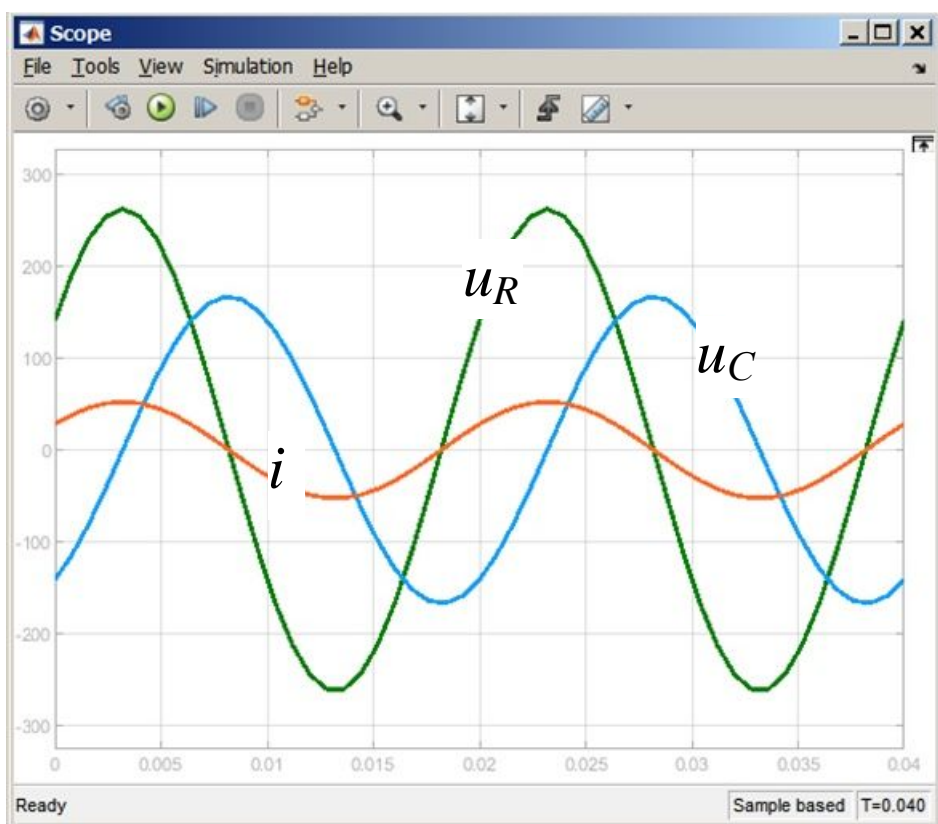


Рисунок 10.4 – Результати вимірювання миттєвих значень напруги, струму (приклад)

Таблиця 10.1 – Таблиця 4.8.1 Результати вимірювань і розрахунків

Дослід	Виміряні величини					Розраховані величини				
	$C, \text{ мкФ}$	$R, \text{ кОм}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$U_R, \text{ В}$	$U_C, \text{ В}$	$X_C, \text{ кОм}$	$Z, \text{ кОм}$	$I, \text{ мА}$	$\cos \varphi$
$R=0, C$	$3 + N$	0								
R, C	$3 + N$	N								

5. Дані вимірювань та розрахунків внести в табл. 10.1.
6. За дослідними даними переконатись, що $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$.
7. Побудувати векторні діаграми напруг у вибраному масштабі.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схема дослідження. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків за результатами досліджень.
3. Векторні діаграми.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Дайте означення ємності конденсатора.
2. Як зміниться кут зсуву фаз при зменшенні ємності конденсатора C ?
3. На який кут струм конденсатора випереджає за фазою напругу?
4. Які одиниці виміру ємності конденсатора?
5. Запишіть закон Ома для кола змінного струму?

11 ПОСЛІДОВНЕ RL -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Відпрацювання практичних навичок та перевірка на досліді теоретичних положень про розподіл напруг і фазових зсувів у RL -колі синусоїдного струму.

2. Теоретична частина

Розглянемо коло синусоїдного струму, в якому послідовно з'єднані резистивний елемент R і котушка з індуктивністю L (рис. 11.1).

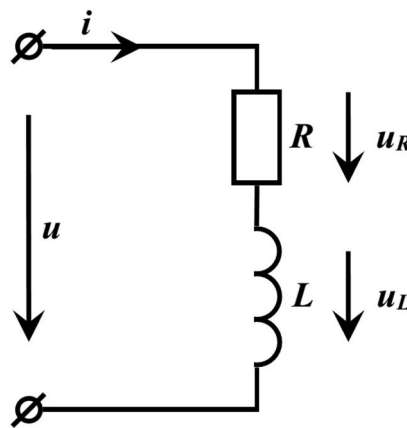


Рисунок 11.1 – RL коло змінного струму

До кола прикладемо синусоїдну напругу

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U),$$

відповідно струм у колі теж буде синусоїдним:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_I).$$

Оберемо початкову фазу напруги ψ_U так, щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю ($\psi_I = 0$).

Тоді, за другим законом Кірхгофа, повна напруга в колі буде

$$u = u_R + u_L = U_{mR} \sin \omega t + U_{mL} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (11.1)$$

Максимальне значення напруги, прикладеної до кола запишемо

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + U_{mL}^2}, \quad (11.2)$$

де $U_m = \sqrt{2} U$ – діюче значення напруги.

Виразивши в рівнянні (11.2) напруги елементів через струм і їх опори, отримаємо

$$U = I \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = I \cdot Z. \quad (11.3)$$

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (11.4)$$

називається **повним опором** ділянки кола.

Звідси отримаємо закон Ома для кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (11.5)$$

Залежність кута зсуву фаз від параметрів знаходиться за співвідношенням

$$R = Z \cos \varphi. \quad (11.6)$$

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 11.2), де $R = 10 + N$ Ом, $L = (8 + N)$ мГн, N – номер варіанта.

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку

Run.

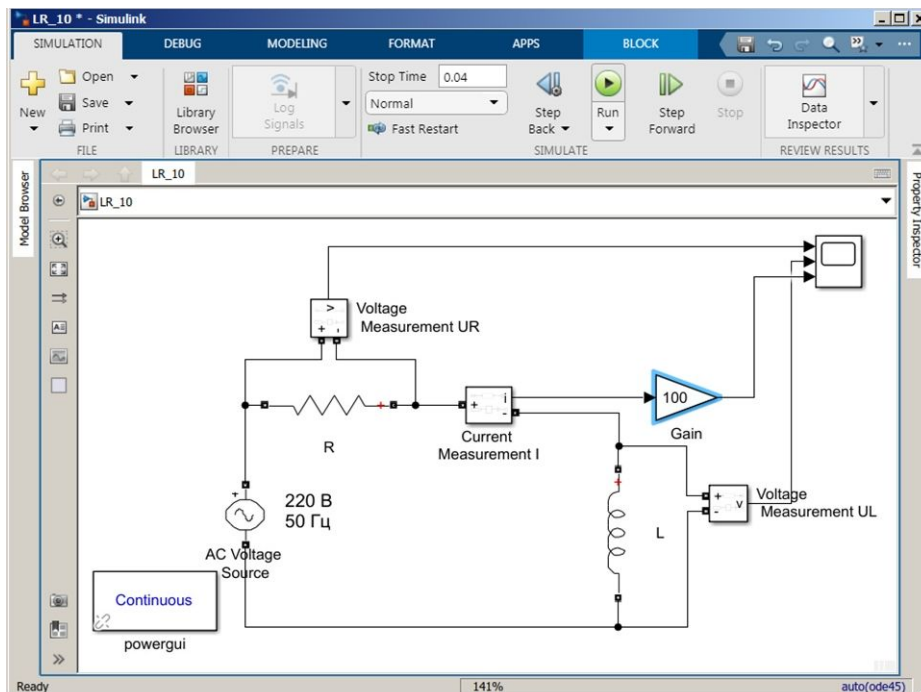


Рисунок 11.2 – Досліджувана схема

Дослід 1. Встановіть значення індуктивності L_{max} , увімкніть джерело і проведіть вимірювання відповідно до табл. 11.1.

Дослід 2. Провести дослід, керуючись пунктом 2 табл. 11.1.

Дослід 3. Спостерігайте за зміною величин при індуктивності $L=0,5L_{max}$.

Проведіть вимірювання відповідно до третього пункту табл. 11.1.

3. Відкрийте вікно параметрів *Powergui*, виберіть *Tools* режим вимірювань *Measurements and States Analyzer*, встановіть вимірювання напруги та струмів *RMS Values*, *Frequency – 50* (рис. 10.3), запишіть результати вимірювань комплексів напруги на індуктивності (*Voltage Measurement UL*), напруги на опорі (*Voltage Measurement UR*), струму (*Current Measurement I*).

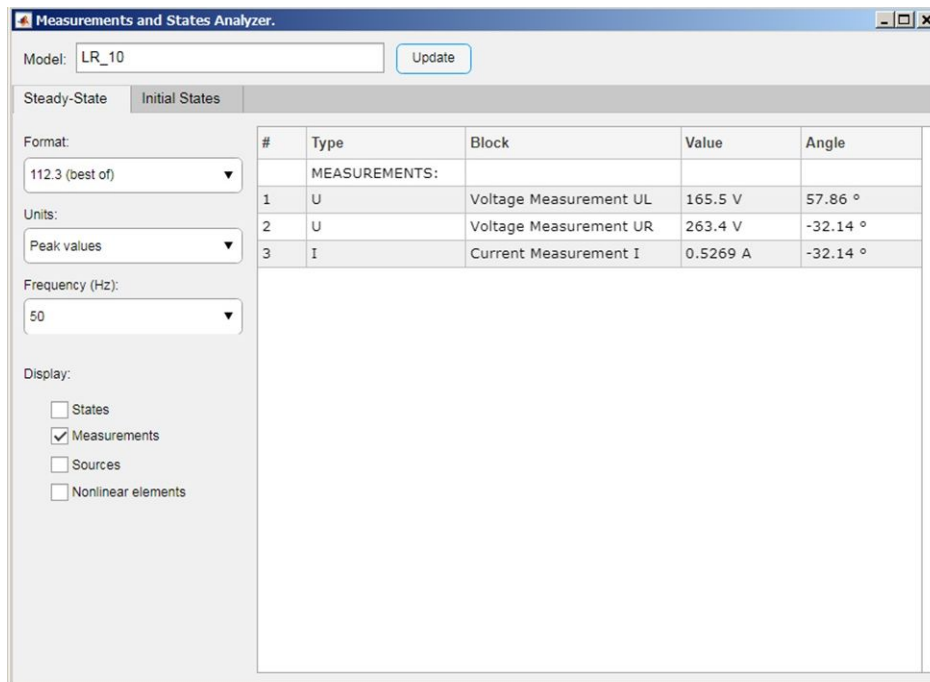


Рисунок 11.3 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

4. Відкрийте осцилоскоп *Scope* і знайдіть осцилограми напруги на опорі *UR* та *UC*, а також струму *I*. (рис. 10.4).

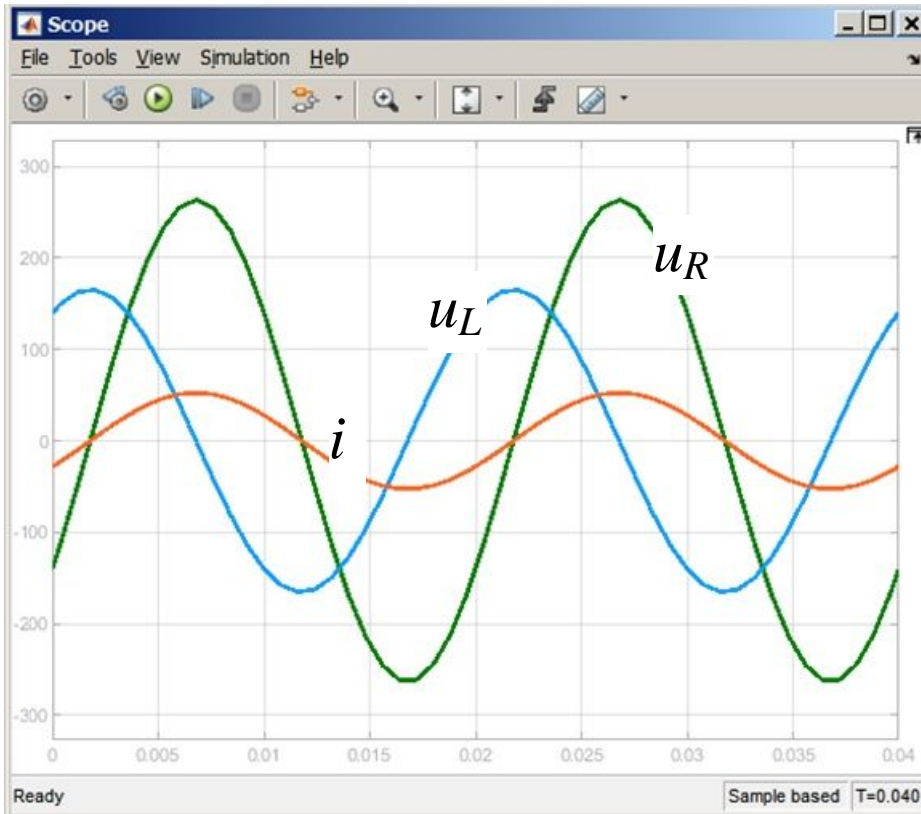


Рисунок 11.4 – Результати вимірювання миттєвих значень напруги, струму (приклад)

Таблиця 11.1 – Результати вимірювань і розрахунків

№	Дослід	Виміряні величини						Розраховані величини				
		U , В	I , А	U_R , В	U_L , В	R , Ом	L , Гн	X_L , Ом	R , Ом	Z , Ом	I , А	$\cos \varphi$
1	$R=0$, L_{max}											
2	R, L_{max}											
3	R , $L=0,5L_{max}$											

3. Дані вимірювань та розрахунків внести в табл. 11.1.

4. Провести розрахунок наступних величин R , X_L , Z , $\cos\varphi$. Результати розрахунків записати у табл. 11.1.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL,$$

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

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

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

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

5. За дослідними даними перевірити, що

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}.$$

6. Побудувати векторні діаграми напруг.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схеми дослідів. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
3. Розрахункові формули, розрахунки за результатами досліджень.
4. Векторні діаграми. Пояснення до результатів дослідів.
5. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Запишіть закон Ома для кола змінного струму.
2. Як зміниться кут зсуву фаз при зменшенні індуктивності котушки L ?
3. На який кут напруга на котушці за фазою випереджає струм?
4. Яка величина називається індуктивним опором?
5. В яких одиницях вимірюється індуктивність?

12 ПОСЛІДОВНЕ LC-З'ЄДНАННЯ. РЕЗОНАНС НАПРУГ

1. Мета роботи:

Дослідження процесів у послідовному LC-колі при різних співвідношеннях їх опорів.

2. Теоретична частина

До кола (рис. 12.1) прикладемо синусоїдну напругу

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U),$$

відповідно струм у колі теж буде синусоїдним:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_I).$$

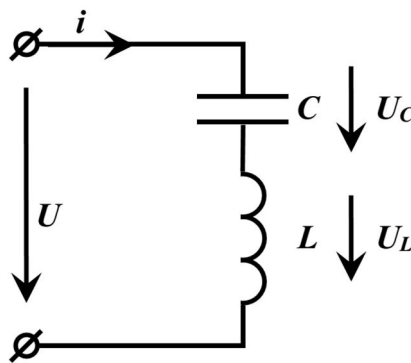


Рисунок 12.1 – LC-коло змінного струму

Для спрощення викладу підберемо таку початкову фазу напруги ψ_U , щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю $\psi_I = 0$. Тоді початкова фаза напруги дорівнюватиме $\psi_U = \varphi$. З урахуванням цього, вирази для струму i та напруги матимуть вигляд:

$$i = I_m \sin \omega t; \quad u = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (12.1)$$

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень напруг

$$u = u_L + u_C. \quad (12.2)$$

Закон Ома для кола змінного струму

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{X_L - X_C} = \frac{U}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}. \quad (12.3)$$

Явище, в якому струм у колі, за наявності у ньому реактивних елементів (індуктивності та ємності), збігається за фазою з напругою, прикладеною до цього кола, називають **резонансом**.

Необхідною умовою резонансу напруг є послідовне з'єднання індуктивного та ємнісного елементів.

Резонанс настане, якщо виконується умова:

$$X = X_L - X_C = 0, \text{ або } \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

звідси

$$\omega^2 LC = 1. \quad (12.4)$$

Явище, яке виникає при послідовному з'єднанні індуктивних та ємнісних елементів, за умови $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, називається **резонансом напруг**.

Як впливає з рівняння (12.4), резонансу в колі можна досягнути, змінюючи частоту, індуктивність та ємність.

Частоти $\omega_0, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ – називають **резонансними**. Вони є власними частотами контуру.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему рис. 12.2. Параметри елементів: діюче значення напруги живлення – 220 В, $R = 10 + N$ Ом, $L = (8 + N)$ мГн, $C = (3 + N)$ мкФ, N – номер варіанта.

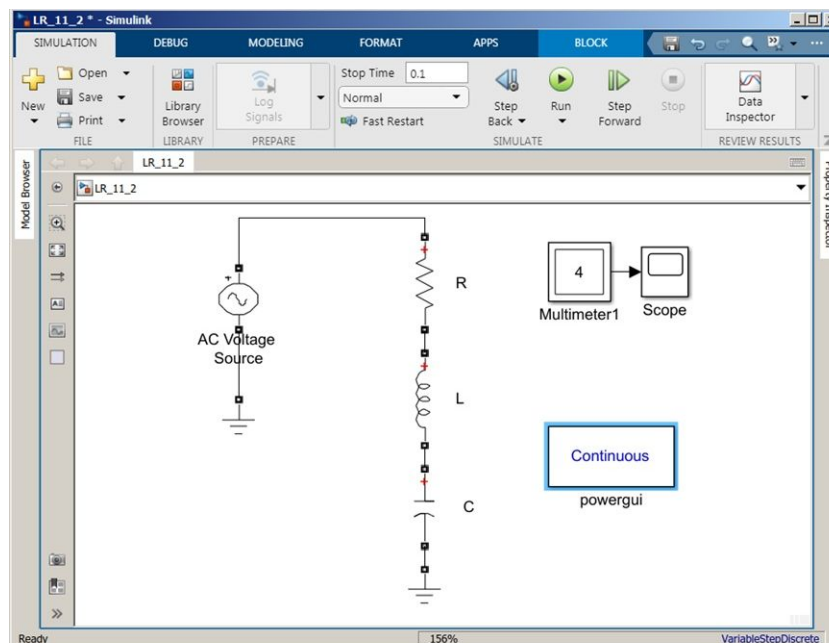


Рисунок 12.2 – Досліджувана схема

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку

Run.

3. Відкрийте вікно параметрів *Powergui*, виберіть *Tools* режим вимірювань *Measurements and States Analyzer*, встановіть вимірювання напруги та струмів *RMS Values*, *Frequency* – 50 (рис. 12.3), запишіть результати вимірювань комплексів напруги на ємності (*Ub: C*), напруги на індуктивності (*Ub: L*), напруги на опорі (*Ub: R*), струму (*I: Current Measurement*).

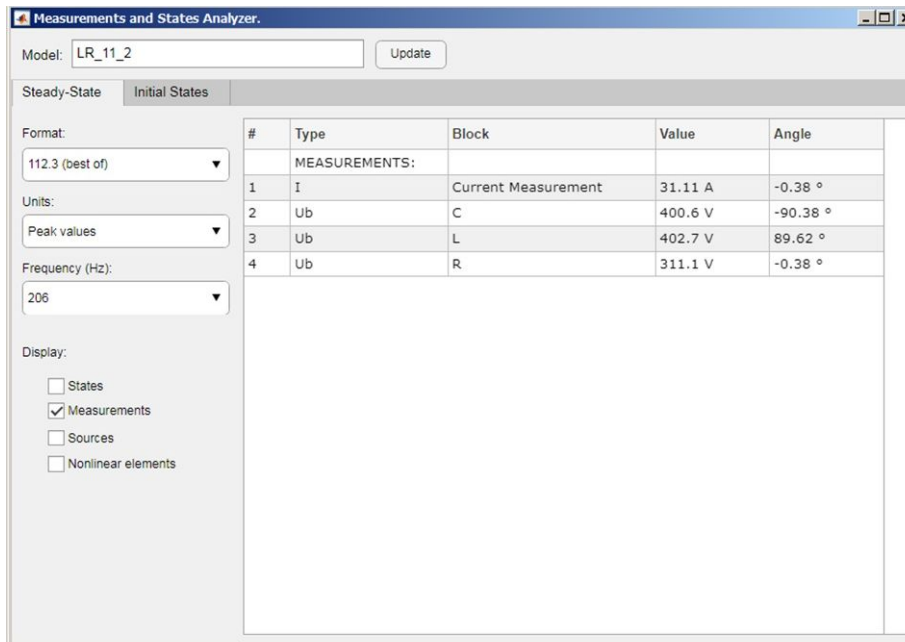


Рисунок 12.3 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

Дослід 1. Провести дослід відповідно табл. 12.1:

- змінюючи L , досягніть резонансу напруг за максимальним значенням струму в колі I (за умови $X_L = X_C$),
- зменшуючи L , встановіть значення струму I у два рази менше від резонансного значення ($X_L < X_C$),
- налаштуйте коло в резонанс і, продовжуючи збільшувати L , отримайте зменшення струму, порівняно з резонансним у два рази ($X_L > X_C$).

3. Дані вимірювань та розрахунків внести до табл. 12.1.

4. Розрахуйте величин X_L , X_C , Z , $\cos\varphi$, L , Z , $U_{\text{кот}}$, U_L , (за вихідними даними). Результати розрахунків внести до табл. 12.1. Під час розрахунку X_L врахувати активний опір котушки $R_{\text{кот}}$, який вимірюють у резонансному режимі, коли

$$X = X_L - X_C = 0;$$

$$R_{\text{кот}} = \frac{U_{\text{рез}}}{I_{\text{рез}}},$$

$$Z_{\text{кот}} = \frac{U_{\text{кот}}^{\text{рез}}}{I_{\text{рез}}},$$

$$X_L = \sqrt{Z_{\text{кот}}^2 - R_{\text{кот}}^2},$$

$$X_C = \frac{U_C}{I},$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f},$$

$$Z = \sqrt{(R - R_{\text{кот}})^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$U_{\text{кот}} = IR_{\text{кот}};$$

$$U_L = I X_L;$$

$$U_C = I X_C;$$

$$\cos \varphi = \frac{R_{\text{кот}}}{Z}.$$

Таблиця 12.1 – Результати вимірювань і розрахунків

№ досліду	Дослід	Виміряні величини			
		$U, \text{В}$	$U_{\text{кот}}, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$I, \text{мА}$
1	$X_L = X_C$				
2	$X_L < X_C$				
3	$X_L > X_C$				

№ досліду	Розраховані величини									
	$R_{\text{кот}}, \text{Ом}$	$Z_{\text{кот}}, \text{Ом}$	$X_C, \text{Ом}$	$X_L, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$Z, \text{Ом}$	$U_{\text{кот}}, \text{В}$	$U_L, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$\cos \varphi$
1										
2	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
3	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

де ** – вказані комірки не заповнюються.

5. Модель для дослідження частотної залежності резонансного кола і визначення резонансної частоти наведено на рис. 12.4.

На рис. 12.5 показано вікно налагодження кола в полях якого поставлені

значення параметрів і величини, що підлягають вимірюванню. Після установки параметрів моделювання (рис. 12.6) проводиться запуск моделі. Вікно вимірювального приладу *Multimeter* показано на рис. 12.7.

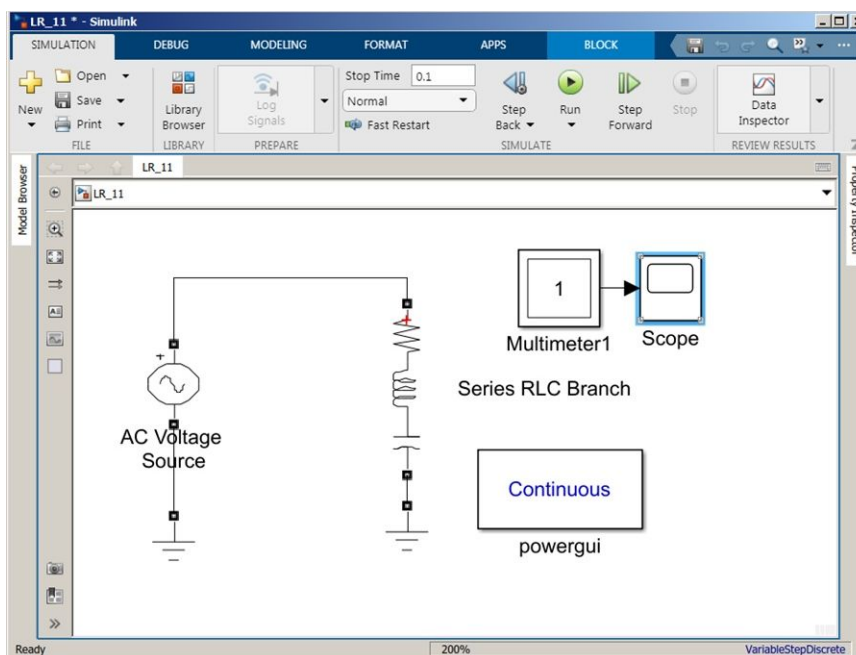


Рисунок 12.4 – Досліджувана схема

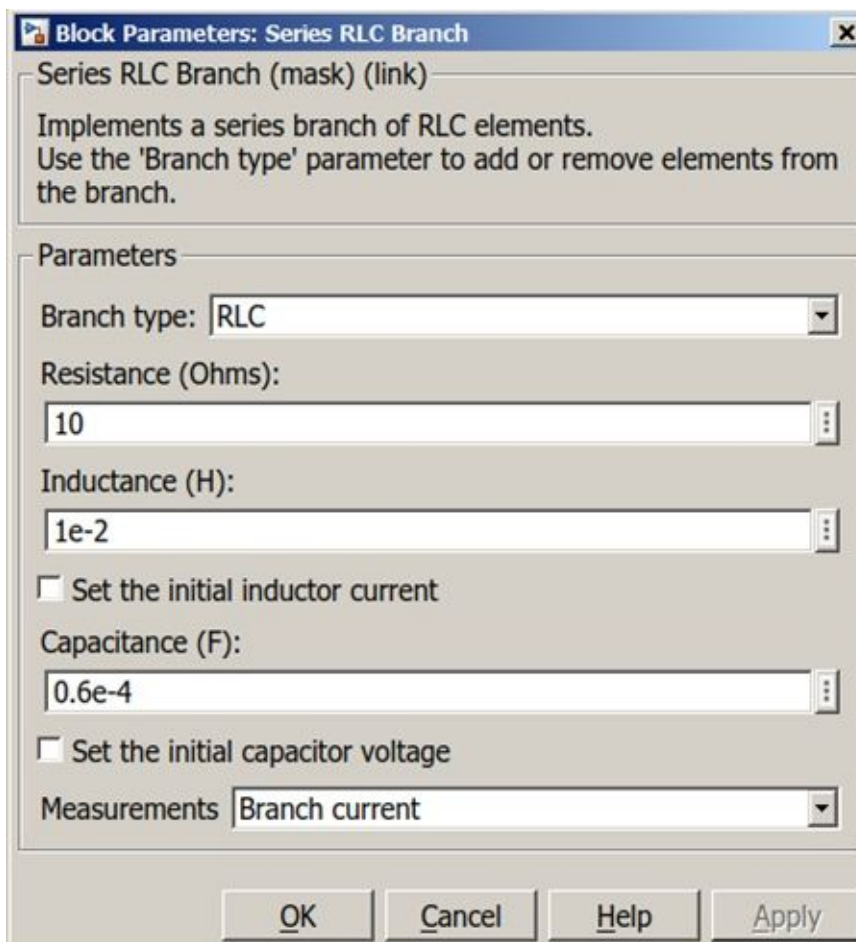


Рисунок 12.5 – Параметри послідовного *RLC*-кола

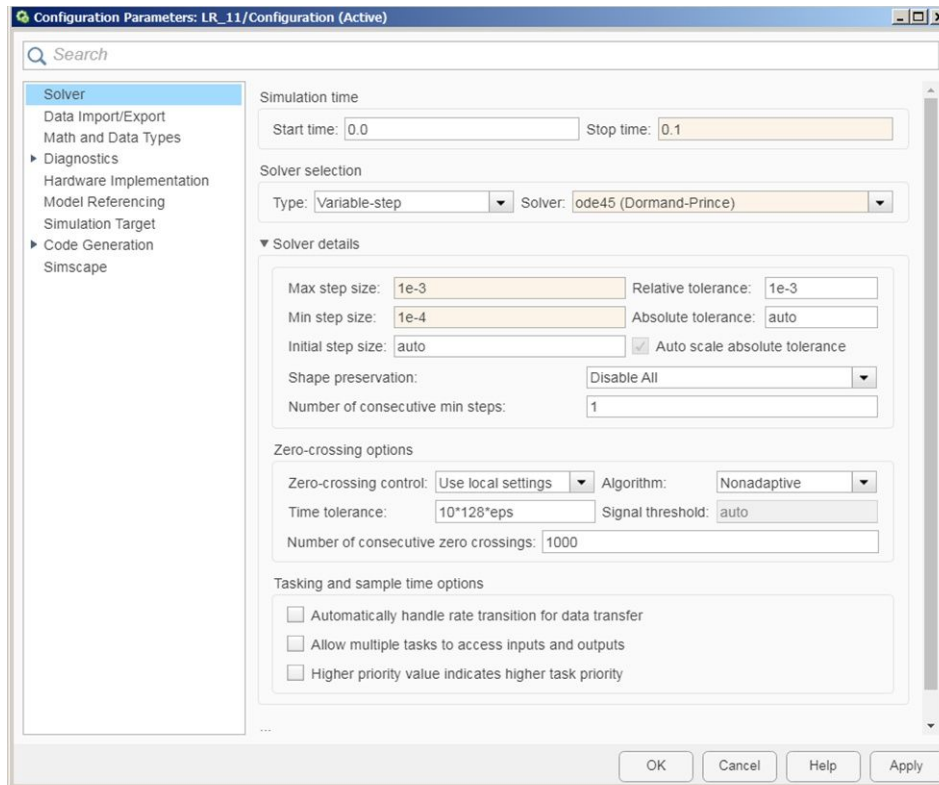


Рисунок 12.6 – Параметри моделювання

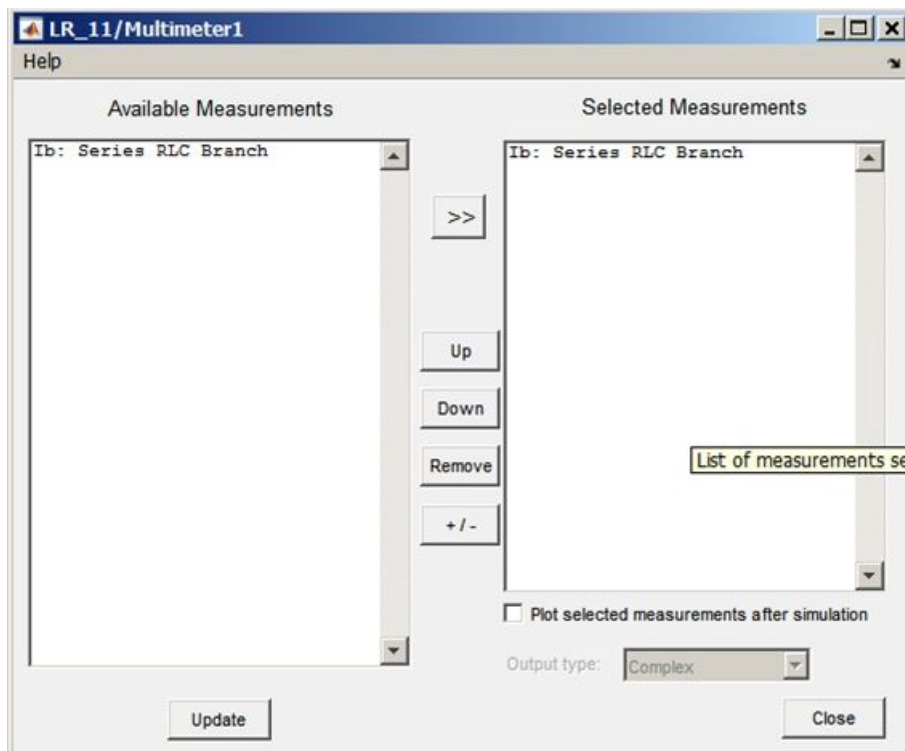


Рисунок 12.7 – Вікно вимірювального приладу *Multimeter*

Прилад вимірює і передає для подальшої обробки значення струму послідовного *RLC*-кола.

Для зняття частотної характеристики досліджуваного кола надалі слід послідовно відкрити вікно налагодження блоку *Powergui*, на панелі *Tools*

натиснути кнопку *Use Linear System Analyzer* (рис. 12.8). При цьому відкриється вікно динамічного зв'язку моделі і лінійного аналізу кола. Це вікно показано на рис. 12.9.

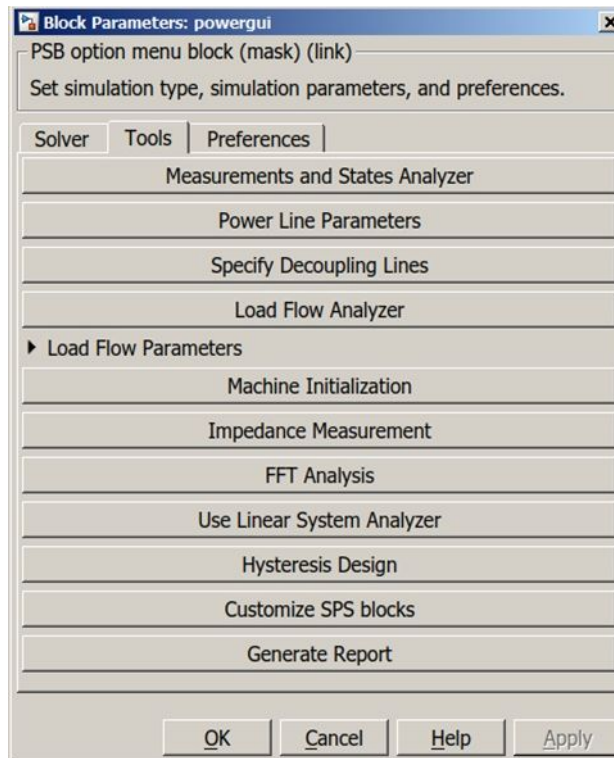


Рисунок 12.8 – Вікно блоку графічного інтерфейсу користувача

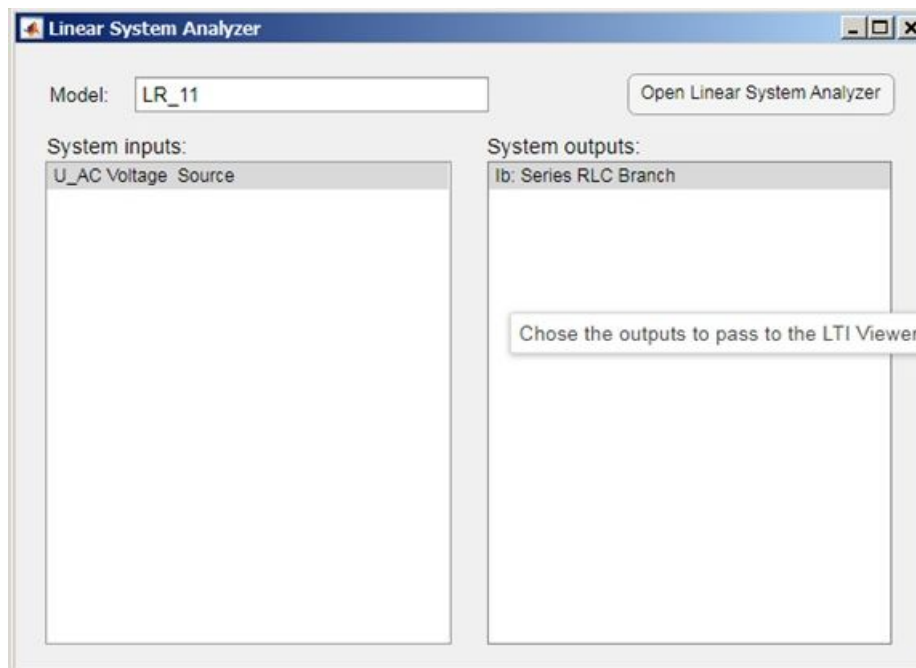


Рисунок 12.9 – Вікно зв'язку моделі і блоку *LTI Viewer*

У лівому полі цього вікна (*System inputs*) вказано джерело вхідного сигналу. При цьому слід мати на увазі, що при лінійному аналізі програма генерує стандартний вхідний сигнал напругою один вольт незалежно від

встановлених параметрів джерела напруги в моделі. У правому полі (*System outputs*) показуються сигнали, що виміряні блоком *Multimeter* (рис. 12.7). Для правильної роботи аналізу необхідно вибрати струм в колі (*Ib: Series RLC Branch*). Для проведення лінійного аналізу необхідно натиснути кнопку *Open Linear System Analyzer*, потім в полі вікна, що з'явилося, клацнути правою кнопкою і в меню, що розкрилося, з рядка *Plot Types* вибрати тип лінійного аналізу *Bode*, за допомогою якого реалізується аналіз частотної залежності амплітуди і фази розглянутого кола. Результат частотного аналізу моделі представлено на рис. 12.10. За потреби, можна вибрати систему для аналізу через меню *File / Import*.

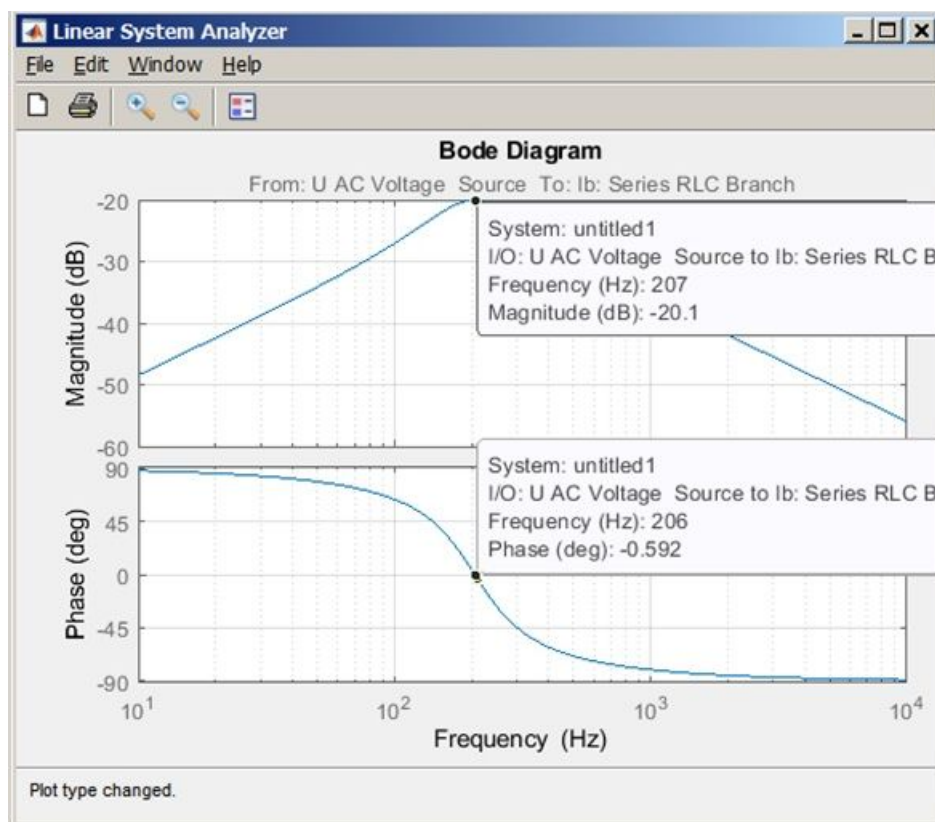


Рисунок 12.10 – Частотні характеристики послідовного *RLC*-кола

Способи представлення результатів частотного аналізу задаються у вікні *Linear System Analyzer Preferences* (рис. 12.11), яке відкривається послідовним натисненням *Edit* і *Linear System Analyzer*.

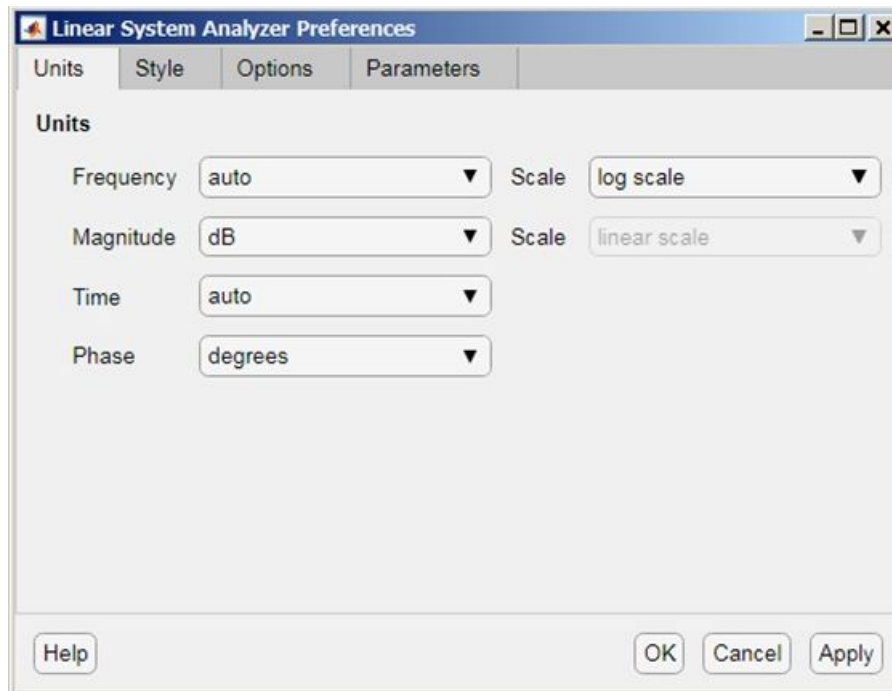


Рисунок 12.11 – Вікно *Linear System Analyzer Preferences*

6. Для визначення резонансної частоти необхідно навести курсор на криву, натиснути ліву кнопку миші і, утримуючи її, постаратися знайти максимальне значення амплітуди, а потім мінімальне (краще нульове) значення фази. Результати такого пошуку видно з рис. 12.10, звідки можна зробити висновок, що резонансна частота дорівнює 206 Гц. Значення цієї частоти береться за основу для проведення вимірювань при резонансі, зняття частотних залежностей на пасивних елементах резонансного кола, визначення залежності параметрів резонансного кола від величини активного опору.

7. Для проведення всіх вимірювань при резонансі використовується модель, що представлена на рис. 12.12.

Відмінність цієї моделі від попередньої полягає в тому, що тут використано три окремі RLC -кола, з'єднані послідовно. У кожному з цих кіл залишений тільки один елемент R , L , C , причому значення їх параметрів беруться з попереднього пункту лабораторної роботи. Вікно налагодження параметрів джерела напруги показано на рис. 12.13.

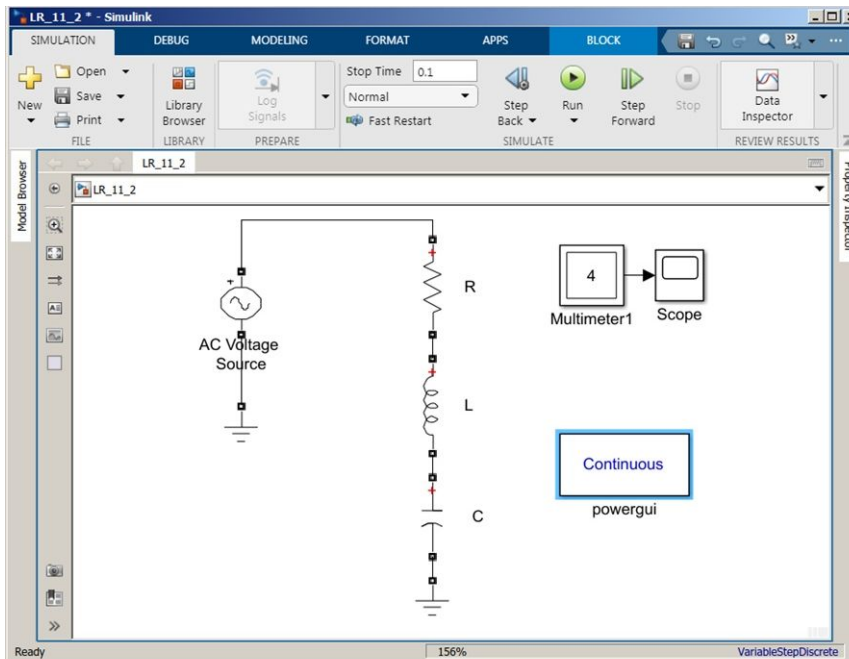


Рисунок 12.12 – Модель послідовного RLC -кола

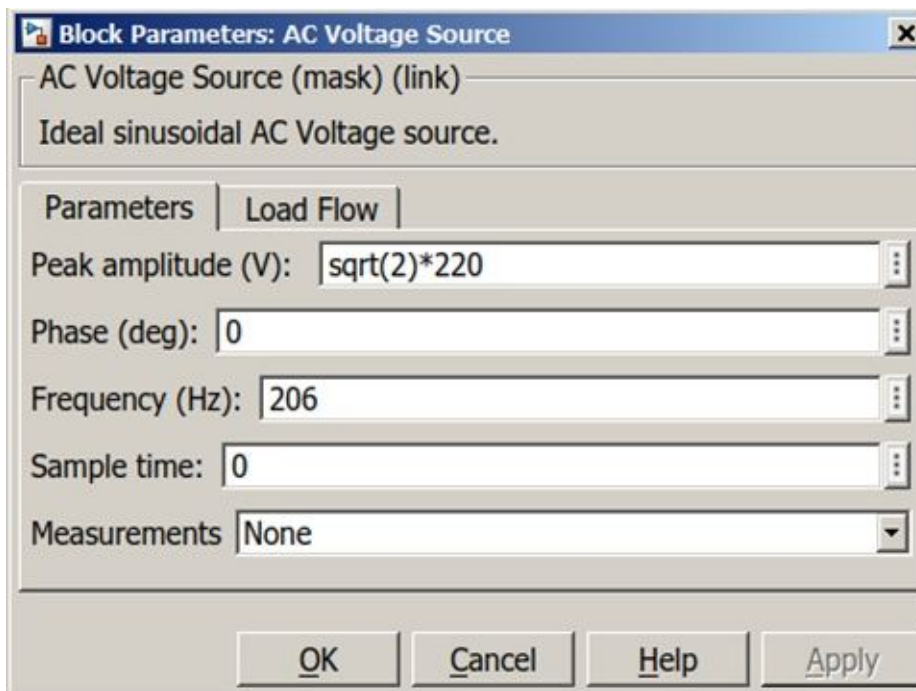


Рисунок 12.13 – Вікно налагодження параметрів джерела живлення

Частота напруги джерела прийнята рівній резонансній частоті кола, яка визначена в попередньому пункті лабораторної роботи.

Блок *Multimeter* послідовно вимірює і передає для подальшої обробки напругу на ємності, напругу на індуктивності, напругу і струм опору (рис. 12.14).

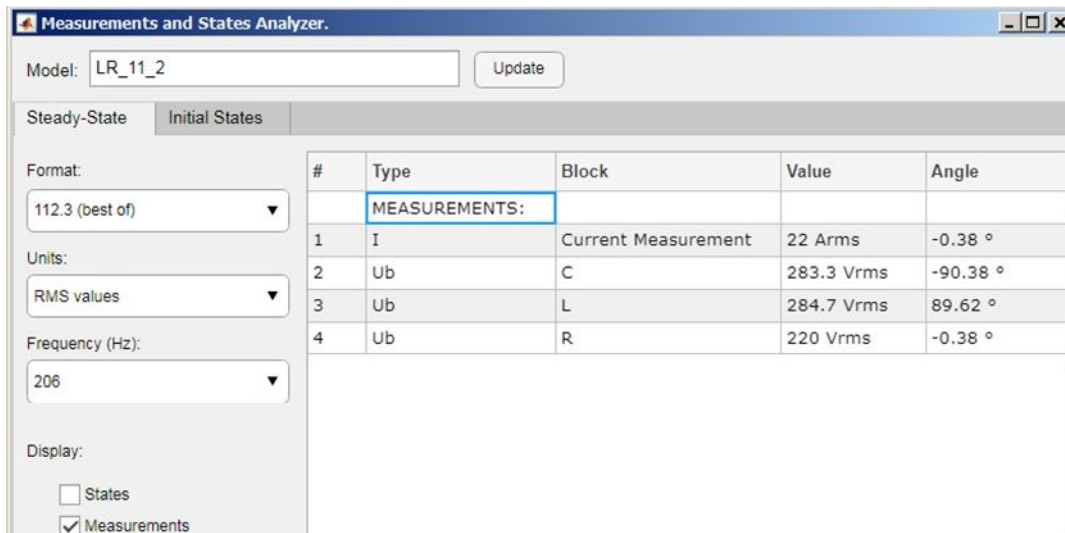


Рисунок 12.14 – Результати вимірювань перерахованих величин у вікні блоку *powergui*.

Звернемо увагу, що в полі вікна фігурують діючі значення напруги і струму. Результати вимірювань і розрахунків заносяться в табл. 12.2.

Таблиця 12.2 – Результати вимірювань і розрахунків

Параметри			Результати вимірювань								Результати розрахунків
R , Ом	L , Гн	C , Ф	U_R , В	φ_R , град	U_L , В	φ_L , град	U_C , В	φ_C , град	I , А	φ_I , град	Q , вар

8. Для проведення частотного аналізу кола відкривається вікно динамічного зв'язку моделі і *Linear System Analyzer* (рис. 12.15).

Визначення залежності параметрів резонансного кола від величини активного опору виконуються на моделі (рис. 12.12) для двох значень опору: вдесятеро більшим і вдесятеро меншим ніж його значення в попередньому пункті роботи.

Результати вимірювань заносяться в таблицю, яка аналогічна табл. 12.2.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схема дослідження, таблиці, графіки.
3. Розрахункові формули, розрахунки за результатами досліджень.
4. Векторна діаграма для усіх дослідів.

5. Короткі висновки про виконану роботу.

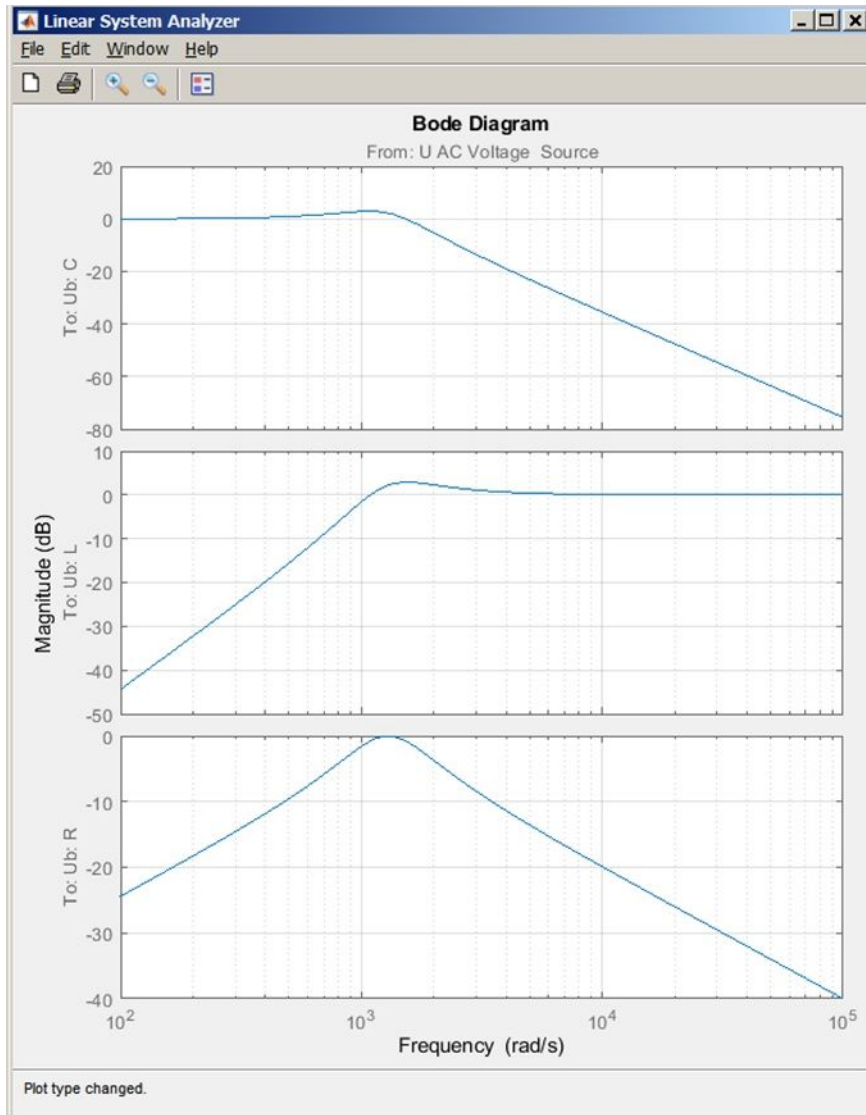


Рисунок 12.15 – Амплітудно-частотні характеристики RLC -кола

5. Контрольні запитання та завдання

1. Що таке резонанс напруг?
2. У скільки разів зростають U_C і $U_{\text{кот}}$ при резонансі?
3. Чому дорівнює активна потужність при резонансі?
4. Які одиниці вимірювання індуктивності котушки?
5. Вкажіть одиниці вимірювання ємності конденсатора.

13 ПАРАЛЕЛЬНЕ RC-З'ЄДНАННЯЮ КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Відпрацювання практичних навичок і дослідна перевірка теоретичних положень про розподіл струмів у колах із паралельним з'єднанням резистивного та ємнісного елементів.

2. Теоретична частина

На рис. 13.1 зображено схему електричного кола з паралельним з'єднанням елементів R і C . У цьому колі напруги на кожній вітці схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює сумі струмів віток.

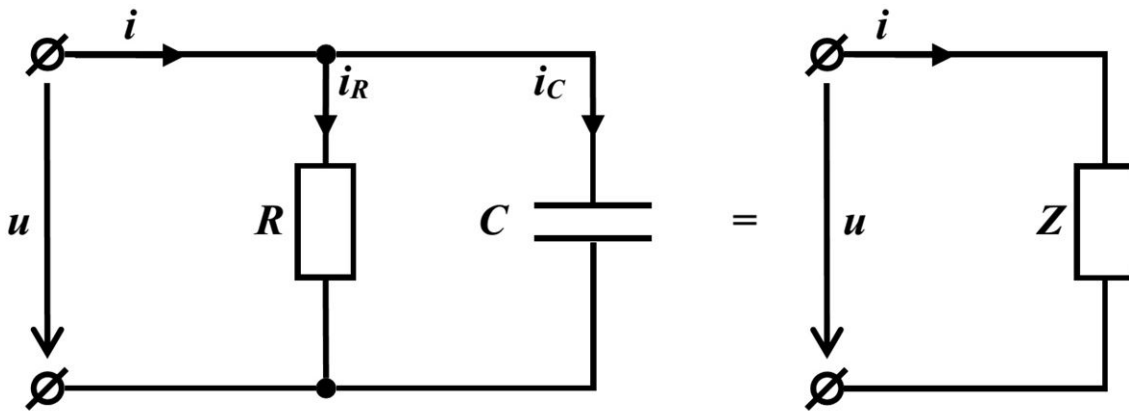


Рисунок 13.1 – Схема кола з паралельним з'єднанням елементів R і C

Нехай напруга джерела змінюється за синусоїдним законом з початковою фазою $\psi_U = 0$. Тоді струм i у нерозгалуженій частині кола теж змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_I = \psi_U - \varphi = -\varphi$:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Струми у паралельних вітках схеми визначимо за виразами:

$$I_{mR} = \frac{U_m}{R},$$

$$I_{mC} = \frac{U_m}{X_C},$$

Тоді миттєві значення:

$$i_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t,$$

$$i_C = \frac{U_m}{X_C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, струм до розгалуження дорівнює:

$$i = i_R + i_C = U_m g \sin \omega t + U_m b_C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin(\omega t - \varphi),$$

де $g = \frac{1}{R}$ – активна провідність ($[g] = 1 \text{ См}$); $b_C = \frac{1}{X_C}$ – реактивна ємнісна

провідність ($[b_C] = 1 \text{ См}$); $I_m = \sqrt{I_{mR}^2 + I_{mC}^2}$ – максимальне значення струму;

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{b_C}{g}\right).$$

Діюче значення струму джерела

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}. \quad (13.1)$$

Виразивши в рівнянні (13.1) струми паралельних віток через напругу і відповідні провідності, отримаємо:

$$I = Uy = U\sqrt{g^2 + b_C^2}.$$

Величину

$$y = \sqrt{g^2 + b_C^2}$$

називають **повною провідністю кола**.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 13.2), де $R = 10 + N$ Ом, $C = N$, мкФ, N – номер варіанта.

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку **Run**.

3. Відкрийте вікно параметрів **Powergui**, виберіть **Tools** режим вимірювань **Measurements and States Analyzer**, встановіть вимірювання напруги та струмів **RMS Values**, **Frequency – 50** (рис. 13.3), запишіть результати вимірювань комплексів напруги на паралельному RL -з'єднанні (**Voltage Measurement U**), струму (**Current Measurement I1**, **Current Measurement I2**, **Current Measurement I3**).

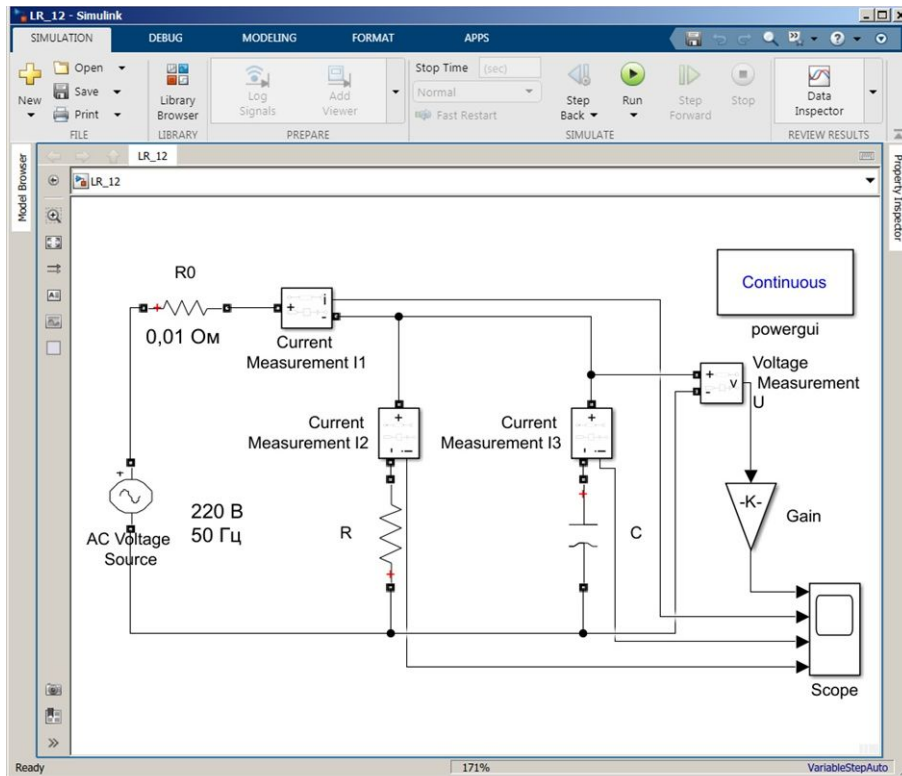


Рисунок 13.2 – Досліджувана схема

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U	Voltage Measurement U	220 Vrms	-0.00 °
2	I	Current Measurement I1	0.08193 Arms	57.52 °
3	I	Current Measurement I2	0.044 Arms	-0.00 °
4	I	Current Measurement I3	0.06911 Arms	90.00 °

Рисунок 13.3 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

4. Відкрийте осцилоскоп *Scope* і знайдіть осцилограми струму через опір i_2 , ємність i_3 , струму i_1 , а також прикладеної напруги u . (рис. 13.4).

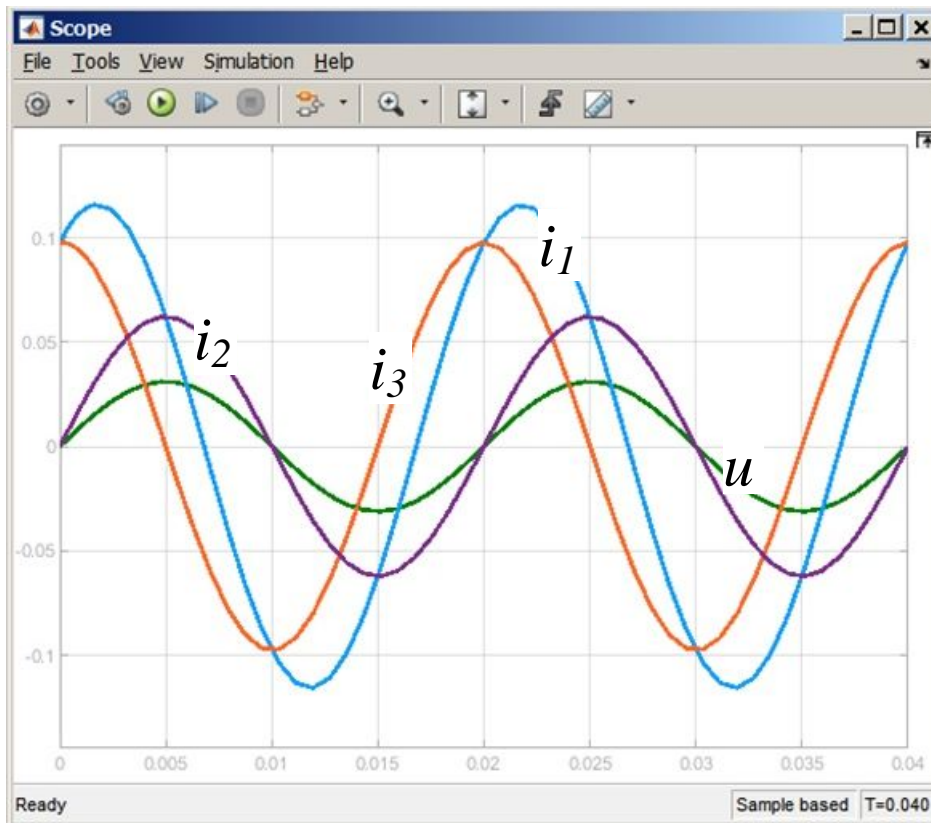


Рисунок 13.4 – Результати вимірювання миттєвих значень напруги, струму (приклад)

5. Змінюючи величини R провести дослід:

Дослід 1. Провести дослід відповідно до пункту першого табл. 13.1.

Дослід 2. Параметри елементів для проведення цього дослідження слід брати з пунктів 2 і 3 табл. 13.1.

Таблиця 13.1 – Результати вимірювань і розрахунків

№	Дослід	Виміряні величини						Розраховані величини				
		C , мкФ	R , Ом	U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	X_C , Ом	b , См	g , См	y , См	I_1 , мА
1	$R = 10+N$, Ом											
2	$R =$ $0,5(10+N)$, Ом											
3	$R =$ $0,25(10+N)$, Ом											

Дані вимірювань внести до табл. 13.1.

3. Розрахувати величини X_C , b , g , y , I_1 :

$$X_C = \frac{U}{I_2};$$

$$b = \frac{1}{X_C};$$

$$g = \frac{1}{R};$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2};$$

$$I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}.$$

4. Результати розрахунків внести до табл. 13.1.

5. Порівняти струм I_1 розрахований і дослідний.

6. За дослідними даними переконатись, що $I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}$.

4. Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Схема досліджень, таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Векторні діаграми (в масштабі).
5. Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.

5. Контрольні запитання

1. Що таке коло синусоїдного струму?
2. Записати формулу активної провідності.
3. Яку величину називають повною провідністю кола?
4. Поясніть, чому в усіх дослідах струм I однаковий.
5. Як і чому змінюються I_1 , I_2 , I_3 при збільшенні R у 2 рази?

14 ПАРАЛЕЛЬНЕ RL -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи

Відпрацювання практичних навичок і перевірка на досліді теоретичних положень про розподіл струмів у колах із паралельним з'єднанням резистивного та індуктивного елементів.

2. Теоретична частина

На рис. 14.1 зображено схему електричного кола з паралельним з'єднанням елементів R і L . У цьому колі напруги на кожній вітці схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює сумі струмів віток.

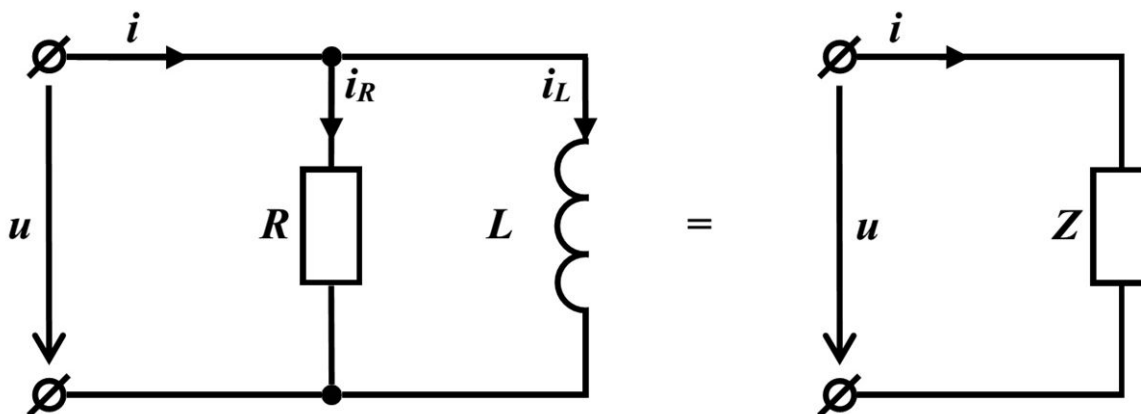


Рисунок 14.1 – Схем кола з паралельним з'єднанням елементів R і L

Нехай напруга джерела змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_U = 0$. Тоді струм i у нерозгалуженій частині кола теж змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_I = \psi_U - \varphi = -\varphi$:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Струми у паралельних вітках схеми визначимо за виразами:

$$I_{mR} = \frac{U_m}{R},$$

$$I_{mL} = \frac{U_m}{X_L},$$

Тоді миттєві значення:

$$i_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t,$$

$$i_L = \frac{U_m}{X_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, струм до розгалуження дорівнює:

$$i = i_R + i_L = U_m g \sin \omega t + U_m b_L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin(\omega t - \varphi),$$

де $g = \frac{1}{R}$ – активна провідність ($[g] = 1 \text{ См}$); $b_L = \frac{1}{X_L}$ – реактивна індуктивна

провідність ($[b_L] = 1 \text{ См}$); $I_m = \sqrt{I_{mR}^2 + I_{mL}^2}$ – максимальне значення струму;

$$\varphi = \arctg\left(\frac{b_L}{g}\right).$$

Діюче значення струму джерела

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}. \quad (14.1)$$

Виразивши в рівнянні (14.1) струми паралельних віток через напругу і відповідні провідності, отримаємо:

$$I = Uy = U\sqrt{g^2 + b_L^2}.$$

Величину

$$y = \sqrt{g^2 + b_L^2}$$

називають **повною провідністю кола**.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему рис. 14.2, де $R = 10 + N$, Ом; $L_{max} = 0,1 \cdot N$, Гн, N – номер варіанта.

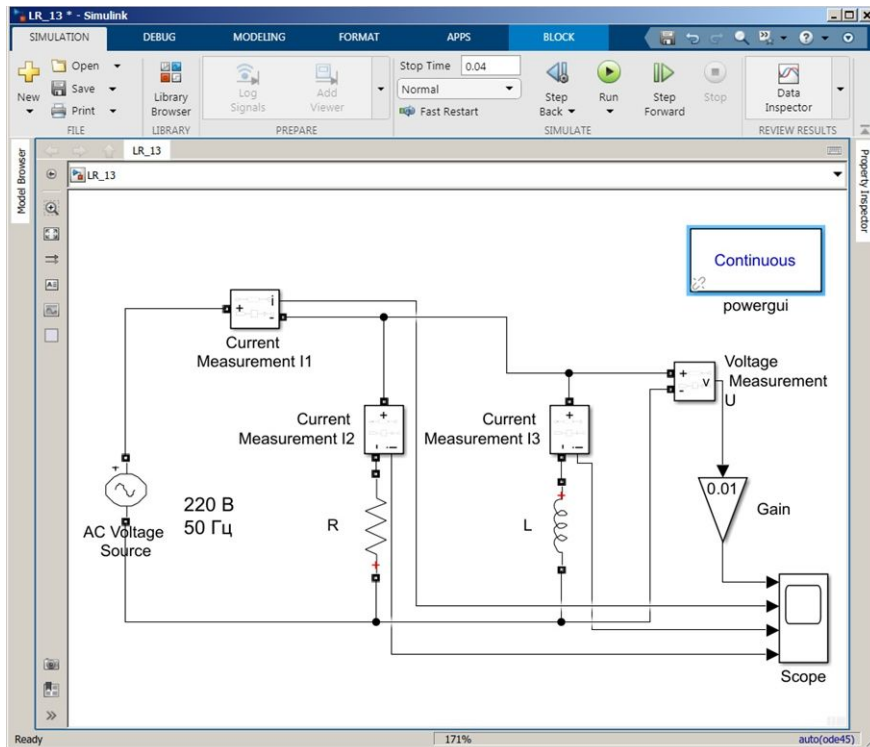


Рисунок 14.2 – Досліджувана схема

2. Для запуску схеми необхідно натиснути на кнопку **Run**.

3. Відкрийте вікно параметрів **Powergui**, виберіть **Tools** режим вимірювань **Measurements and States Analyzer**, встановіть вимірювання напруги та струмів **RMS Values**, **Frequency – 50** (рис. 14.3), запишіть результати вимірювань комплексів напруги на паралельному **RL**- з'єднанні (**Voltage Measurement U**), струму (**Current Measurement I1**, **Current Measurement I2**, **Current Measurement I3**).

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U	Voltage Measurement U	220 Vrms	0.00 °
2	I	Current Measurement I1	0.7017 Arms	-86.40 °
3	I	Current Measurement I2	0.044 Arms	0.00 °
4	I	Current Measurement I3	0.7003 Arms	-90.00 °

Рисунок 14.3 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

4. Відкрийте осцилоскоп **Scope** і знайдіть осцилограми струму через опір i_2 , індуктивність i_3 , струму i_1 , а також прикладеної напруги u . (рис. 14.4).

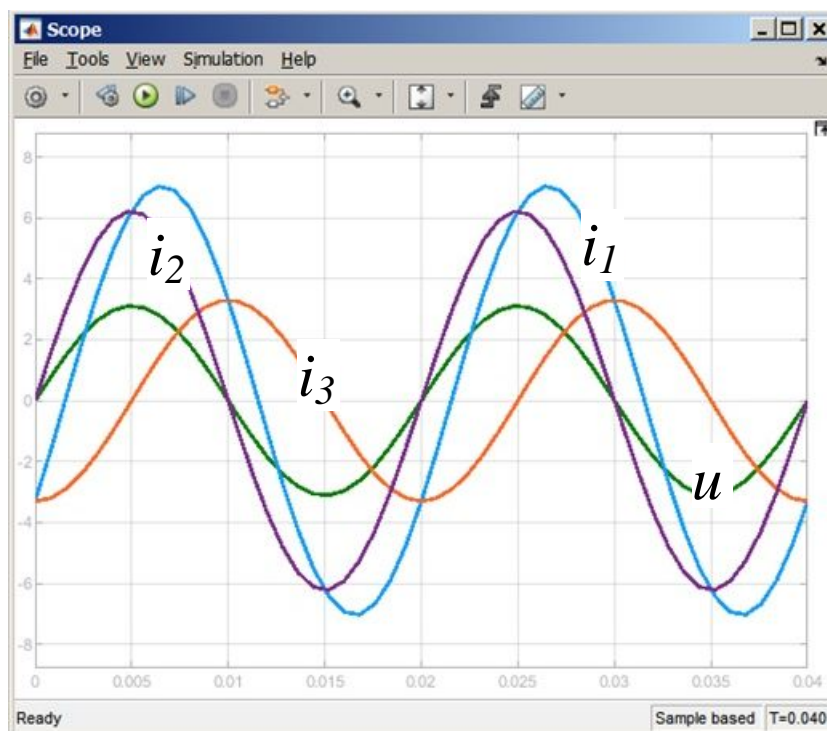


Рисунок 14.4 – Результати вимірювання миттєвих значень напруги, струму (приклад)

5. Змінюючи величини R , L_{max} провести досліди:

Дослід 1. Провести досліди відповідно до табл. 14.1.

Дослід 2. Спостерігати за зміною вимірних величин із зміною індуктивності котушки L .

Таблиця 14.1 – Таблиця 4.12.1 Результати вимірювань і розрахунків

№	Дослід	Вимірні величини				Розраховані величини			
		U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	g_2 , См	b_3 , См	y , См	I_1 , мА
1	R, L_{max}								
2	$0,5R, L_{max}$					***	***	***	***
3	$R, 0,1L_{max}$								

**** – відмічені комірки не заповнюються.

Дані вимірювань внести до табл. 14.1.

3. Розрахувати величини b_3 , g_2 , y , I_1 (за дослідними даними). Результати розрахунків внести до табл. 14.1.

$$g_2 = \frac{I_2}{U};$$

$$b_3 = \frac{I_3}{U};$$

$$y = \sqrt{g_2^2 + b_3^2};$$

$$I_1 = Uy.$$

4. Порівняти розрахований і дослідний струм I_1 .
5. За дослідними даними переконатись, що $I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}$.

4. Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Схема досліджень, таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунки за результатами досліджень.
4. Векторні діаграми (в масштабі).
5. Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.

5. Контрольні запитання

1. Що таке коло синусоїдного струму?
2. Записати формулу активної провідності.
3. Записати формулу реактивної індуктивної провідності.
4. Яку величину називають повною провідністю кола?
5. Як і чому змінюються I_1 , I_2 , I_3 при збільшенні R та L ?

15 ПАРАЛЕЛЬНЕ LC-З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ. РЕЗОНАНС СТРУМІВ

1. Мета роботи

Дослідження фізичних явищ при резонансі струмів та різних співвідношеннях провідностей у розгалуженому електричному LC- колі.

2. Теоретична частина

На рис. 15.1 зображено схему електричного кола з паралельним з'єднанням елементів C і L . У цьому колі напруги на кожній вітці, схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює сумі струмів віток.

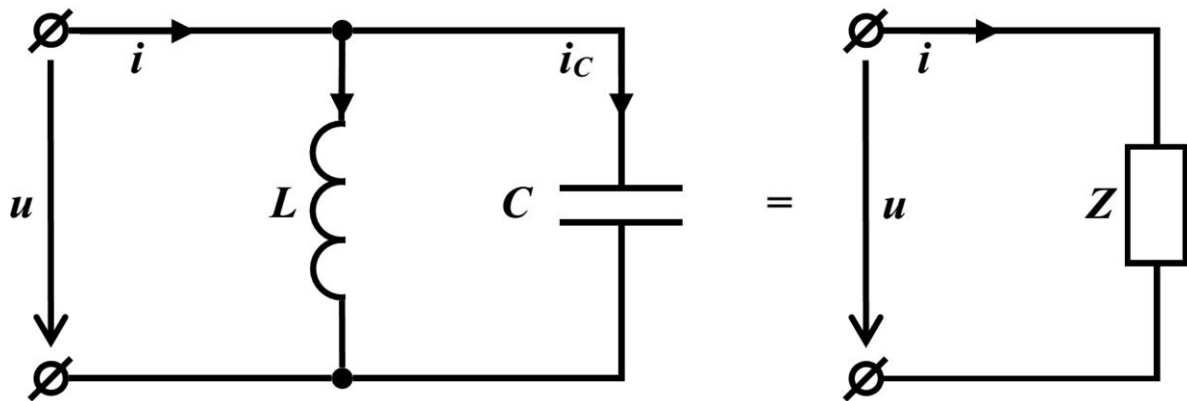


Рисунок 15.1 – Схема кола з паралельним з'єднанням елементів C і L

Нехай напруга джерела змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_U = 0$. Тоді струм i у нерозгалуженій частині кола теж змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_I = \psi_U - \varphi = -\varphi$:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Струми у паралельних вітках схеми визначимо за виразами:

$$I_{mC} = \frac{U_m}{X_C},$$

$$I_{mL} = \frac{U_m}{X_L},$$

Тоді миттєві значення:

$$i_C = \frac{U_m}{X_C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$i_L = \frac{U_m}{X_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, струм до розгалуження дорівнює:

$$i = i_C + i_L = U_m b_C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + U_m b_L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (15.1)$$

де $b_C = \frac{1}{X_C}$ – реактивна ємнісна провідність ($[b_C] = 1 \text{ См}$); $b_L = \frac{1}{X_L}$ – реактивна

індуктивна провідність ($[b_L] = 1 \text{ См}$).

Котушка індуктивності має свій внутрішній опір

$$R_k = \frac{1}{g_k},$$

де $g_k = \frac{I_{рез}}{U}$.

Діюче значення струму джерела

$$I = Uy = U \sqrt{g_k^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

Величину

$$y = \sqrt{g_k^2 + (b_L - b_C)^2}$$

називають **повною провідністю кола** з паралельним з'єднанням L і C .

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему рис. 15.2, де $L = N$, Гн; $C = N$, мкФ, N – номер варіанта.

2. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку **Run**.

3. Відкрийте вікно параметрів **Powergui**, виберіть **Tools** режим вимірювань **Measurements and States Analyzer**, встановіть вимірювання напруги та струмів **RMS Values, Frequency – 50** (рис. 15.3), запишіть результати вимірювань комплексів напруги (**U: Voltage Measurement U**), струму в нерозгалуженому колі (**I: Current Measurement I1**), струму через індуктивність (**I: Current Measurement I2**), струму через ємність (**I: Current Measurement I3**).

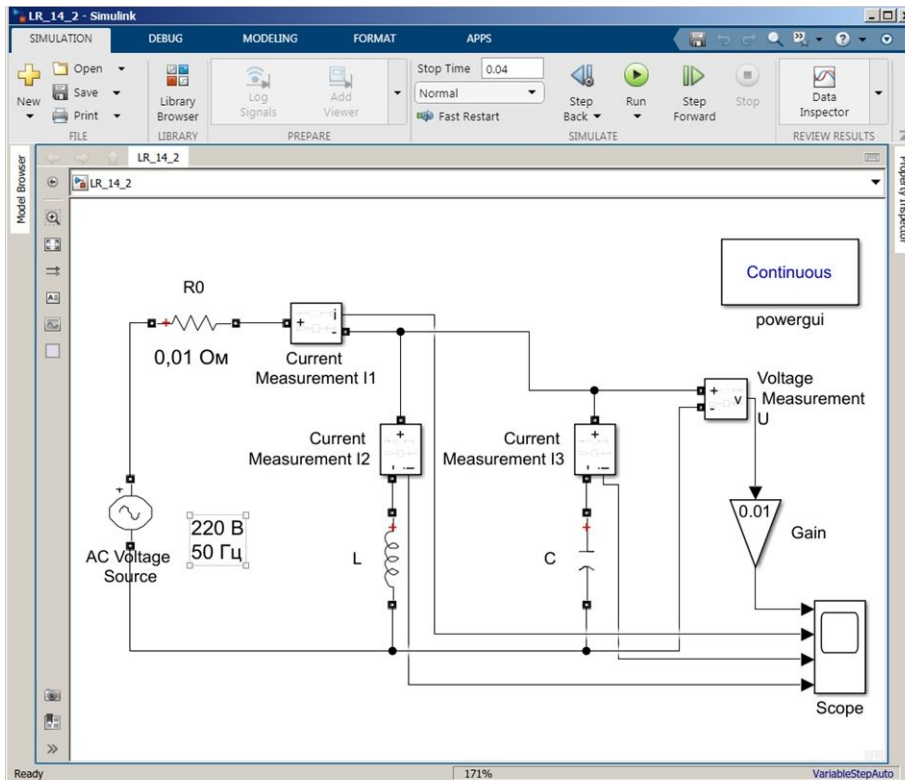


Рисунок 15.2 – Досліджувана схема

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U	Voltage Measurement U	220 Vrms	-0.00 °
2	I	Current Measurement I1	0.1198 Arms	90.00 °
3	I	Current Measurement I2	0.08754 Arms	-90.00 °
4	I	Current Measurement I3	0.2073 Arms	90.00 °

Рисунок 15.3 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів струмів у колах (приклад)

Провести досліди відповідно до табл. 15.1.

Дослід 1. Змінюючи індуктивність котушки L досягти резонанс струмів, коли значення струму I_1 ($b_L = b_C$) є мінімальним.

Дослід 2. Зменшуючи індуктивність котушки L , досягнути перевагу індуктивної провідності ($b_L > b_C$), щоб значення струму I_1 стало у два рази більше від резонансного значення.

Дослід 3. Налаштувати коло на резонанс і, продовжуючи зменшувати індуктивність, досягти збільшення струму I_1 порівняно з резонансним в 2 рази. При цьому ($b_L < b_C$).

Таблиця 15.1 – Результати вимірювань і розрахунків

№	Дослід	Виміряні величини				Розраховані величини					
		U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	Z_K , кОм	X_L , кОм	φ_K , град	y_2 , См	y_3 , См	$Z_{заг}$, кОм
1	$b_L = b_C$										
2	$b_L > b_C$										
3	$b_L < b_C$										

Дані вимірювань внести до табл. 15.1.

3. За дослідними даними розрахувати величини Z_K , y_L , φ_K , y_2 , y_3 , $Z_{заг}$.
Результати розрахунків внести в табл. 15.1.

$$Z_K = \frac{U}{I_3};$$

$$y_2 = \frac{I_2}{U};$$

$$y_3 = \frac{I_3}{U};$$

$$R_K = \frac{1}{g_K};$$

$$b_C = y_2;$$

$$b_L = \sqrt{y_3^2 - g_3^2};$$

$$y = \sqrt{g_K^2 + (b_L - b_C)^2};$$

$$x_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2};$$

$$\varphi_K = \arccos \frac{g_K}{y_K};$$

$$Z_{заг} = \frac{1}{y}$$

4. Побудувати у вибраному масштабі векторні діаграми струмів.

5. Модель для дослідження частотної залежності резонансного кола і визначення резонансної частоти наведено на рис. 15.4. Параметри *RLC*-кола показані на рис. 15.5. Послідовна вітка R_0 (*Series RLC Branch*) враховує внутрішній опір джерела напруги. Значення опору цієї вітки слід задавати на порядок менше, чим значення опору паралельної вітки. Частотна характеристика, показана на рис. 15.6. На частотній характеристиці визначена резонансна частота.

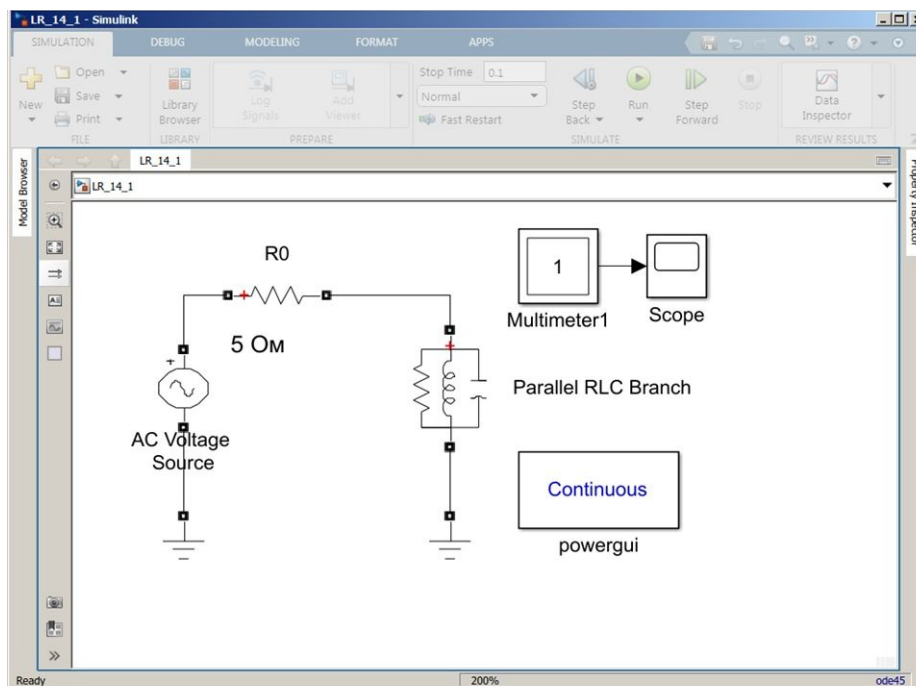


Рисунок 15.4 – Модель для дослідження резонансу струмів

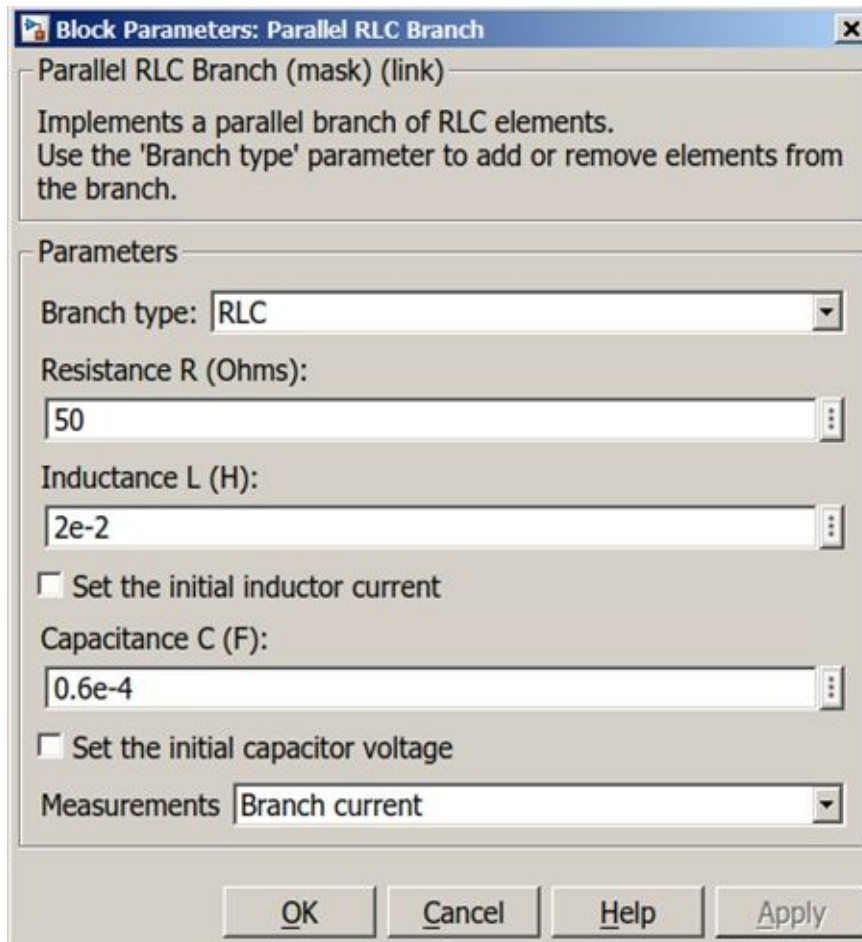


Рисунок 15.5 – Вікно налагодження параметрів паралельного RLC -кола

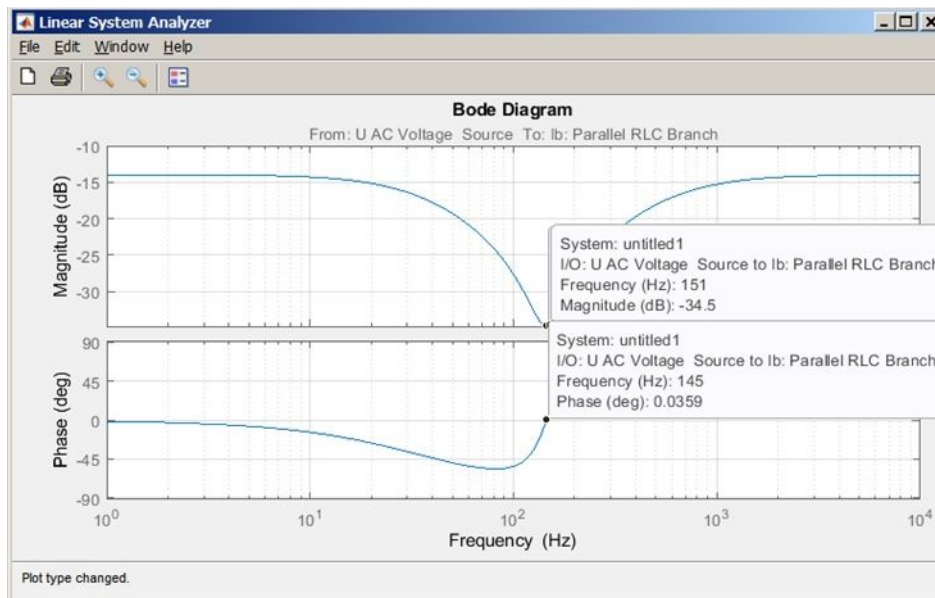


Рисунок 15.6 – Частотні характеристики паралельного RLC -кола

6. Вимірювань при резонансі, зняття частотних залежностей струмів в пасивних елементах резонансного кола та визначення залежності параметрів резонансного кола від значення резистивного опору здійснюється на моделі рис. 15.7.

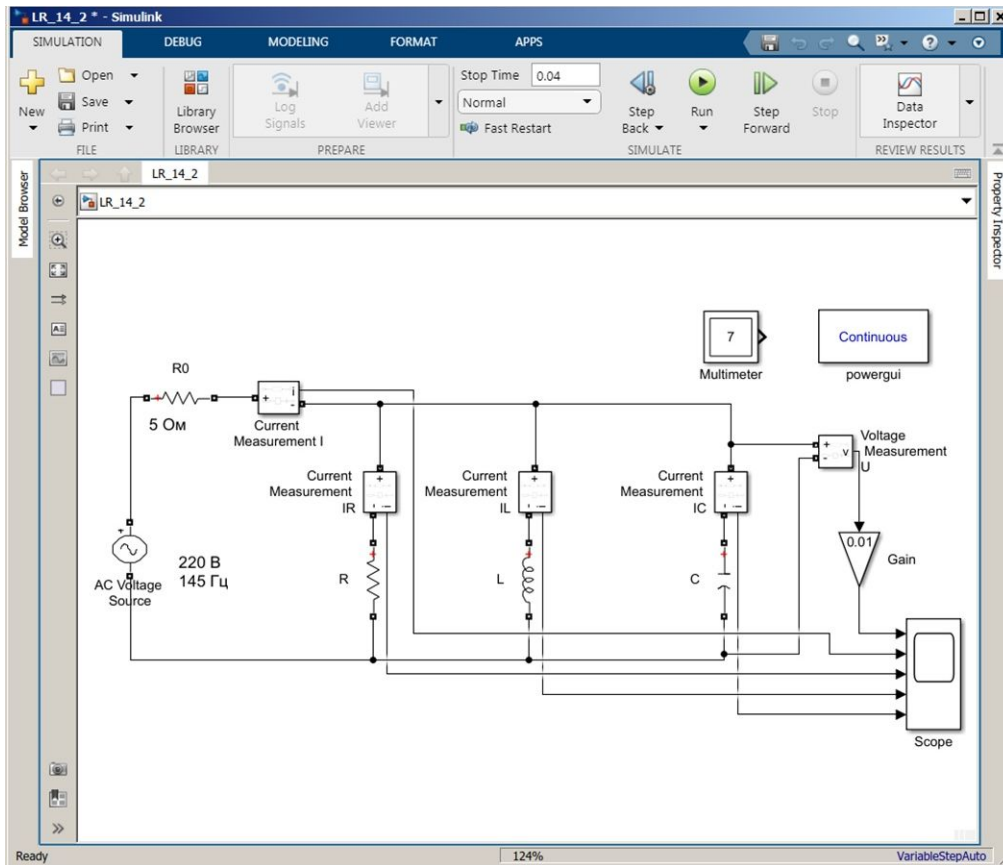


Рисунок 15.7 – Модель для дослідження частотних характеристик паралельного RLC -кола

Відмінність цієї моделі від попередньої полягає в тому, що тут використано три окремі RLC -кола, які з'єднані паралельно. У кожному з цих кіл залишено лише один елемент R , L і C , причому значення їх параметрів беруться з попереднього пункту лабораторної роботи. Вікно налагодження параметрів джерела напруги показане на рис. 15.8. Частота джерела напруги прийнята рівній резонансній частоті кола, визначеного в пункті 5 лабораторної роботи.

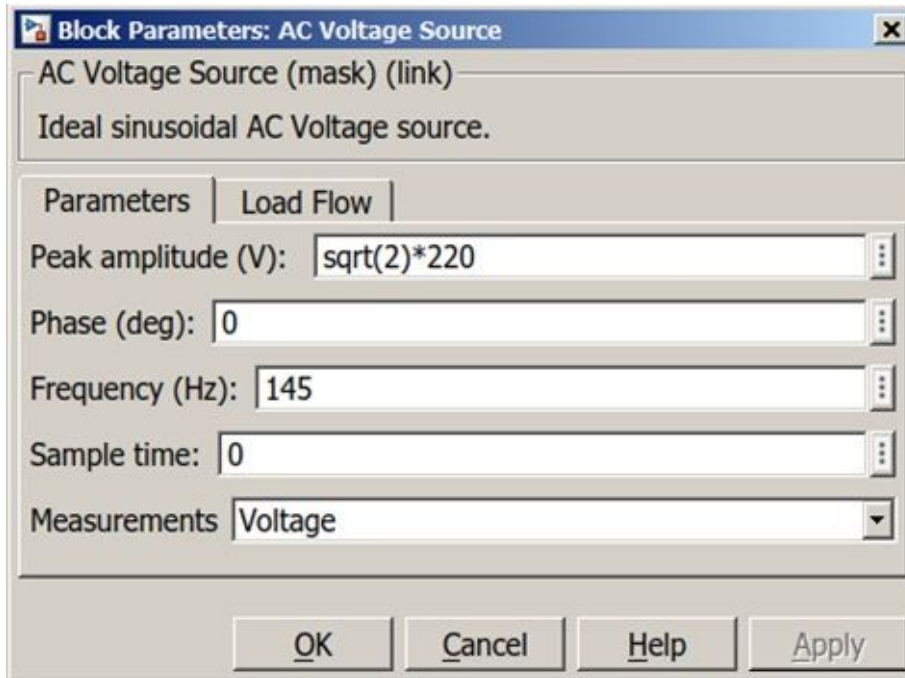


Рисунок 15.8 – Вікно налагодження джерела напруги

Блок *Multimeter* послідовно вимірює і передає для подальшої обробки струм на вході і струми в елементах (рис. 15.9).

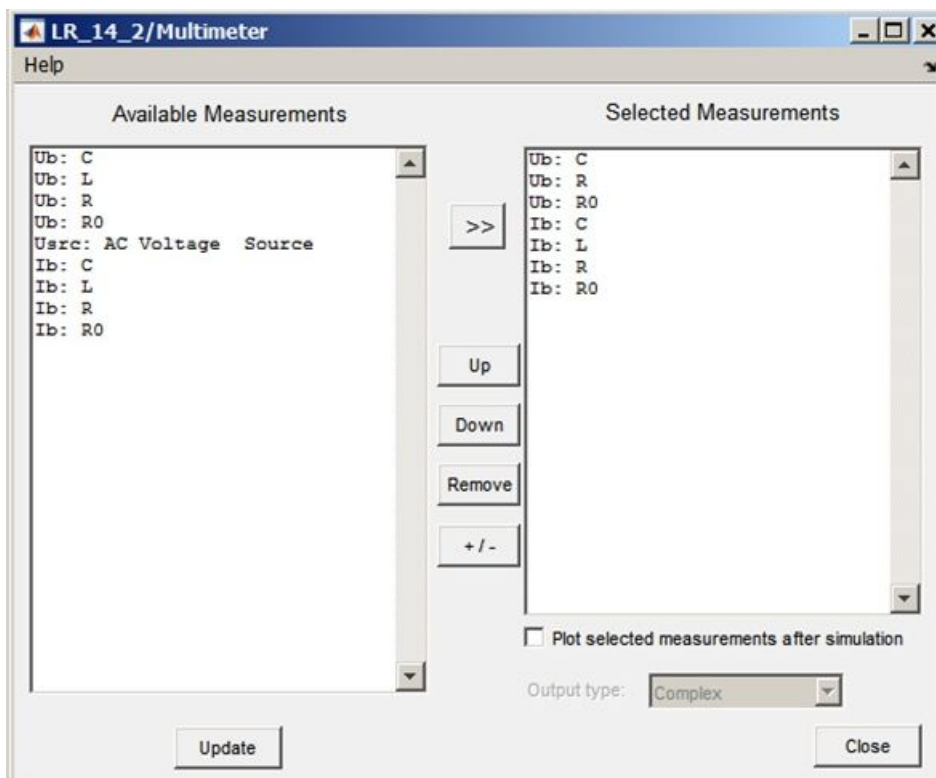


Рисунок 15.9 – Блок *Multimeter*

Результати вимірювань перерахованих величин показано у вікні блоку *powergui* (рис. 15.10). Звернемо увагу, що в полі вікна фігурують діючі значення струмів.

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U	Voltage Measurement U	217.8 Vrms	-0.07 °
2	I	Current Measurement IC	0.5953 Arms	89.93 °
3	I	Current Measurement IL	0.02989 Arms	-90.07 °
4	I	Current Measurement IR	4.356 Arms	-0.07 °
5	I	Current Measurement I	4.393 Arms	7.32 °
6	Ub	C	217.8 Vrms	-0.07 °
7	Ub	L	217.8 Vrms	-0.07 °
8	Ub	R	217.8 Vrms	-0.07 °
9	Ub	R0	2.196 Vrms	7.32 °
10	Usrc	AC Voltage Source	220 Vrms	0.00 °
11	Ib	C	0.5953 Arms	89.93 °
12	Ib	L	0.02989 Arms	-90.07 °
13	Ib	R	4.356 Arms	-0.07 °
14	Ib	R0	4.393 Arms	7.32 °

Рисунок 15.10 – Результати вимірювань

Результати вимірювань і розрахунків заносяться в табл. 15.2.

Таблиця 15.2 – Таблиця 3.1 - Результати вимірювань і розрахунків

Параметри			Результати вимірювань								Результати розрахунків
R , Ом	L , Гн	C , Ф	I_R , А	φ_R , град	I_L , А	φ_L , град	I_C , А	φ_C , град	U , В	φ_U , град	Q , вар

Частотні залежності струмів в ємнісному та індуктивному елементах показані на рис. 15.11.

4. Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Схема досліджень, таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунки за результатами досліджень.
4. Векторні діаграми (в масштабі).
5. Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.

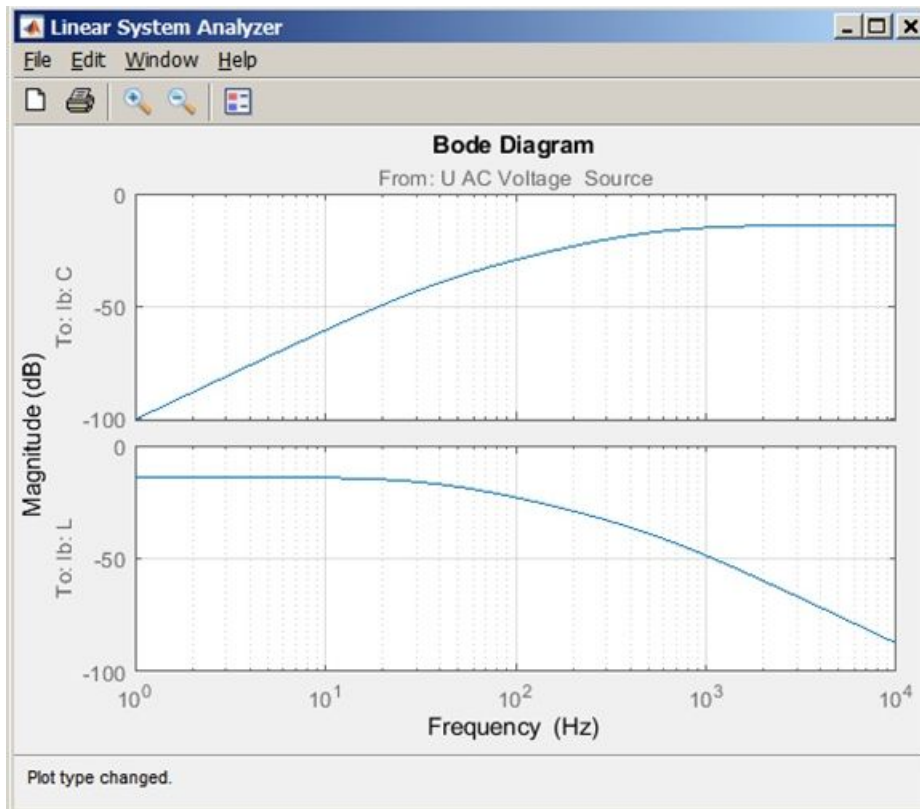


Рисунок 15.11 – Частотні залежності струмів в ємнісному та індуктивному елементах

5. Контрольні запитання

1. Як визначається резонансна частота електричного кола при паралельному з'єднанні котушки конденсатора?
2. Чому при резонансі струмів Z – мінімальний?
3. Чому струм I не змінюється в різних дослідах?
4. Порівняйте загальний опір контуру при резонансі напруг і резонансі струмів.
5. Яку величину називають повною провідністю кола з паралельним з'єднанням елементів L і C ?

16 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ З'ЄДНАННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗІРКОЮ

1. Мета роботи

Перевірка основних співвідношень в трифазній системі при сполученні приймачів зіркою при рівномірному і нерівномірному навантаженні.

2. Теоретична частина

Віртуальні прилади і обладнання для проведення лабораторної роботи представлені на рис. 16.1:

- трифазне джерело напруги (*Three-Phase Source*);
- однофазне навантаження, що задається значеннями активною і реактивної потужностей *Series RLC Load*;
- вимірювач напруги *Voltage Measurement*;
- вимірювач струму *Current Measurement*;
- блок вимірювання трифазної напруги і струмів (*Three-Phase V-I Measurement*);
- блок вимірювання активної та реактивної потужності *Power*;
- блок цифрового реєструючого пристрою *Display*;
- блок графічного інтерфейсу користувача *powergui*;
- блок розділення сигналів *Demux* з бібліотеки *Simulink / Commonly Used Blocks*;
- блок об'єднання сигналів *Mux* з бібліотеки *Simulink / Commonly Used Blocks*;
- блок заземлення *Ground*.

Вікно налагодження параметрів трифазного джерела живлення показано на рис. 16.2. У полях вікна задаються діюче значення лінійної напруги, початкова фаза напруги фази А, частота і внутрішні параметри джерела (опір і індуктивність). Ці параметри задаються викладачем і не змінюються при виконанні всіх пунктів лабораторної роботи. При самостійному вивченні рекомендується зберегти значення параметрів такими, як на рис. 16.2.

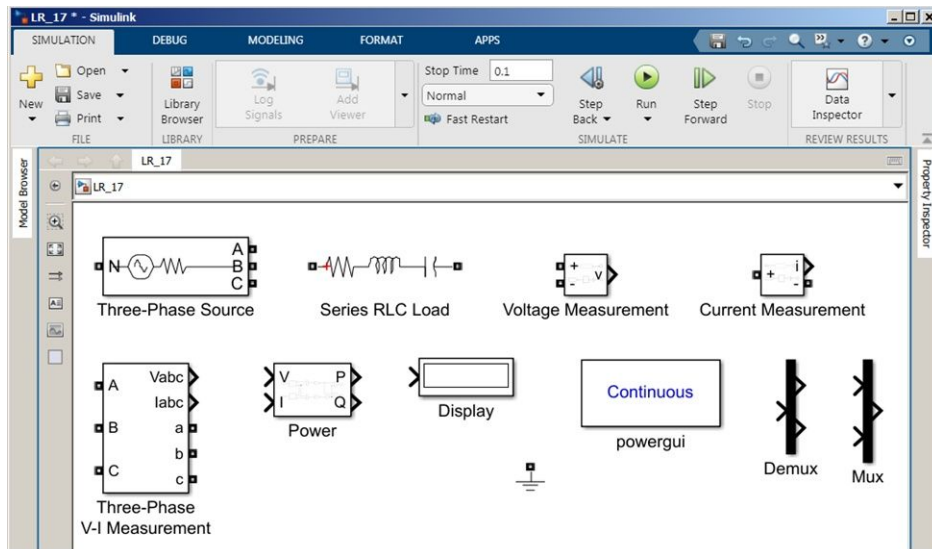


Рисунок 16.1 – Віртуальні блоки для проведення лабораторної роботи

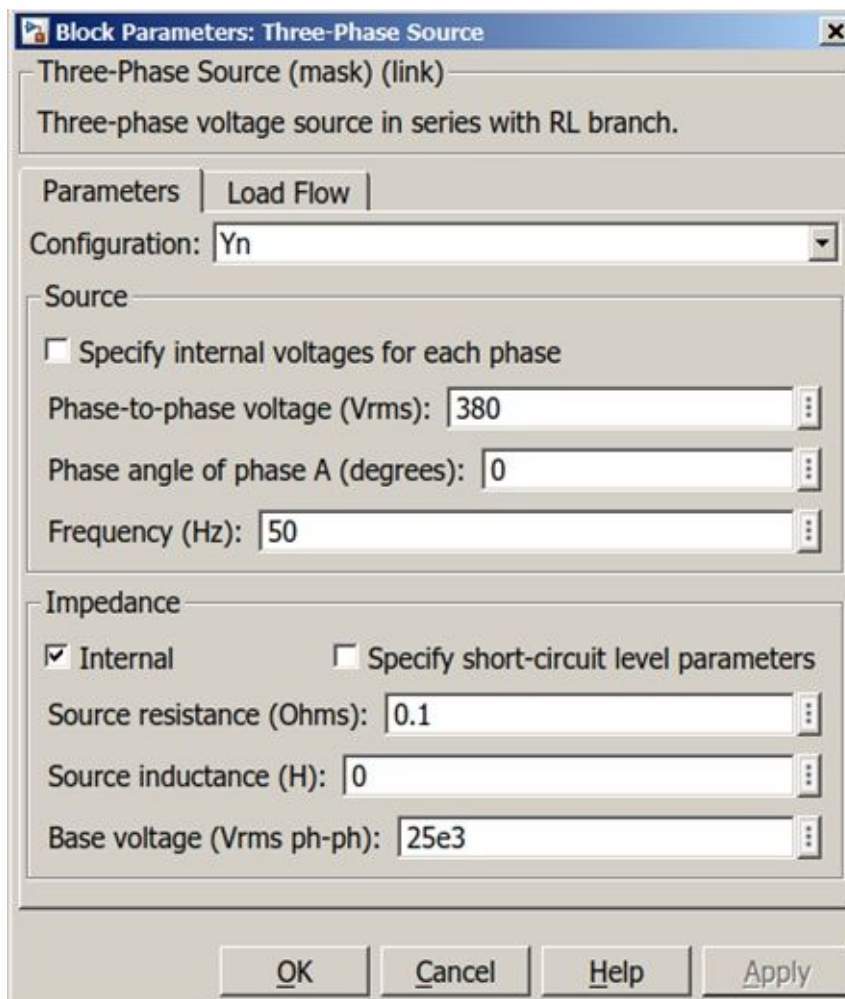


Рисунок 16.2 – Вікно налагодження трифазного джерела живлення

Вікно налагодження параметрів блоку вимірювання показано на рис. 17.3. Як впливає з опису блоку (рис. 17.3), для представлення вимірюваних значень у відносних величинах необхідно включити відповідні прапорці. Найважливішою особливістю застосування даного блоку є те, що виміряні ним

величини спостерігаються в блоці *powergui*, тобто цей блок може для певних завдань замінити блок *Multimeter*.

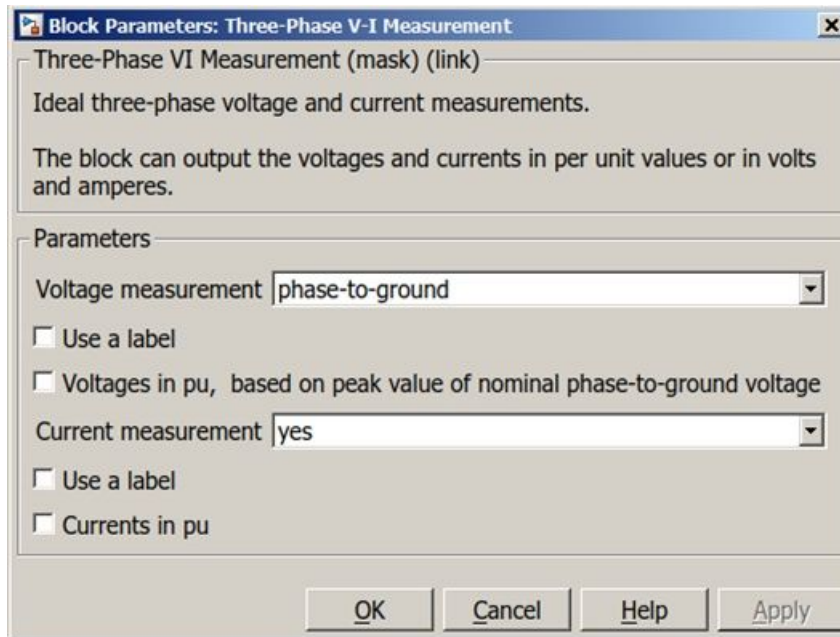


Рисунок 16.3 – Вікно налагодження блоку вимірювання в трифазних колах

Вікно налагодження параметрів навантаження показане на рис. 16.4 тут задаються діюче значення напруги і частота навантаження, які повинні дорівнювати діючому значенню фазної напруги і частоті джерела, активна і реактивні потужності навантаження.

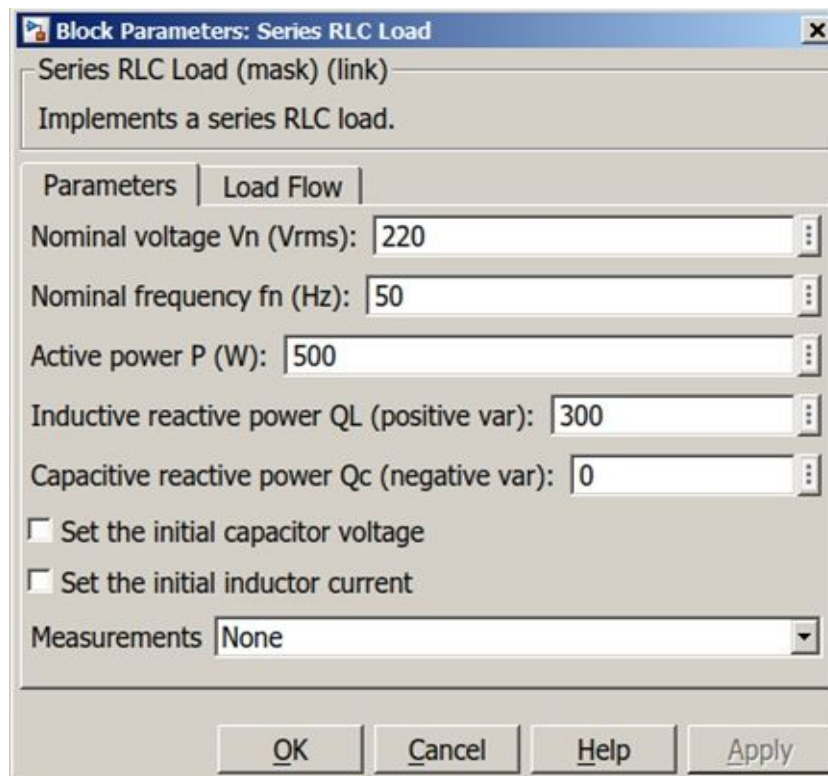


Рисунок 16.4 – Вікно налагодження параметрів навантаження

3. План роботи

1. Вихідні дані для дослідження наведені в табл. 16.1.

Таблиця 16.1 – Вихідні дані

Варіант	U_L , В	φ_U , град	f , Гц	$R_{дж}$, Ом	$L_{дж}$, мГн	P , Вт	Q_L , ВАр	Q_C , ВАр
N	$20 \cdot N$	$10 + N$	$5 + N$	$0,1 \cdot N$	$0,01 \cdot N$	$10 \cdot N - 10$	$15 \cdot N - 15$	$20 \cdot N - 20$

Якщо величина від'ємна, то вона приймається рівною нулю.

2. Модель для проведення дослідів представлена на рис. 16.5. Після проведення моделювання на дисплеї висвічуються значення активних потужностей у фазах A , B , C та значення реактивних потужностей в тих же фазах (рис. 16.5).

3. Значення величин, які виміряні блоком *powergui*, показані на рис. 16.6. Тут крім напруги і струмів у фазах навантаження вимірюються напруга U_0 і струм I_0 . Проведення всіх дослідів здійснюються відповідно до табл. 16.2.

4. Параметри джерела живлення і навантаження задаються викладачем або вибираються рівними або близькими значенням, показаним у вікнах (рис. 16.2 і 16.4) при самостійному вивченні. При нерівномірному навантаженні у фазі A потужності встановлюються в 1,2-1,8 разів більше, ніж при рівномірному навантаженні.

5. При проведенні вимірювань без нульового проводу необхідно від'єднувати від "землі" (*ground*) нейтральну точку (N) джерела живлення.

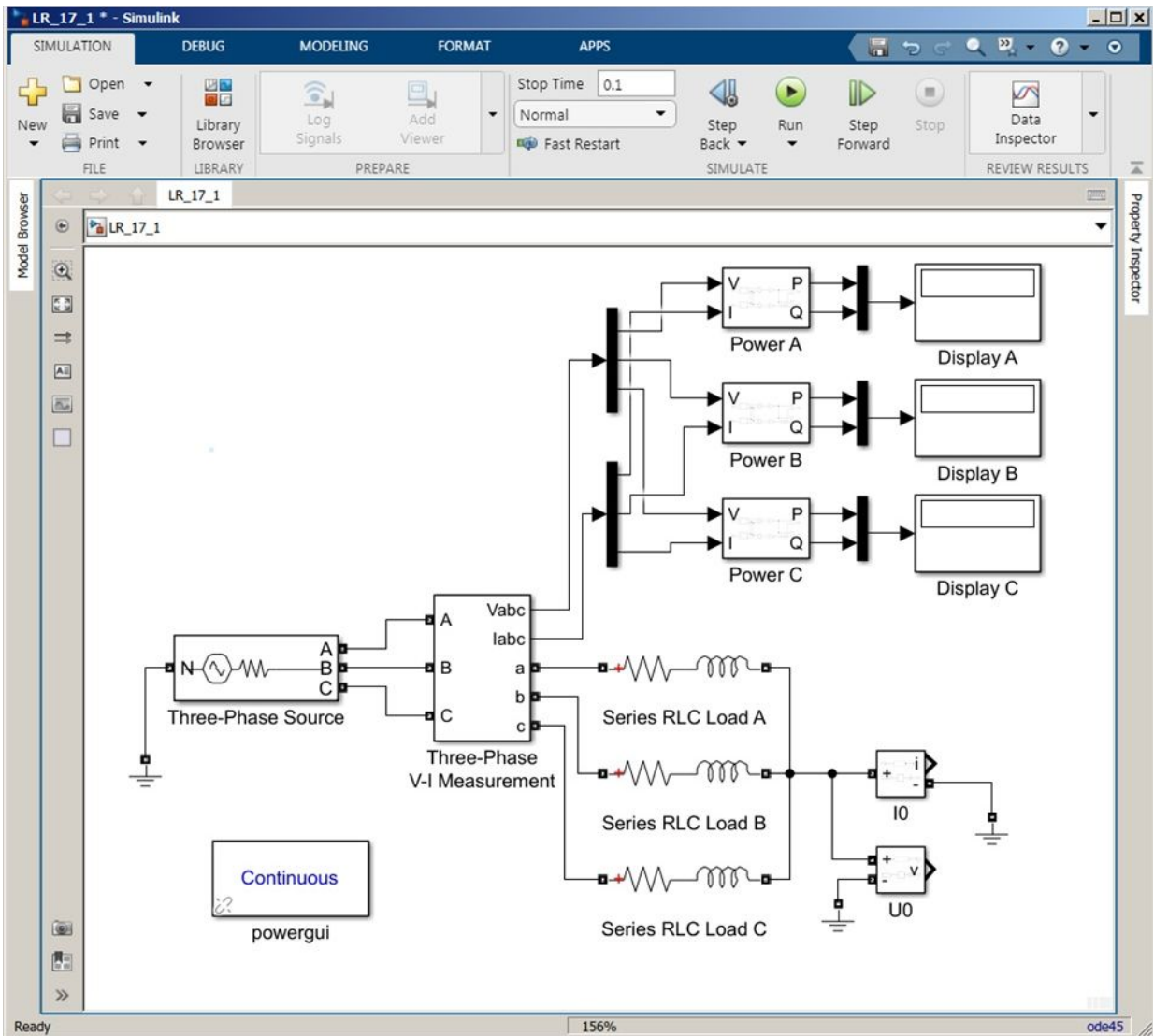


Рисунок 16.5 – Модель дослідження трифазного кола при з'єднанні зірка-зірка

Measurements and States Analyzer.

Model: LR_16_2 Update

Steady-State Initial States

Format: 112.3 (best of)

Units: Peak values

Frequency (Hz): 50

Display: States Measurements

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U A	Three-Phase V-I Measurement	309.9 V	0.04 °
2	U B	Three-Phase V-I Measurement	309.9 V	-119.96 °
3	U C	Three-Phase V-I Measurement	309.9 V	120.04 °
4	U	U0	0 V	0.00 °
5	I	I0	1.11e-15 A	-53.13 °
6	I A	Three-Phase V-I Measurement	3.734 A	-30.93 °
7	I B	Three-Phase V-I Measurement	3.734 A	-150.93 °
8	I C	Three-Phase V-I Measurement	3.734 A	89.07 °

Рисунок 16.6 – Вікно блоку *powergui*

6. У табл. 16.3. записуються початкові фази всіх вимірюваних блоком Powergui початкових фаз для побудови векторних діаграм.

Таблиця 16.2 – Результати вимірювання напруг, струмів та потужностей

Режим роботи	Результати вимірювань													
	$U_0,$ В	$I_0,$ А	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$Q_A,$ ВАр	$Q_B,$ ВАр	$Q_C,$ ВАр
1. Рівномірне навантаження:	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
а) з нульовим проводом;														
б) без нульового проводу.														
2. Нерівномірне навантаження:	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
а) з нульовим проводом;														
б) без нульового проводу.														
3. Обрив лінійного проводу:	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
а) з нульовим проводом;														
б) без нульового проводу.														
4. КЗ фази без нульового проводу.														

Таблиця 16.3 – Результати вимірювання початкових фаз напруг і струмів

Режим роботи	Результати вимірювань								
	$\varphi_{U0},$ град	$\varphi_{I0},$ град	$\varphi_{UA},$ град	$\varphi_{UB},$ град	$\varphi_{UC},$ град	$\varphi_{IA},$ град	$\varphi_{IB},$ град	$\varphi_{IC},$ град	
1. Рівномірне навантаження:	***	***	***	***	***	***	***	***	
а) з нульовим проводом;									
б) без нульового проводу.									

Режим роботи	Результати вимірювань							
	φ_{U0} , град	φ_{U0} , град	φ_{UA} , град	φ_{UB} , град	φ_{UC} , град	φ_{IA} , град	φ_{IB} , град	φ_{IC} , град
2. Нерівномірне навантаження:	***	***	***	***	***	***	***	***
а) з нульовим проводом;								
б) без нульового проводу								
3. Обрив лінійного проводу:	***	***	***	***	***	***	***	***
а) з нульовим проводом;								
б) без нульового проводу.								
4. КЗ фази без нульового проводу.								

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиці.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

- 1 Дослідження трифазного кола при з'єднанні навантаження за схемою "зірка" з нейтральним .
2. Дослідження трифазного кола при з'єднанні навантаження за схемою "зірка" без нейтрального .
3. Чим була викликана необхідність розробки трифазних кіл і чому вони набули широкого практичного застосування?
4. Які способи зображення симетричної системи ЕРС трифазного генератора?
5. Укажіть співвідношення між фазними та лінійними напругами.

6. У чому перевага чотирипровідного трифазного кола?
7. Яка роль нейтрального проводу? Чому в нейтральний провід не включають запобіжники?
8. Що таке напруга зміщення нейтралі? Як її визначають?
9. У яких випадках застосовують трипровідні кола?
10. Укажіть співвідношення між фазними та лінійними струмами.
- 11 Як вибрати схему включення приймача в трифазну мережу?
12. Як виражається активна, реактивна та повна потужності трифазних приймачів (симетричних і несиметричних)?

17 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ З'ЄДНАННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТРИКУТНИКОМ

1. Мета роботи

Перевірка основних співвідношень в трифазній системі при сполученні приймачів трикутником при рівномірному і нерівномірному навантаженні.

2. Теоретична частина

Віртуальні прилади і обладнання для проведення лабораторної роботи представлені на рис. 17.1:

- трифазне джерело напруги (*Three-Phase Source*);
- однофазне навантаження, що задається значеннями активною і реактивної потужностей *Series RLC Load*;
- вимірювач напруги *Voltage Measurement*;
- вимірювач струму *Current Measurement*;
- блок вимірювання трифазної напруги і струмів (*Three-Phase V-I Measurement*);
- блок вимірювання активної та реактивної потужності *Power*;
- блок цифрового реєструючого пристрою *Display*;
- блок графічного інтерфейсу користувача *powergui*;
- блок розділення сигналів *Demux* з бібліотеки *Simulink / Commonly Used Blocks*;
- блок об'єднання сигналів *Mux* з бібліотеки *Simulink / Commonly Used Blocks*;
- блок заземлення *Ground*.

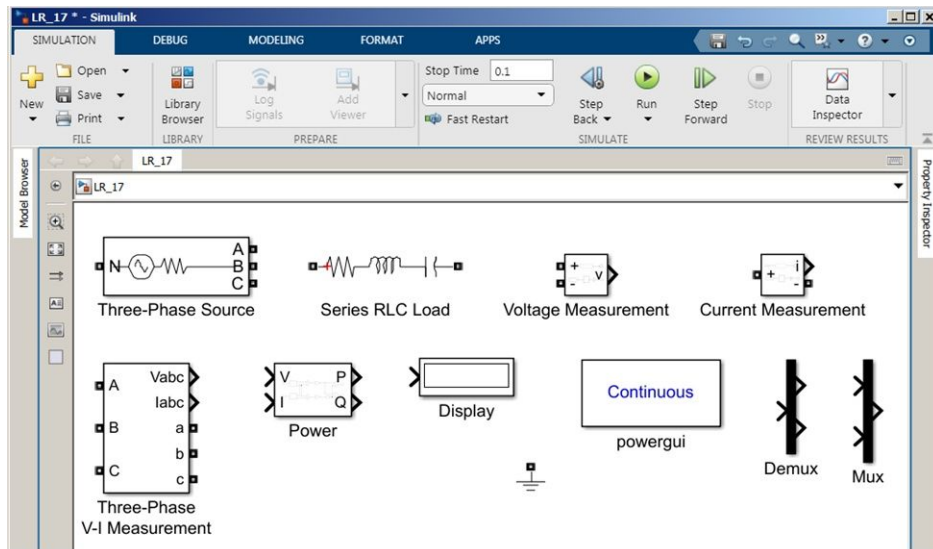


Рисунок 17.1 – Віртуальні блоки для проведення лабораторної роботи

Вікно налагодження параметрів трифазного джерела живлення показано на рис. 17.2. У полях вікна задаються діюче значення лінійної напруги, початкова фаза напруги фази A, частота і внутрішні параметри джерела (опір і індуктивність). Ці параметри задаються викладачем і не змінюються при виконанні всіх пунктів лабораторної роботи. При самостійному вивченні рекомендується зберегти значення параметрів такими, як на рис. 17.2.

Вікно налагодження параметрів блоку вимірювання показано на рис. 17.3. Як випливає з опису блоку (рис. 17.3), для представлення вимірюваних значень у відносних величинах необхідно включити відповідні прапорці. Найважливішою особливістю застосування даного блоку є те, що виміряні ним величини спостерігаються в блоці **Powergui**, тобто цей блок може для певних завдань замінити блок **Multimeter**.

Вікно налагодження параметрів навантаження показано на рис. 17.4. тут задаються діюче значення напруги і частота навантаження, які повинні дорівнювати діючому значенню напруги і частоті джерела, активна і реактивні потужності навантаження. В першому полі необхідно ввести значення напруги, яка прикладена до навантаження. Тут, як видно з рис. 17.4, введено значення лінійної напруги джерела живлення.

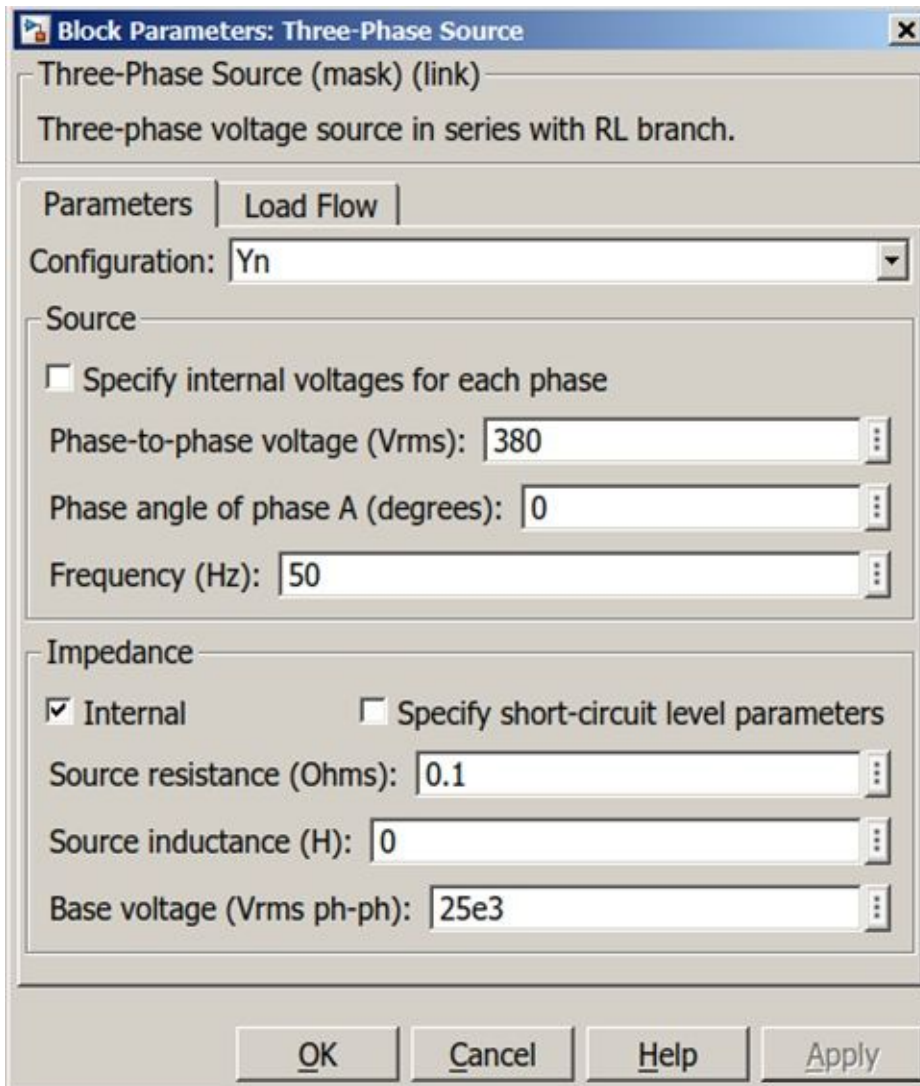


Рисунок 17.2 – Вікно налагодження трифазного джерела живлення

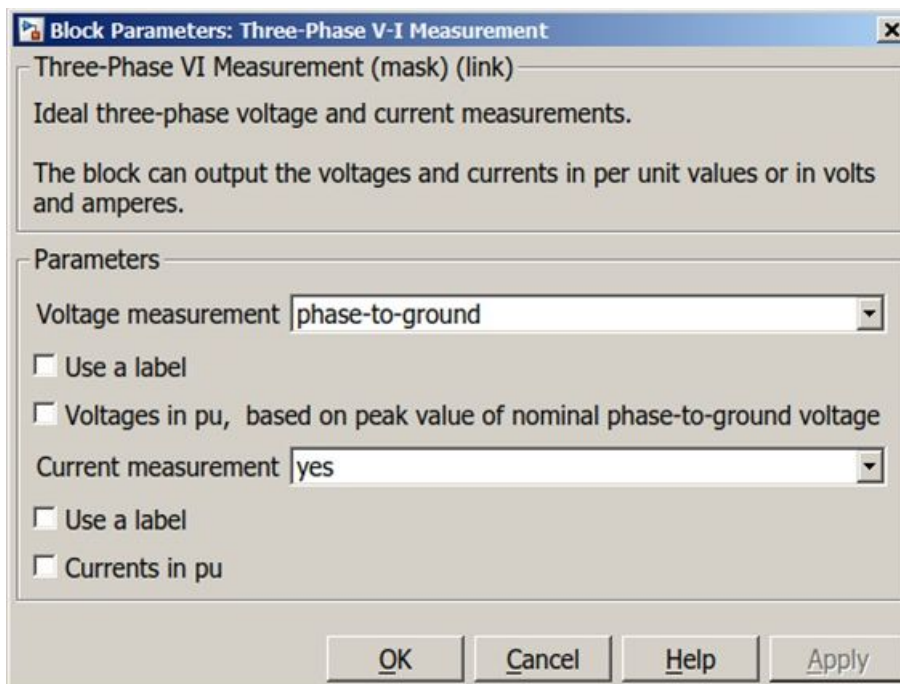


Рисунок 17.3 – Вікно налагодження блоку вимірювання в трифазних колах

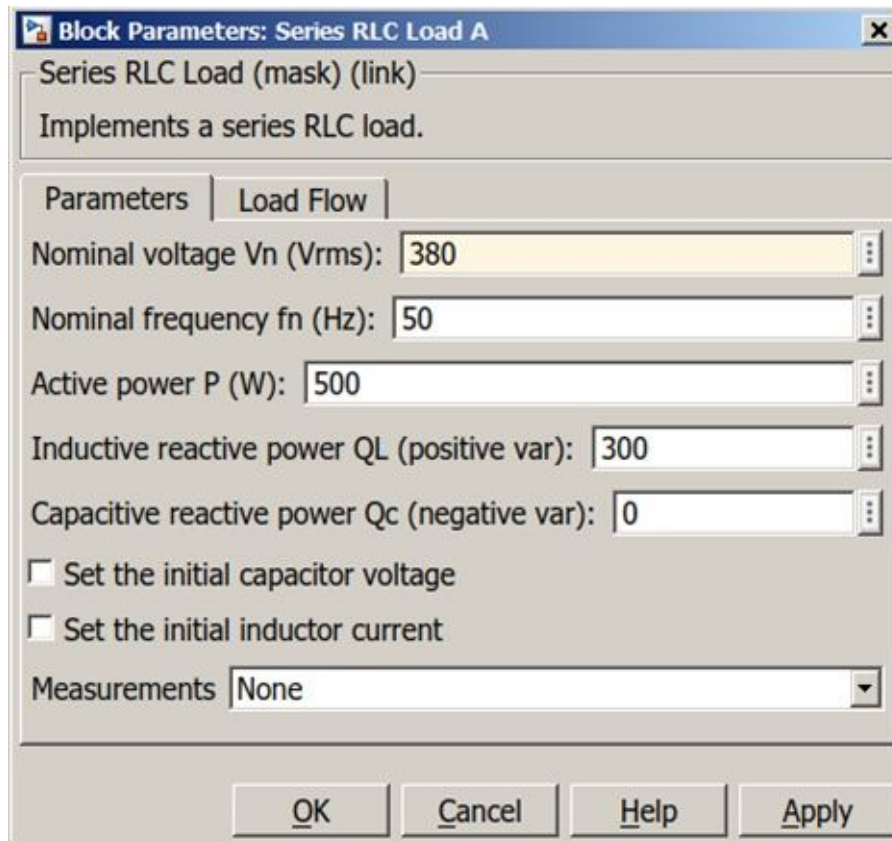


Рисунок 17.4 – Вікно налагодження параметрів навантаження

3. План роботи

1. Вихідні дані для дослідження наведені в табл. 17.1.

Таблиця 17.1 – Вихідні дані

Варіант	U_L , В	φ_U , град	f , Гц	$R_{дж}$, Ом	$L_{дж}$, мГн	P , Вт	Q_L , ВАр	Q_C , ВАр
N	$2 \cdot N$	$1 + N$	$2 + N$	$0,1 \cdot N$	$0,01 \cdot N$	$10 \cdot N - 10$	$15 \cdot N - 15$	$20 \cdot N - 20$

Якщо величина від'ємна, то вона приймається рівною нулю.

1. Випробування трифазного кола здійснюється на моделі, яка показана на рис. 17.5. Тут навантаження з'єднане за схемі "трикутник" із включеними блоками вимірювання фазних струмів (I_{AB} , I_{BC} , I_{CA}) для блоку *powergui*.

2. Активні реактивні потужності у фазах навантаження висвічуються на екрані дисплея після проведення моделювання (рис. 17.5). Фазна напруга і струми, а також лінійні струми визначаються з допомогою блок *Powergui*, вікно якого показане на рис. 17.6. Проведення всіх дослідів здійснюється у відповідності з табл. 17.2. Параметри джерела живлення і навантаження задаються викладачем або вибираються рівними або близькими показаним у вікні (рис. 17.4) значенням при самостійному вивченні. При нерівномірному

навантаженні у фазі А потужності встановлюються в 1,2-1,8 разу більші, ніж при рівномірному навантаженні. У табл. 17.3 записуються початкові фази всіх вимірюваних блоком *Powergui* початкових фаз струмів і напруг для побудови векторних діаграм.

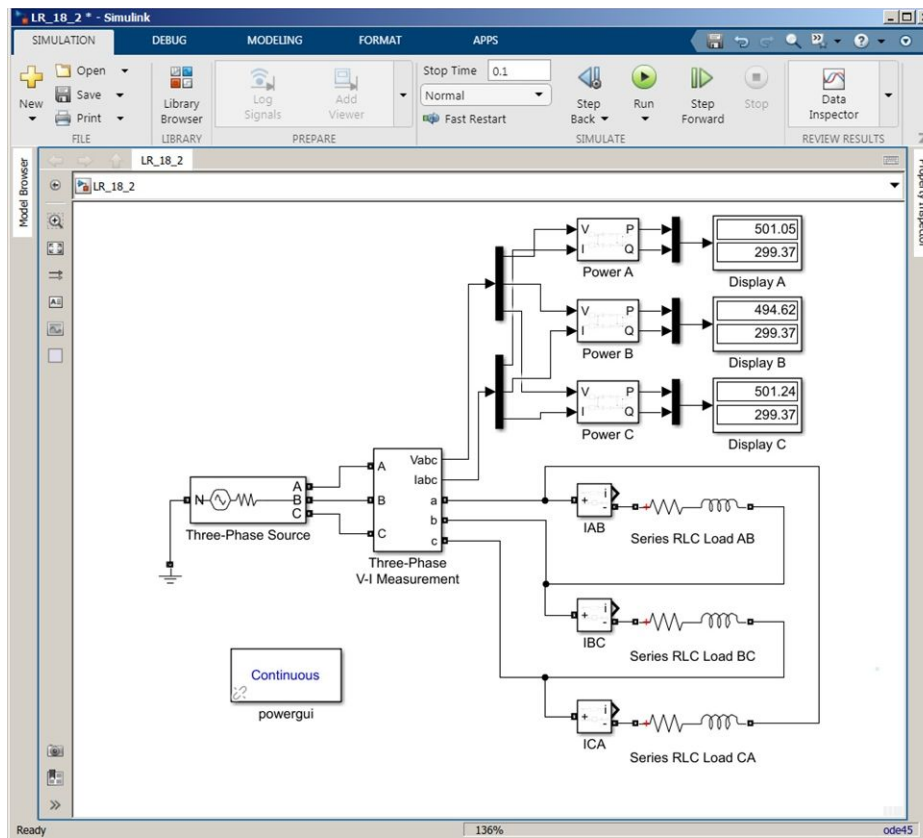


Рисунок 17.5 – Модель для дослідження трифазного кола при з'єднанні за схемою "зірка-трикутник"

Measurements and States Analyzer.

Model: LR_18_2

Steady-State Initial States

Format: 112.3 (best of)

Units: RMS values

Frequency (Hz): 50

Display: States Measurements Sources Nonlinear elements

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U A	Three-Phase V-I Measurement	219.2 Vrms	0.04 °
2	U B	Three-Phase V-I Measurement	219.2 Vrms	-119.96 °
3	U C	Three-Phase V-I Measurement	219.2 Vrms	120.04 °
4	I	IAB	1.533 Arms	-0.93 °
5	I	IBC	1.533 Arms	-120.93 °
6	I	ICA	1.533 Arms	119.07 °
7	I A	Three-Phase V-I Measurement	2.655 Arms	-30.93 °
8	I B	Three-Phase V-I Measurement	2.655 Arms	-150.93 °
9	I C	Three-Phase V-I Measurement	2.655 Arms	89.07 °

Рисунок 17.6 – Вікно блоку *powergui*

Таблиця 17.2 – Результати вимірювання напруг, струмів та потужностей

Режим роботи	Результати вимірювань														
	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$Q_A,$ ВАр	$Q_B,$ ВАр	$Q_C,$ ВАр
1. Рівномірне навантаження															
2. Нерівномірне навантаження															
3. Обрив лінійного проводу	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
а) рівномірне навантаження															
б) нерівномірне навантаження															
4. Обрив одного фазного проводу															
5. Обрив двох фазних проводів															

Таблиця 17.3 – Результати вимірювання початкових фаз напруг і струмів

Режим роботи	Результати вимірювань									
	$\varphi_{UA},$ град	$\varphi_{UB},$ град	$\varphi_{UC},$ град	$\varphi_{IA},$ град	$\varphi_{IB},$ град	$\varphi_{IC},$ град	$\varphi_{Iab},$ град	$\varphi_{Ibc},$ град	$\varphi_{Ica},$ град	
1. Рівномірне навантаження										
2. Нерівномірне навантаження										
3. Обрив лінійного проводу	***	***	***	***	***	***	***	***	***	
а) рівномірне навантаження										
б) нерівномірне навантаження										
4. Обрив одного фазного проводу										
5. Обрив двох фазних проводів										

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.

4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1 Дослідження трифазного кола при з'єднанні навантаження за схемою "трикутник".

2. Укажіть співвідношення між фазними та лінійними напругами.

3. Як визначають фазні та лінійні струми при з'єднанні приймачів трикутником?

4. Як виражається активна, реактивна та повна потужності трифазних приймачів з'єднаних трикутником?

5. Яке з'єднання фаз трифазного кола називається з'єднанням трикутником?

6. Які переваги та недоліки з'єднання трикутником?

7. Вкажіть умови симетрії трифазного споживача енергії.

8. Поясніть будову векторної діаграми напруг і струмів для несиметричного навантаження.

9. Написати комплекси фазних опорів і чисельно визначити силу лінійних і фазних струмів для випадку з'єднання навантаження трикутником, $U_{\Phi} = 220 \text{ В}$:

у фазі а - активне навантаження;

у фазі в - індуктивне навантаження;

у фазі с - ємнісне навантаження.

Прийняти модулі всіх фазних опорів рівними 4 Ом кожний.

18 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ КОМПЛЕКСНИМ МЕТОДОМ

1. Мета роботи

Вивчення та практичне застосування методів розрахунку та математичного моделювання електричних кіл трифазного синусоїдального струму середовищі *Matlab/Simulink*.

2. Теоретична частина

Вивчіть рекомендації щодо розробки та дослідження математичних моделей електричних кіл у середовищі *Matlab/Simulink* (див. Додаток А).

3. План роботи

1. Три електроприймачі, опори яких $R_a = 13,4$ Ом; $X_a = 9,6$ Ом; $R_b = 8,5$ Ом; $X_b = 15,7$ Ом; $R_c = 7,2$ Ом; $X_c = -14,8$ Ом з'єднані зіркою і включені в трифазну мережу з фазною напругою $U_\phi = 220$ В. Відбувся обрив нейтрального дроту (рис. 18.1). Розрахувати напругу зміщення нейтралі, фазні напруги, струми та потужності.

2. Введіть вихідні дані прикладу.

2.1. Відкрийте *MatLab* і введіть у *Script (Live Script)* (скрипт) чи *Command Windows* (вікно команд) вихідні дані прикладу:

$$U_A = 220; U_B = 220 * \exp(-j * 2 * \pi / 3); U_C = 220 * \exp(j * 2 * \pi / 3);$$

$$Z_a = 13.4 + j * 9.6; Z_b = 8.5 + j * 15.7; Z_c = 7.2 - j * 14.8;$$

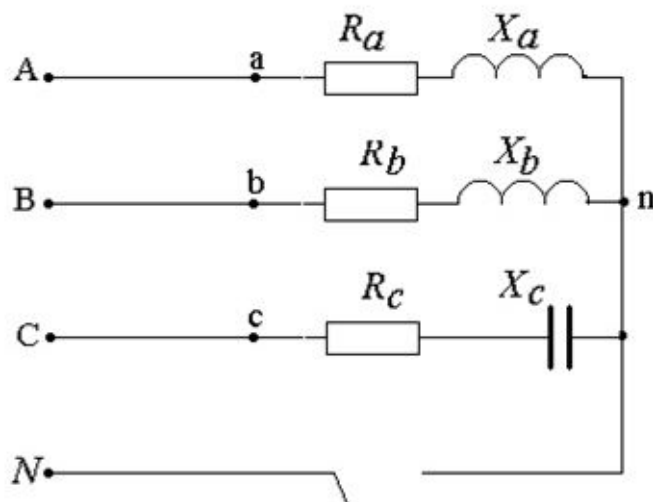


Рисунок 18.1 – Схема електричного кола (приклад)

Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму розрахунку комплексів повних провідностей фаз та комплексу напруги усунення нейтралі

$$Y_a=1/Z_a; Y_b=1/Z_b; Y_c=1/Z_c; UnN=(U_A*Y_a+U_B*Y_b+U_C*Y_c)/(Y_a+Y_b+Y_c);$$

Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму розрахунку комплексів фазних напруг електроприймача та комплексів фазних струмів

$$U_a=U_A-UnN; U_b = U_B-UnN; U_c=U_C-UnN; I_a = U_a / Z_a; I_b = U_b / Z_b; I_c=U_c/Z_c;$$

Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму розрахунку комплексів повної потужності фаз та комплексу повної потужності всього кола

$$S_a = U_a * conj(I_a); S_b = U_b * conj(I_b); S_c = U_c * conj(I_c); S = S_a + S_b + S_c;$$

Введіть у вікно **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) програму виведення результатів розрахунку дійсної, уявної частин, модуля та аргументу комплексів напруги усунення нейтралі та комплексів фазних напруг (рядки 1-4), комплексів фазних струмів (рядки 5-7), активної та реактивної потужності, модуля та аргументу повної потужності фаз і всього кола (рядки 8-11)

format bank;

$$ans=[real(UnN) imag(UnN) abs(UnN) angle(UnN)*180/pi;$$

$$real(U_a) imag(U_a) abs(U_a) angle(U_a)*180/pi;$$

$$real(U_b) imag(U_b) abs(U_b) angle(U_b)*180/pi;$$

$$real(U_c) imag(U_c) abs(U_c) angle(U_c)*180/pi;$$

$$real(I_a) imag(I_a) abs(I_a) angle(I_a)*180/pi;$$

$$real(I_b) imag(I_b) abs(I_b) angle(I_b)*180/pi;$$

$$real(I_c) imag(I_c) abs(I_c) angle(I_c)*180/pi;$$

$$real(S_a) imag(S_a) abs(S_a) angle(S_a)*180/pi;$$

$$real(S_b) imag(S_b) abs(S_b) angle(S_b)*180/pi;$$

$$real(S_c) imag(S_c) abs(S_c) angle(S_c)*180/pi;$$

$real(S) imag(S) abs(S) angle(S)*180/pi]$

та натисніть Enter.

ans =

-110.99 -114.13 159.20 -134.20

330.99 114.13 350.12 19.02

0.99 -76.40 76.40 -89.25

0.99 304.66 304.66 89.81

20.36-6.07 21.24-16.59

-3.74 -2.09 4.28 -150.82

-16.62 8.15 18.51 153.87

6045.24 4330.92 7436.51 35.62

155.67 287.52 326.96 61.57

2467.05-5071.16 5639.42-64.06

8667.95 -452.72 8679.77 -2.99

2.2. Порівняйте результати розрахунку з результатами розрахунку прикладу та переконайтеся у правильності введеної Вами програми розрахунку.

2.3. Скопіюйте введену та перевірену Вами програму розрахунку та вставте її у те саме вікно команд, змініть вихідні дані завдання відповідно до варіанта (табл. 18.1) та повторіть розрахунок.

2.4. Перепишіть вихідні дані варіанта (табл. 18.1) та результати розрахунку на бланк, побудуйте векторну діаграму напруги та струмів (рис. 18.2).

Таблиця 18.1 – Вихідні дані $w=31-N$

Варіант	Z_a		Z_b		Z_c	
	$R_a, \text{ Ом}$	$X_a, \text{ Ом}$	$R_b, \text{ Ом}$	$X_b, \text{ Ом}$	$R_c, \text{ Ом}$	$X_c, \text{ Ом}$
приклад	13,4	9,6	8,5	15,7	7,2	-14,8
N	$2+N$	$15-N$	$3+N$	$20-N$	$4+N$	$22-N$

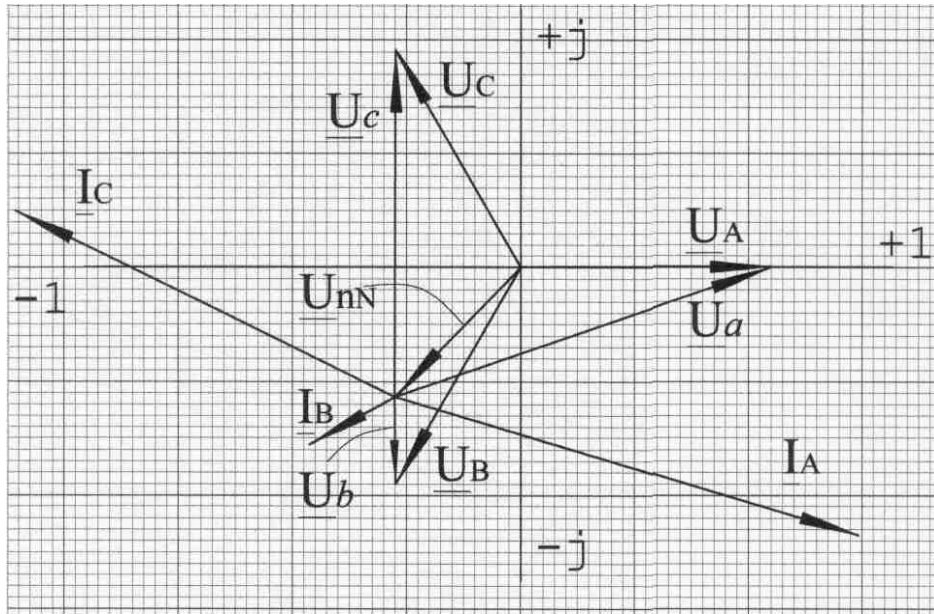


Рисунок 18.2 – Векторна діаграма напруги та струмів (приклад)

3. В *SIMULINK* складіть схему моделі електричного кола (рис. 18.3).

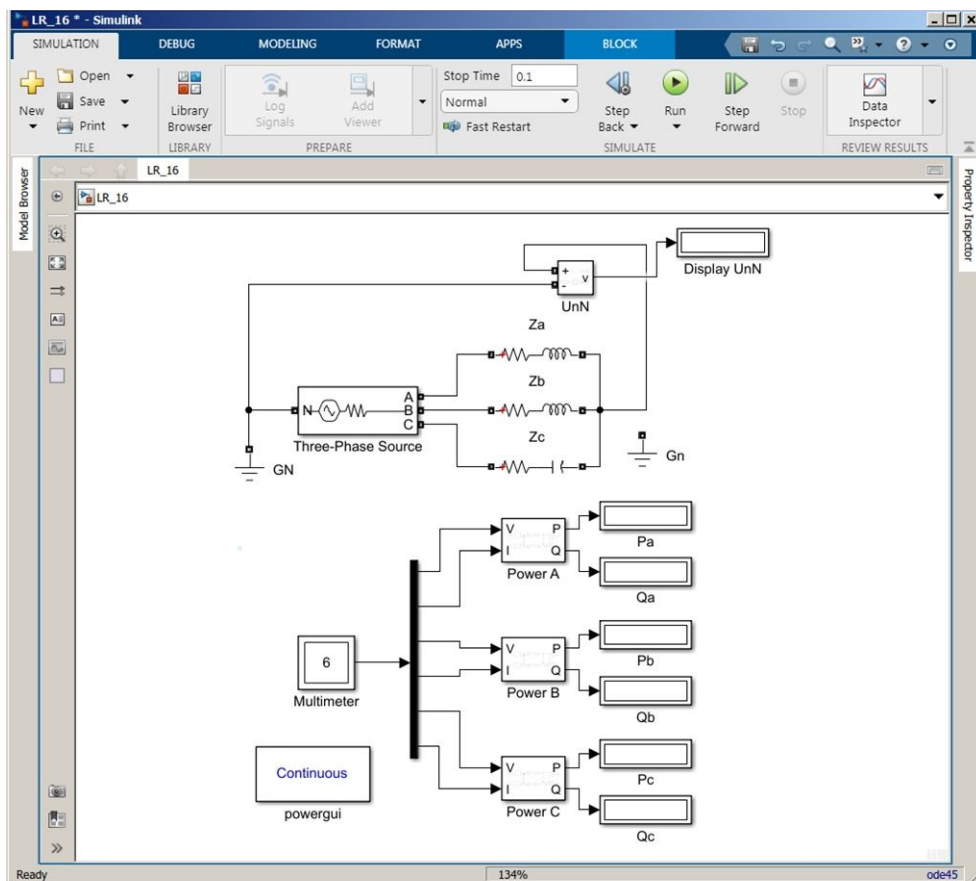


Рисунок 18.3 – Схема моделі електричного кола (приклад)

3.1. Модель трифазної трипровідної мережі з обірваним нейтральним дротом містить:

- трифазне джерело електричної енергії *Three-Phase Source* з бібліотеки

Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources;

- три блоки *Za, Zb, Zc Series RLC Branch* з бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives;*

- заземлювачі нейтралі джерела *GN* та нейтралі приймача *Gn Ground* з бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities;*

- вимірювач напруги зміщення нейтралі *UnN Voltage Measurement* з бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements;*

- блок графічного інтерфейсу користувача *powergui* з бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems;*

- блок універсального вимірювача *Multimeter* з бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements;*

- три блоки вимірювання активної та реактивної потужності *Power* із бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements;*

- три блоки цифрових реєструючих пристроїв *Pa, Qa, Pb, Qb, Pc, Qc Display* з бібліотеки *Simulink / Sinks;*

- блок розділення сигналів *Demux* з бібліотеки *Simulink / Commonly Used Blocks.*

3.2. Відкрийте таблицю параметрів трифазного джерела електричної енергії *Three-Phase Source*, задайте параметр *Configuration* – *Yn* лінійну напругу – 380, початкову фазу фази А – 0, частоту – 50, активний опір – 0.001 індуктивність – 0.

Відкрийте таблицю параметрів *Series RLC Branch Za*, задайте активний опір R_a , індуктивність L_a та ємність C_a відповідно до прикладу, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and current*. Якщо активний опір R_a відсутній задайте $R_a = 0.01$, якщо реактивний опір $X_a > 0$ – задайте $L_a = X_a / (2 * \pi * f)$, якщо реактивний опір $X_a < 0$ – задайте $C_a = 1 / (2 * \pi * f * X_a)$.

Внесіть аналогічні виправлення до параметрів блоків *Zb, Zc*.

3.3. Вимкніть заземлення нейтралі приймача.

3.4. Відкрийте таблицю параметрів *Multimeter* і виведіть у вихідне вікно миттєві значення фазних напруг і струмів в такій послідовності *Ub:Za*, *Ib:Za*, *Ub:Zb*, *Ib:Zb*, *Ub:Zc*, *Ib:Zc* (рис. 18.4).

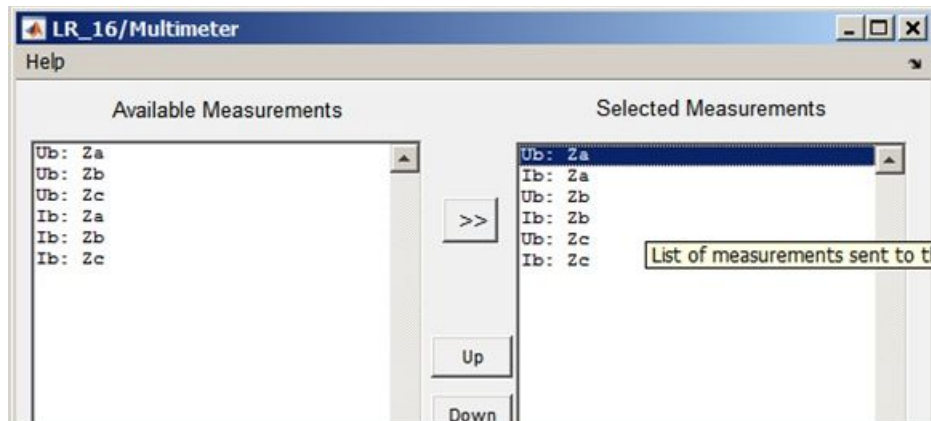


Рисунок 18.4 – Параметри блоку Multimeter

3.5. Відкрийте таблицю параметрів цифрових вимірювачів та задайте формат *bank*.

3.6. Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть *Simulation time – Stop time* (час моделювання) **0.1**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode 15s* та запустіть моделювання.

3.7. Відкрийте вікно параметрів *powergui*, виберіть *Tools* режим вимірювань *Measurements and States Analyzer*, встановіть вимірювання напруги та струмів *RMS Values*, *Frequency – 50* (рис. 18.5). Запишіть результати вимірювань комплексів напруг та струмів.

#	Type	Block	Value	Angle
MEASUREMENTS:				
1	U	UnN	158.8 Vrms	-134.20 °
2	Ub	Za	349.1 Vrms	19.03 °
3	Ub	Zb	76.19 Vrms	-89.25 °
4	Ub	Zc	303.8 Vrms	89.81 °
5	Ib	Za	21.18 Arms	-16.59 °
6	Ib	Zb	4.268 Arms	-150.81 °
7	Ib	Zc	18.46 Arms	153.87 °

Рисунок 18.5 – Результати вимірювання модулів та аргументів комплексів напруг та струмів у колах (приклад)

3.8. Змініть параметри блоків *Za*, *Zb*, *Zc* відповідно до варіанта $w=31-N$

повторіть моделювання. Запишіть результати вимірювань.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Векторні діаграми. Результати вимірювання.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Розрахунок електричних кіл трифазного синусоїдного струму комплексним методом у середовищі MATLAB.
2. Визначення комплексних повних провідностей.
3. Визначення комплексної напруги зміщення нейтралі.
4. Визначення комплексних фазних напруг і фазних струмів
5. Визначення комплексних повних потужностей фаз і усього кола.
6. Побудова векторної діаграми кола.
7. Моделювання електричних кіл синусоїдального струму в середовищі MATLAB/Simulink.

19 ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ НАПРУГ

1. Мета роботи

Дослідити електричні кола, які виконують функції фільтрів симетричних складових прямої, зворотної і нульової послідовностей трифазних несиметричних систем напруг.

2. Теоретична частина

Метод симетричних складових ґрунтується на поданні будь-якої трифазної несиметричної системи фізичних величин (ЕРС, напруг, струмів тощо) у вигляді суми трьох симетричних систем, які називають симетричними складовими прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Будемо розглядати трифазні системи, позначаючи комплексні ЕРС, напруги чи струми кожної з фаз відповідно літерами \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} . Величини, що стосуються симетричних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей, будемо індексувати відповідно символами 1, 2, 0.

Симетричну систему **прямої** послідовності утворюють три однакових за модулем вектори \dot{A}_1 , \dot{B}_1 , \dot{C}_1 , зсунуті один відносно одного на кут $\frac{2\pi}{3}$ (або 120°), причому \dot{B}_1 відстає від \dot{A}_1 , а \dot{C}_1 відстає від \dot{B}_1 (рис. 19.1, а).

Симетрична система **зворотної** послідовності утворена однаковими за модулем векторами \dot{A}_2 , \dot{B}_2 , \dot{C}_2 також зсунутими між собою на кут $2\pi/3$, але тепер вектор \dot{C}_2 відстає від \dot{A}_2 , а \dot{B}_2 відстає від \dot{C}_2 (рис. 19.1, б).

Симетрична система **нульової** послідовності складається з трьох векторів \dot{A}_0 , \dot{B}_0 , \dot{C}_0 , однакових за модулем і фазою (рис. 19.1, в).

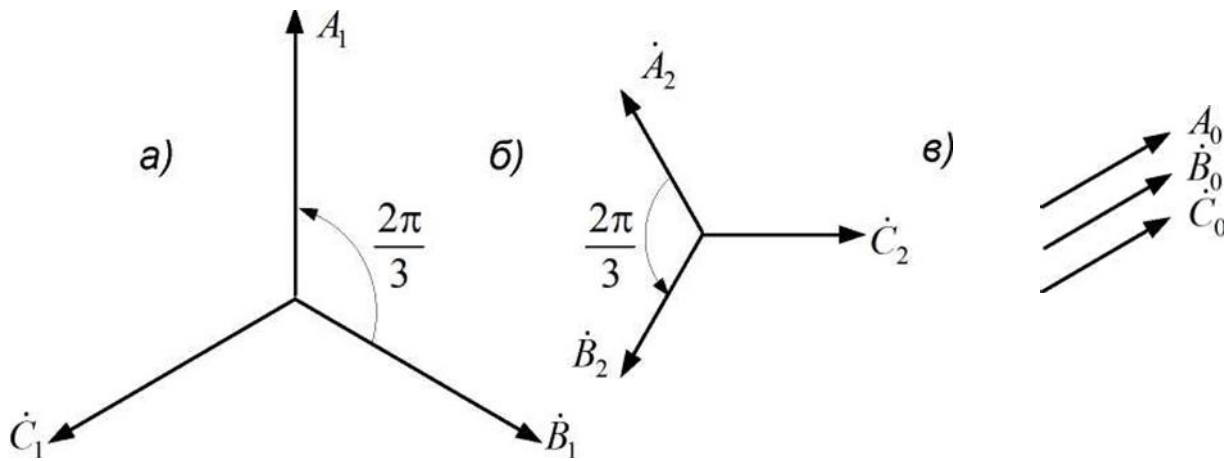


Рисунок 19.1 – Симетричні складові

Користуючись оператором $a = e^{j120^\circ} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ повороту вектора на кут

$\frac{2\pi}{3}$ (120°) у додатному напрямі і приймаючи вектори $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0$ за базові,

виразимо через них всі інші:

$$\dot{B}_1 = a^2 \dot{A}_1, \dot{B}_2 = a \dot{A}_2, \dot{B}_0 = \dot{A}_0, \quad (19.1)$$

$$\dot{C}_1 = a \dot{C}_1, \dot{C}_2 = a^2 \dot{A}_2, \dot{C}_1 = \dot{A}_0. \quad (19.2)$$

де $a^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Додавання трьох показаних вище симетричних систем (див. рис. 19.1) дає несиметричну систему векторів $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ (рис. 19.2). Кожен вектор цієї системи є сумою трьох векторів – відповідних складових прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Доведемо, що будь-яка трифазна несиметрична система векторів однозначно розкладається на симетричні складові, тобто:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0, \\ \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0. \end{aligned} \quad (19.3)$$

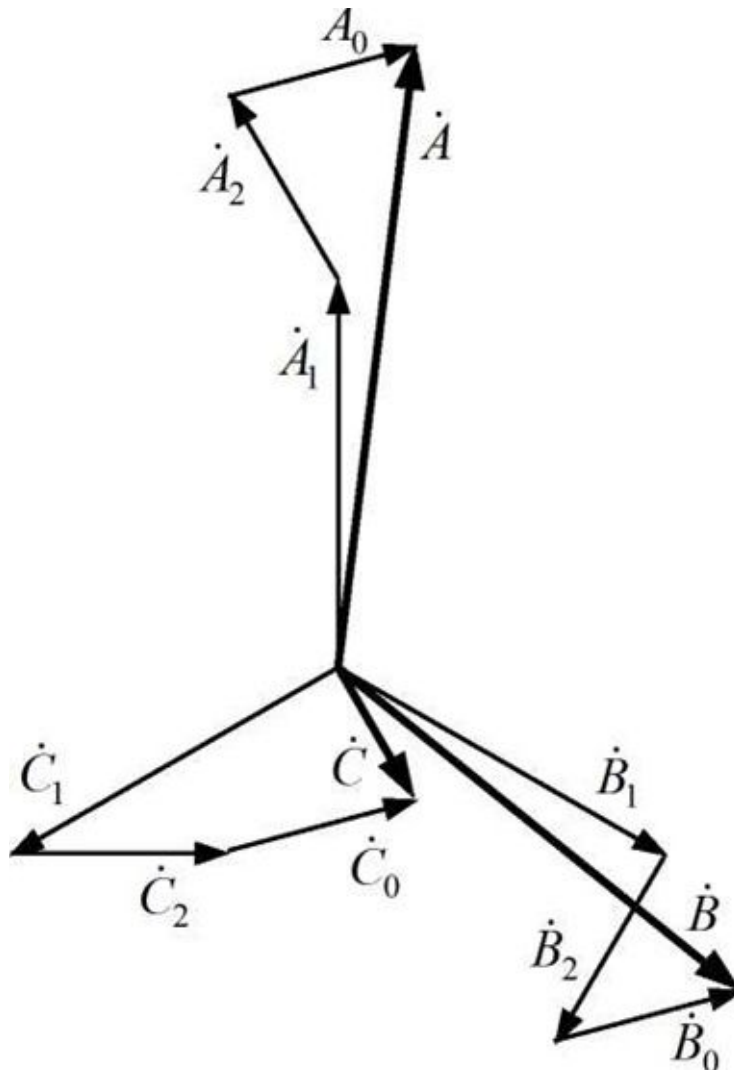


Рисунок 19.2 – Несиметрична система векторів A, B, C

Перепишемо ці рівняння, використовуючи співвідношення (19.1) і (19.2):

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \\ \dot{B} &= a^2 \dot{A}_1 + a \dot{A}_2 + \dot{A}_0, \\ \dot{C} &= a \dot{A}_1 + a^2 \dot{A}_2 + \dot{A}_0. \end{aligned} \quad (19.4)$$

Отримана система трьох рівнянь з трьома невідомими $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0$ розв'язується однозначно. Для визначення \dot{A}_0 знайдемо суму лівих і правих частин рівнянь (19.4). Враховуючи, що $1 + a^2 + a = 0$, отримаємо:

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3} (\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}). \quad (19.5)$$

Для визначення \dot{A}_1 знайдемо суму лівих і правих частин рівнянь (19.4), помноживши спочатку друге рівняння на a і третє – на a^2 . В результаті будемо

мати:

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{3} (\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}). \quad (19.6)$$

Виконаємо аналогічну операцію, помноживши спочатку друге рівняння на a^2 і третє – на a , і знаходимо A_2 :

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{3} (\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}). \quad (19.7)$$

З рівняння (19.5) видно, що коли сума векторів несиметричної системи дорівнює нулю, будуть дорівнювати нулю також і вектори нульової послідовності. Отже, *несиметричні системи лінійних напруг і лінійних струмів у разі відсутності нульового проводу містять лише симетричні складові прямої та зворотної послідовності.*

Визначення симетричних складових за виразами (19.5)...(19.7) може здійснити графічно. Припустимо, що задана несиметрична система векторів фазних напруг чи струмів (рис. 19.3, а). В кожне з рівнянь (19.5)...(19.7) вектор \dot{A} входить без змін, а вектори \dot{B} та \dot{C} в рівняннях (19.6) і (19.7) повернуті на $\pm 120^\circ$. Починаємо побудову, відкладаючи вектори \dot{A} , \dot{B} та \dot{C} у такій послідовності, як показано на рис. 19.3, б. Потім повертаємо на кут $\pm 120^\circ$ вектор \dot{B} навколо його кінця, що прилягає до початку вектора \dot{A} , і вектор \dot{C} навколо його початку, що прилягає до кінця вектора \dot{A} (див. рис. 19.3, б).

Тепер легко знаходяться суми векторів, які містяться всередині дужок кожного з виразів (19.5)...(19.7) і дорівнюють відповідно $3\dot{A}_0$, $3\dot{A}_1$, $3\dot{A}_2$. Далі очевидною побудовою визначаються всі вектори трьох симетричних систем прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Розкладання несиметричної трифазної системи ЕРС на симетричні складові означає еквівалентну заміну ЕРС кожної фази на послідовне з'єднання трьох ЕРС окремих складових. Джерелу несиметричної трифазної системи струмів відповідає паралельне з'єднання трьох джерел окремих симетричних складових у кожній фазі.

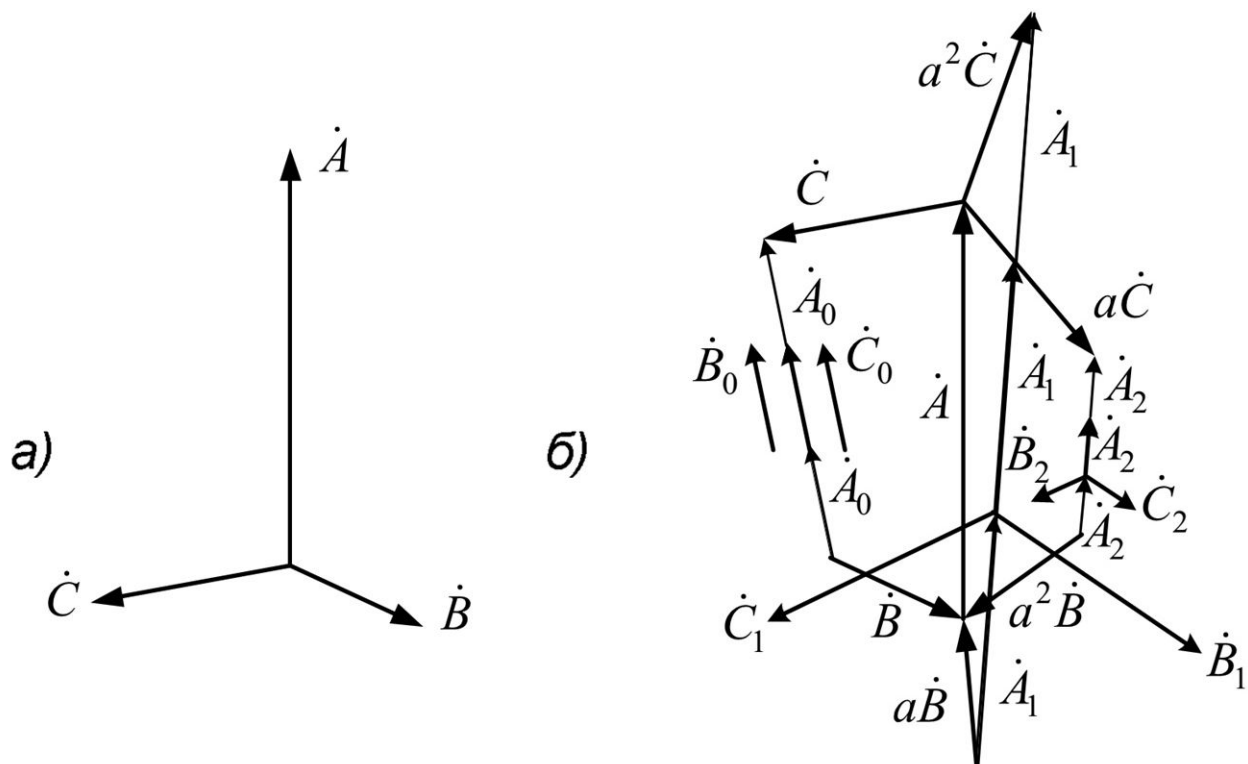


Рисунок 19.3 – Визначення симетричних складових

Симетричні складові струмів та напруг можна не тільки розрахувати, а і виміряти за допомогою спеціальних вимірювальних схем – фільтрів симетричних складових струмів і напруг. Ці фільтри широко застосовуються в системах захисту електроенергетичних мереж.

Фільтром напруги чи струму симетричних складових називають електричне коло, на вхід якого подають досліджувану несиметричну трифазну систему напруг чи струмів, а на виході отримують напругу чи струм однієї певної симетричної складової. Фільтри зазвичай складаються з трансформаторів, активних та реактивних опорів, параметри яких підібрані так, щоб пропускати на вихід лише складові бажаної послідовності і не пропускати інших. Отже, якщо на вхід фільтра будь-якої послідовності подані складові інших послідовностей, то напруга чи струм на виході від цих послідовностей повинні дорівнювати нулю.

Наприклад, напруга на виході фільтра напруги зворотної послідовності дорівнюватиме нулю, якщо на вхід подані напруги прямої чи нульової послідовностей. При подачі ж на вхід фільтра напруги зворотної послідовності на його виході з'явиться напруга, значення якої залежить від параметрів

фільтра і опору навантаження, ввімкненого між вихідними полюсами.

Розглянемо схему фільтра напруги зворотної послідовності, що досліджується в лабораторній роботі (рис. 19.5) і доведемо, що при $R_1 = R_2; R_3 = \sqrt{3}X_C$ напруга на виході кола $\vec{U}_{вих}$ пропорційна симетричній складовій зворотної послідовності \vec{U}_{A2} системи вхідних фазних напруг $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$. Для цього виразимо симетричну складову зворотної послідовності \vec{U}_{A2} через лінійні напруги несиметричної системи:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{A2} &= \frac{1}{3} (\vec{U}_A + a^2\vec{U}_B + a\vec{U}_C) = \frac{1}{3} (\vec{U}_A + a^2\vec{U}_B + a\vec{U}_B - a\vec{U}_B + a\vec{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3} (\vec{U}_A + (a^2 + a)\vec{U}_B - a(\vec{U}_B + \vec{U}_C)) = \frac{1}{3} [\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC}e^{-j60^\circ}].\end{aligned}$$

Визначимо напругу $\vec{U}_{вих}$ на виході кола (рис. 19.5) з урахуванням вказаних вище співвідношень між параметрами елементів кола

$$\begin{aligned}\vec{U}_{вих} &= \frac{1}{2} \vec{U}_{AB} + \frac{\vec{U}_{BC}}{R_3 - jX_C} (-jX_C) = \frac{1}{2} \vec{U}_{AB} + \frac{\vec{U}_{BC}}{1 + j\sqrt{3}} = \\ &= \frac{1}{2} \vec{U}_{AB} + \frac{1}{2} \vec{U}_{BC} e^{-j60^\circ} = \frac{1}{2} [\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} e^{-j60^\circ}].\end{aligned}$$

Отже, $\vec{U}_{вих} = \frac{3}{2} \vec{U}_{A2} = k \vec{U}_{A2}$.

Таким чином, коло на рис. 19.5 виконує функцію фільтра зворотної послідовності системи фазних напруг трифазної системи.

В лабораторній роботі досліджуються різні трифазні системи напруг, яким відповідають векторні діаграми, показані на рис. 19.4, *a...e*.

Ці системи утворюються різними способами з'єднання початків і кінців обмоток *A, B, C* трифазного джерела між вузлами *A, B, C* і *N* (рис. 19.5, 19.6, 19.7).

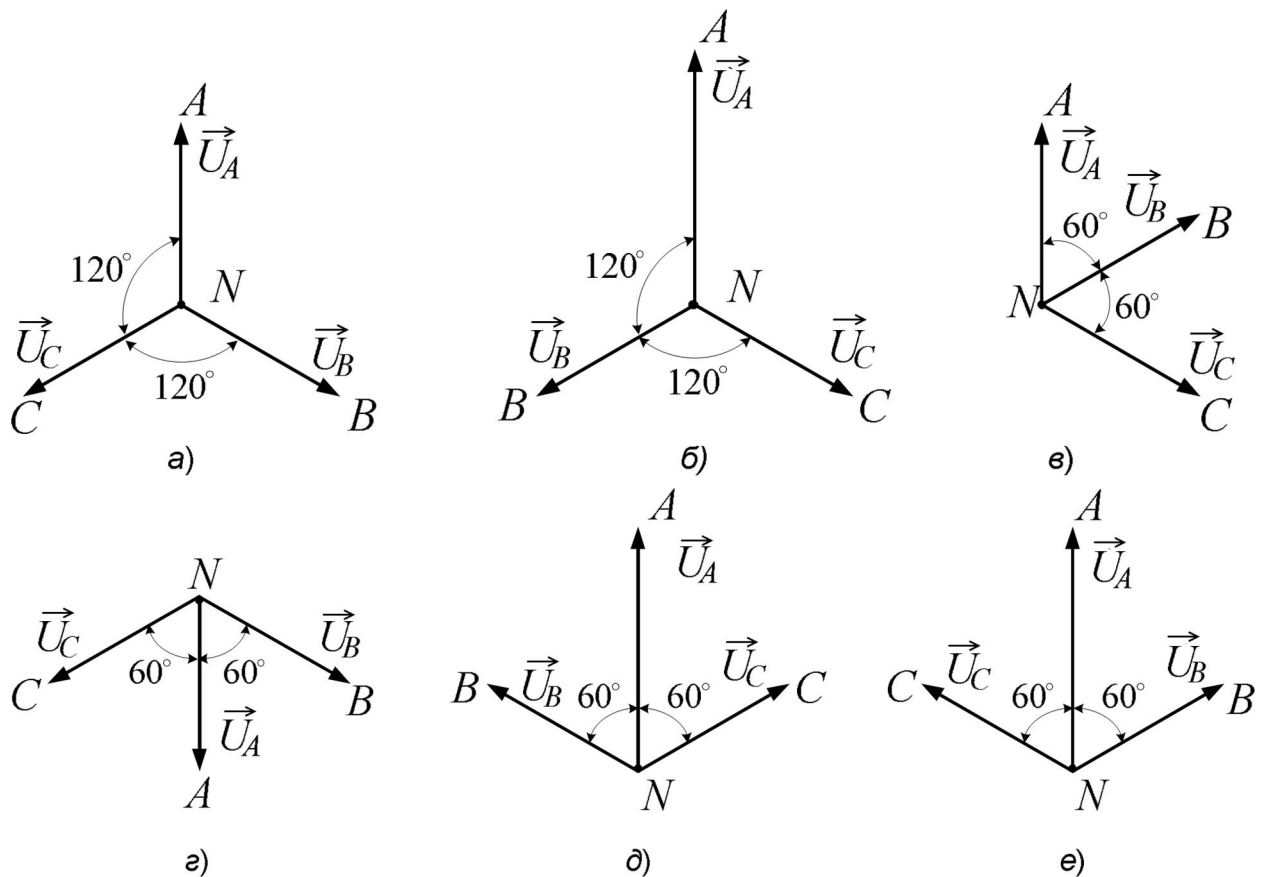


Рисунок 19.4 – Досліджувані трифазні системи напруг

Якщо до вузлів A, B, C приєднати початки (позначені маркерами) відповідних обмоток A, B, C , а до вузла N – кінці цих обмоток, то отримаємо систему фазних напруг $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$, яка відповідає векторній діаграмі на рис. 19.4, *a*, тобто:

$$\vec{U}_A = U_A, \quad \vec{U}_B = U_B e^{-j120^\circ}, \quad \vec{U}_C = U_C e^{j120^\circ}.$$

У цих виразах приймаємо, що вектор, який зображає напругу фази A , спрямований вздовж осі дійсних значень комплексної площини.

Якщо тепер поміняти місцями початок і кінець обмотки однієї з фаз джерела, то це приведе до того, що вектор відповідної фазної напруги \vec{U}_A, \vec{U}_B чи \vec{U}_C змінить свій напрям на протилежний, тобто аргумент \vec{U}_A, \vec{U}_B чи \vec{U}_C зміниться на 180° .

Наприклад, якщо поміняти місцями початок і кінець обмотки фази A , то векторна діаграма системи фазних напруг буде виглядати так, як показано на рис. 19.4, *г*:

$$\vec{U}_A = U_A e^{j180^\circ}, \quad \vec{U}_B = U_B e^{-j120^\circ}, \quad \vec{U}_C = U_C e^{j120^\circ}.$$

Нарешті, взаємно перейменовуючи будь-яку пару полюсів A , B , C трифазного джерела (рис. 19.2...19.7), ми змінюємо на векторній діаграмі взаємне розташування двох відповідних фазних напруг. Наприклад, система, показана на рис. 19.4, б, утворюється з системи, показаної на рис. 19.4, а, переміною місцями полюсів C і B :

$$\vec{U}_A = U_A, \quad \vec{U}_B = U_B e^{j120^\circ}, \quad \vec{U}_C = U_C e^{-j120^\circ}.$$

Аналогічно можна отримати інші трифазні системи напруг, зображені на рис. 19.4. Діючі значення фазних напруг регулюються в межах від нуля до певного максимального значення за допомогою перемикачів у відповідних фазах джерела трифазної напруги.

Для кожної з показаних на рис. 19.4 трифазних систем аналітично і графічно визначаються симетричні складові. Ті ж симетричні складові вимірюються за допомогою фільтрів симетричних складових. Результати обчислень і вимірів порівнюються і робляться відповідні висновки.

Параметри елементів, які використовуються для складання схем досліджуваних кіл:

- діючі значення напруг U_A , U_B , U_C у кожній трифазній системі, показаній на рис. 19.4, а - е, вибираються за варіантом, згідно табл. 19.1;

- $R_1 = R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 275$ Ом; $X_C = \frac{1}{\omega C} = 159$ Ом (для $C = 20$ мкФ);

- $R_A = R_B = R_C = 200$ Ом.

3. План роботи

1. Записати в табл. 19.1 діючі значення фазних напруг кожної з досліджуваних трифазних систем.

2. Відповідно рис. 19.5 скласти схему для визначення симетричної складової зворотної послідовності системи фазних напруг.

3. Для всіх систем (а...е) встановити значення вхідних напруг згідно табл. 19.1 і виміряти значення вихідних напруг. Занести встановлені та виміряні значення в табл. 19.2.

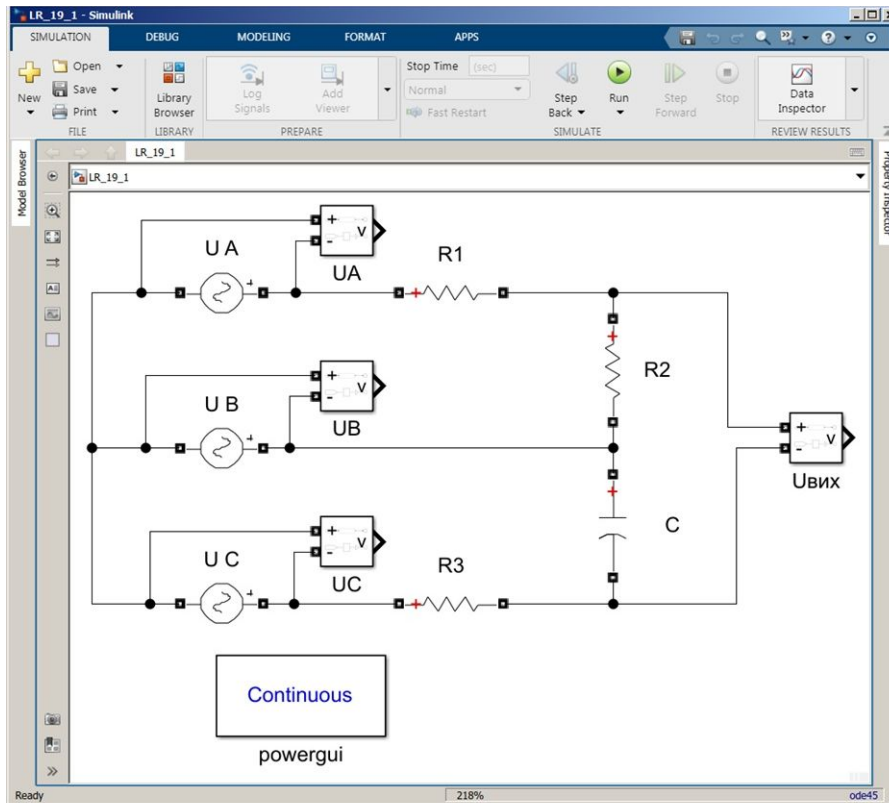


Рисунок 19.5 – Схема для визначення складової зворотної послідовності

Таблиця 19.1 – Вхідні напруги

Система	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$
<i>a</i>	$10 \cdot N$	$10 \cdot N$	$10 \cdot N$
<i>б</i>	$15 \cdot N$	$10 \cdot N$	$10 \cdot N$
<i>в</i>	$10 \cdot N$	$7 \cdot N$	$10 \cdot N$
<i>г</i>	$7 \cdot N$	$10 \cdot N$	$10 \cdot N$
<i>д</i>	$11 \cdot N$	$10 \cdot N$	$10 \cdot N$
<i>e</i>	$11 \cdot N$	$10 \cdot N$	$10 \cdot N$

Таблиця 19.2 – Результати вимірювань і розрахунків

Система	Вимірювання				Розрахунок	
	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{вих}, \text{В}$	$\frac{U_{вих}}{k}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$
<i>a</i>						
<i>б</i>						
<i>в</i>						
<i>г</i>						
<i>д</i>						
<i>e</i>						

4. Скласти схему, зображену на рис. 19.6, для визначення симетричної

складової прямої послідовності системи фазних напруг. Для цього в схемі на рис. 19.5 поміняти місцями полюси B і C .

5. Для всіх систем ($a...e$) встановити значення вхідних напруг згідно табл. 19.1 і виміряти значення вихідних напруг. Занести встановлені та виміряні значення в табл. 19.3.

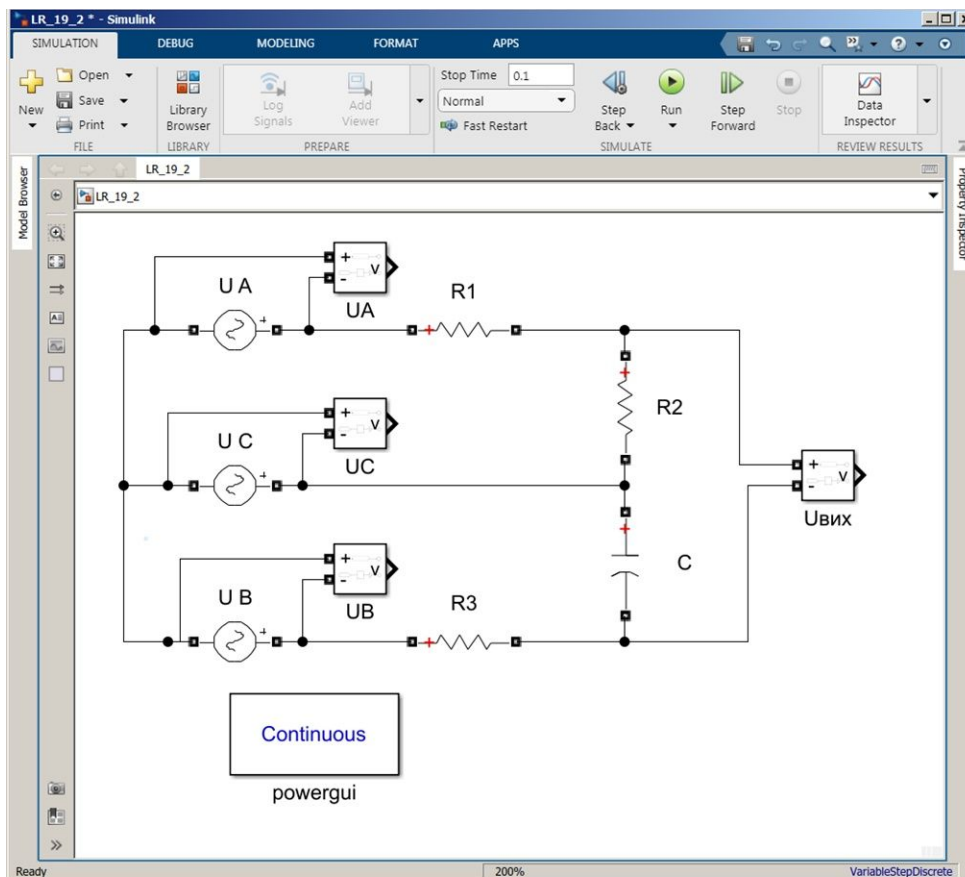


Рисунок 19.6 – Схема для визначення складової прямої послідовності

Таблиця 19.3 — Результати вимірювань і розрахунків

Система	Вимірювання				Розрахунок	
	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_{вих}, В$	$\frac{U_{вих}}{k}, В$	$U_1, В$
a						
b						
$в$						
$г$						
$д$						
e						

6. Скласти схему, зображену на рис. 19.7, для визначення симетричної

складової нульової послідовності системи фазних напруг.

7. Для всіх систем (*a...e*) встановити значення вхідних напруг згідно табл. 19.1 і виміряти значення вихідних напруг. Занести встановлені та виміряні значення в табл. 19.4.

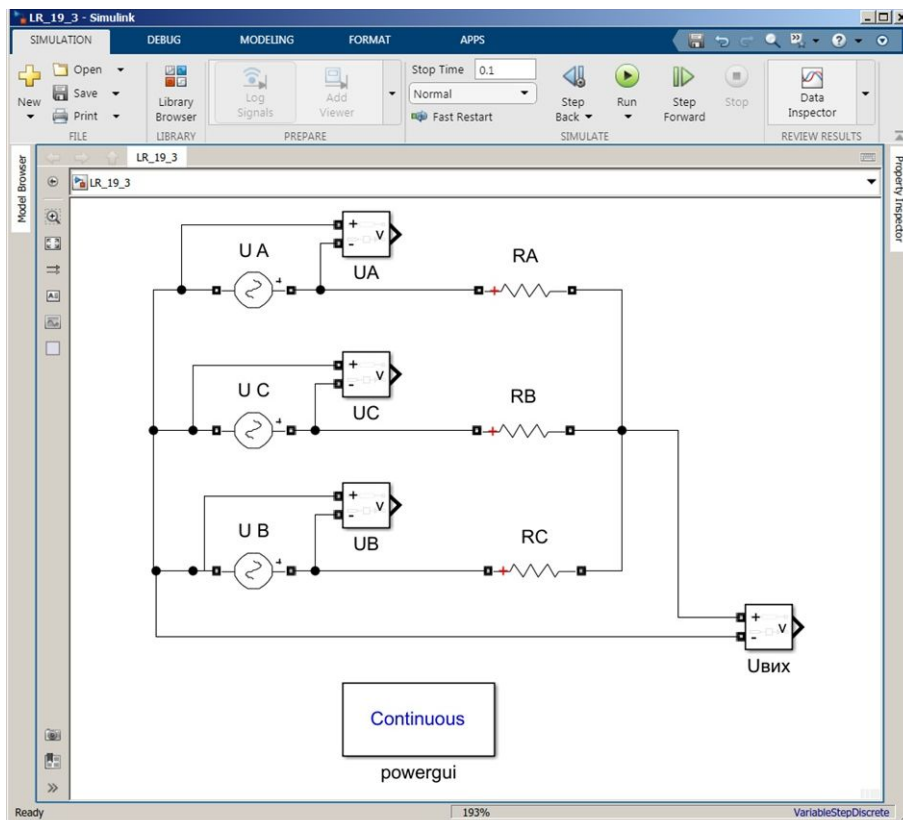


Рисунок 19.7 – Схема для визначення складової нульової послідовності

Таблиця 19.4 – Результати вимірювань і розрахунків

Система	Вимірювання				Розрахунок	
	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{вих}, \text{В}$	$\frac{U_{вих}}{k}, \text{В}$	$U_0, \text{В}$
<i>a</i>						
<i>б</i>						
<i>в</i>						
<i>г</i>						
<i>д</i>						
<i>e</i>						

8. За даними експериментів, наведеними у табл. 19.2...19.4, для кожної системи фазних напруг побудувати векторні діаграми і графічно визначити симетричні складові прямої зворотної і нульової послідовності.

9. Для кожної системи (*a...e*) за даними табл. 19.2...19.4 аналітично визначити симетричні складові прямої, зворотної і нульової послідовності

фазних напруг.

10. Порівняти значення симетричних складових систем фазних напруг, отримані експериментально, знайдені графічною побудовою і розраховані теоретично. Зробити висновки.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиці. Векторні діаграми.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. В чому полягає сутність методу симетричних складових?
2. Які симетричні складові містить несиметрична система лінійних струмів трифазного кола з'єданого:
 - зіркою з нейтральним проводом;
 - зіркою без нейтрального проводу.
3. Чи містять лінійні напруги складові нульової послідовності?
4. Які симетричні складові містять фазні напруги несиметричного трифазного споживача, з'єданого зіркою, якщо система прикладених лінійних напруг симетрична?
5. Як зв'язані між собою симетричні складові фазних і лінійних напруг у разі з'єднання трифазного навантаження зіркою?
6. Чи можливо стверджувати, що значення симетричних складових струмів будь якої послідовності залежить від складових напруг такої ж послідовності при несиметричному навантаженні?
7. Якщо несиметрична трифазна система, з'єднана зіркою, не має нейтрального проводу, то чи будуть фазні струми містити нульову складову?
8. Чи можуть струми нульової послідовності створити обертове магнітне поле?

20 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПЕРІОДИЧНОГО НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

1. Мета роботи:

Вимірювання гармонійних складових (спектру) періодичної напруги різної форми, виділення гармонійних складових з періодичної напруги різної форми за допомогою резонансних кіл.

2. Теоретична частина

Для розрахунку лінійних електричних кіл несинусоїдного струму використовують розклад періодичних функцій у тригонометричний ряд Фур'є.

Як відомо з математики, періодичну функцію, яка задовольняє умови Діріхле (функція має скінченну кількість розривів першого роду та максимумів і мінімумів на розглядуваному інтервалі), можна розкласти у ряд Фур'є. У реальних електричних колах струми, напруги та ЕРС ці умови задовольняють, тому розклад їх у ряд можливий завжди, а тригонометричні ряди, які їх апроксимують, є швидкозбіжні.

Ряд Фур'є, який апроксимує періодичну функцію $f(t)=f(t+T)$, можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + A_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k). \end{aligned} \quad (20.1)$$

Він складається з постійної складової – A_0 і синусоїдних – $A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$, які називають *гармоніками*. Синусоїду найнижчої ($k = 1$) частоти $\omega = \frac{2\pi}{T}$ називають *основною* гармонікою, а всі інші ($k > 1$) – *вищими*. Постійну складову іноді називають *нульовою* гармонікою. Сукупність гармонічних складових несинусоїдної періодичної функції називається її дискретним частотним спектром: $A_{km}(\omega)$ – амплітудний спектр, $\psi_k(\omega)$ – фазовий спектр. Параметри ряду Фур'є A_{km} , ψ_k можна обчислити аналітично, якщо $f(t)$ задана аналітично, або числовими методами.

Ряд Фур'є теоретично є нескінченним, однак із збільшенням кількості членів ряд Фур'є швидко збігається, тому під час розкладу в ряд обмежуються певною кількістю n гармонік. Для прикладу, на рис. 20.1 наведено першу і третю гармоніки напруги та результат їх додавання.

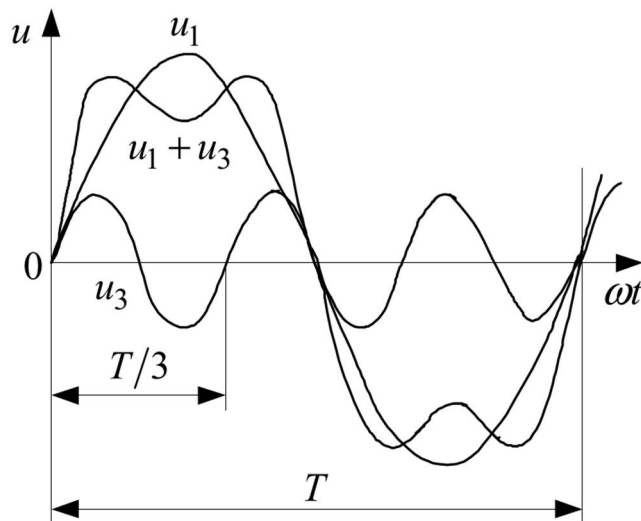


Рисунок 20.1 – Перша і третя гармоніки напруги

Для обчислення коефіцієнтів ряду Фур'є його доцільно подати у вигляді **постійної** та **синусних і косинусних** складових

$$f(t) = A_0 + \sum(B_{kms} \sin k\omega t + B_{kmc} \cos k\omega t). \quad (20.2)$$

Коефіцієнти A_0 , B_{kms} , B_{kmc} обчислюються за формулами

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt;$$

$$B_{kms} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin k\omega t dt;$$

$$B_{kmc} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos k\omega t dt.$$

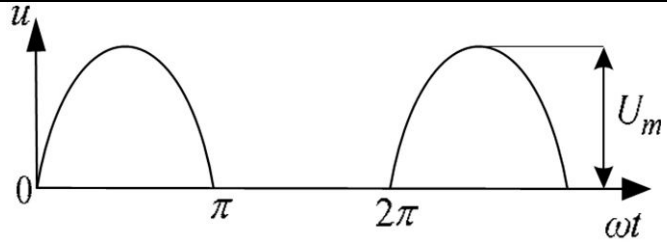
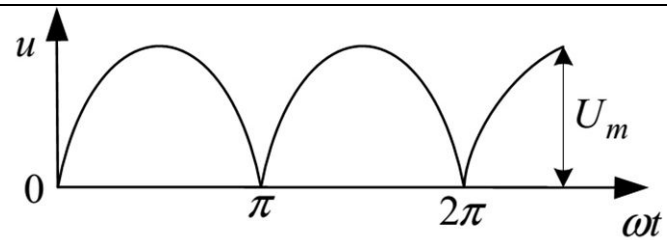
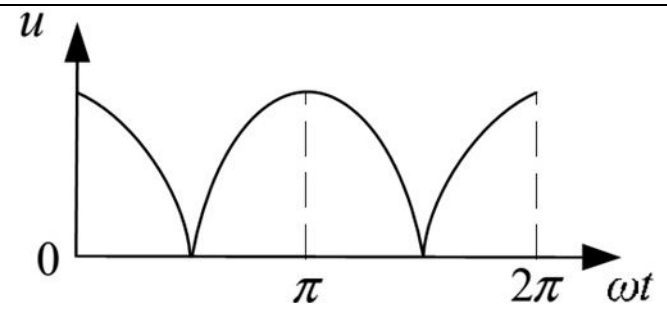
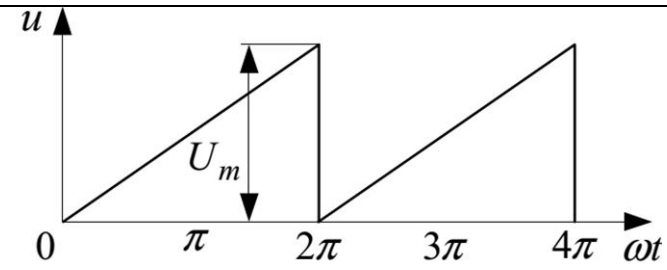
Перехід від коефіцієнтів ряду (20.2) до коефіцієнтів ряду (20.1) здійснюється за формулами

$$A_{km} = \sqrt{B_{kms}^2 + B_{kmc}^2};$$

$$\psi_k = \arctg \left(\frac{B_{kmc}}{B_{kms}} \right).$$

Для типових кривих, які найчастіше трапляються в електротехніці, розклад у ряд можна знайти в довідниках з математики чи електротехніки. Частина таких функцій наведена в табл. 20.1.

Таблиця 20.1 – Розклад типових кривих

Часові характеристики	Гармонічний склад
 <p data-bbox="391 694 614 739">Рисунок 20.2</p>	$u(t) \approx \frac{U_m}{\pi} - \left(1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{2}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots\right)$
 <p data-bbox="391 1019 614 1064">Рисунок 20.3</p>	$u(t) \approx \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \times \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots \right)$
 <p data-bbox="391 1400 614 1444">Рисунок 20.4</p>	$u(t) \approx \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots \right)$
 <p data-bbox="391 1747 614 1792">Рисунок 20.5</p>	$u(t) \approx U_m - \frac{2U_m}{\pi} \sin \omega t - \frac{U_m}{\pi} \sin 2\omega t - \dots$

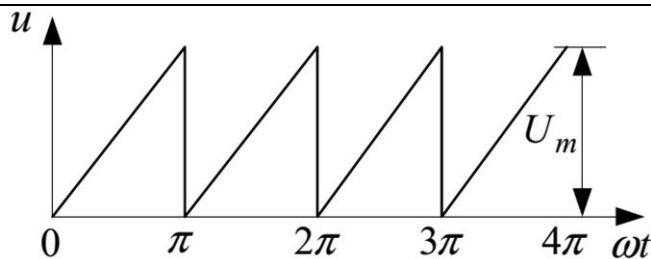


Рисунок 20.6

$$u(t) \approx U_m \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \dots) \right)$$

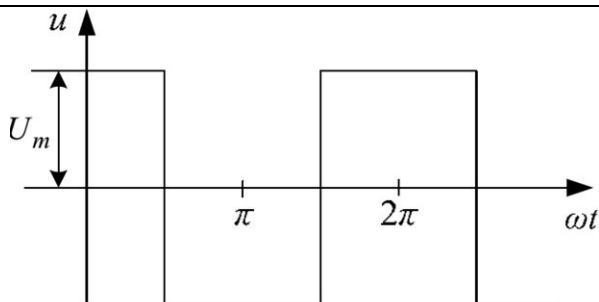


Рисунок 20.7

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \times \left(\frac{\cos \omega t}{1} - \frac{\cos 3\omega t}{3} + \frac{\cos 5\omega t}{5} - \dots \right)$$

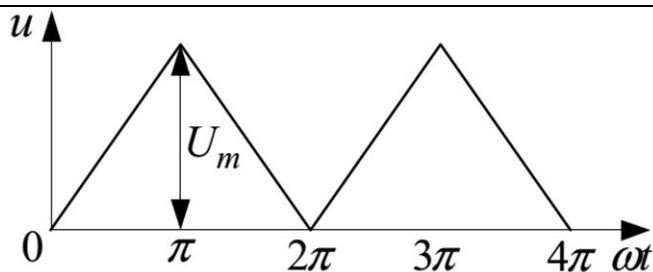


Рисунок 20.8

$$u(t) \approx U_m \left(\frac{1}{2} + \frac{4}{\pi^2} \cos \omega t - \frac{4}{9\pi^2} \cos 3\omega t - \dots \right)$$

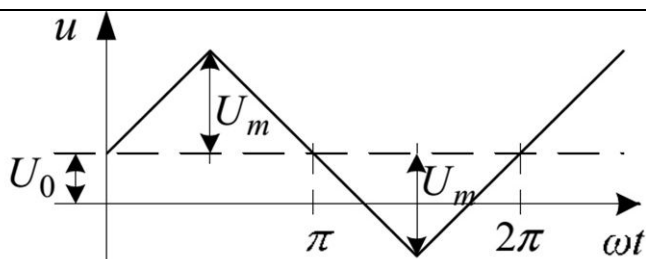


Рисунок 20.9

$$u(t) \approx U_0 + \frac{8U_m}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \frac{1}{49} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

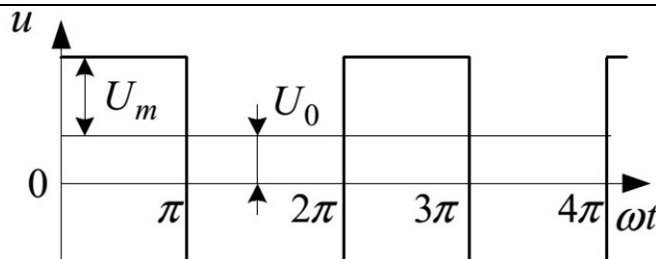
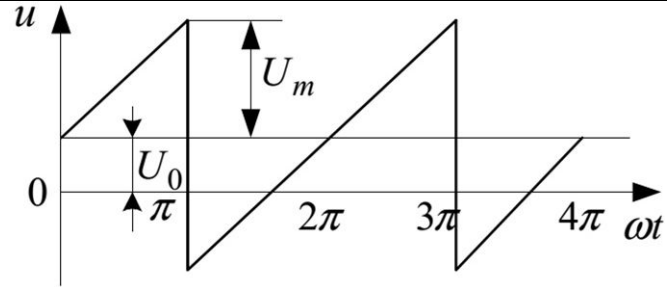
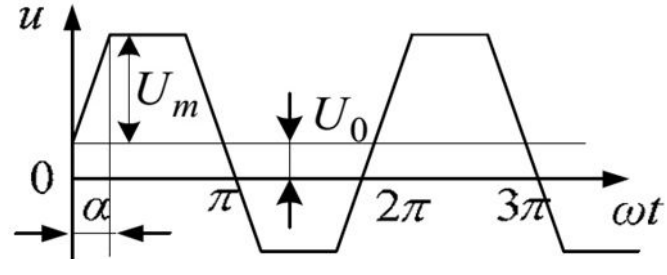
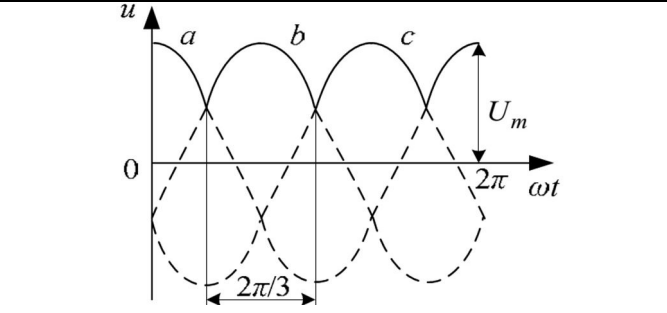


Рисунок 20.10

$$u(t) \approx U_0 + \frac{4U_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

 <p style="text-align: center;">Рисунок 20.11</p>	$u(t) \approx U_0 - \frac{2U_m}{\pi} \left(\frac{\sin \omega t}{1} + \frac{\sin 2\omega t}{2} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \dots \right)$
 <p style="text-align: center;">Рисунок 20.12</p>	$u(t) \approx U_0 + \frac{4U_m}{\alpha\pi} (\sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} 5 \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots)$
 <p style="text-align: center;">Рисунок 20.13</p>	$u(t) \approx \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{32-1} \cos 3\omega t - \frac{1}{62-1} \cos 6\omega t + \frac{1}{92-1} \cos 9\omega t - \frac{1}{12^2-1} \cos 12\omega t + \dots \right)$

Віртуальні прилади і обладнання для проведення лабораторної роботи представлені на рис. 20.14. Тут використані прилади основної бібліотеки пакету розширення *Simulink* (генератори *Signal Generator*, *Repeating Sequence*, *Pulse Generator*, нелінійні блоки *Saturation*, *Abs*, осцилоскоп *Scope*, *Display*).

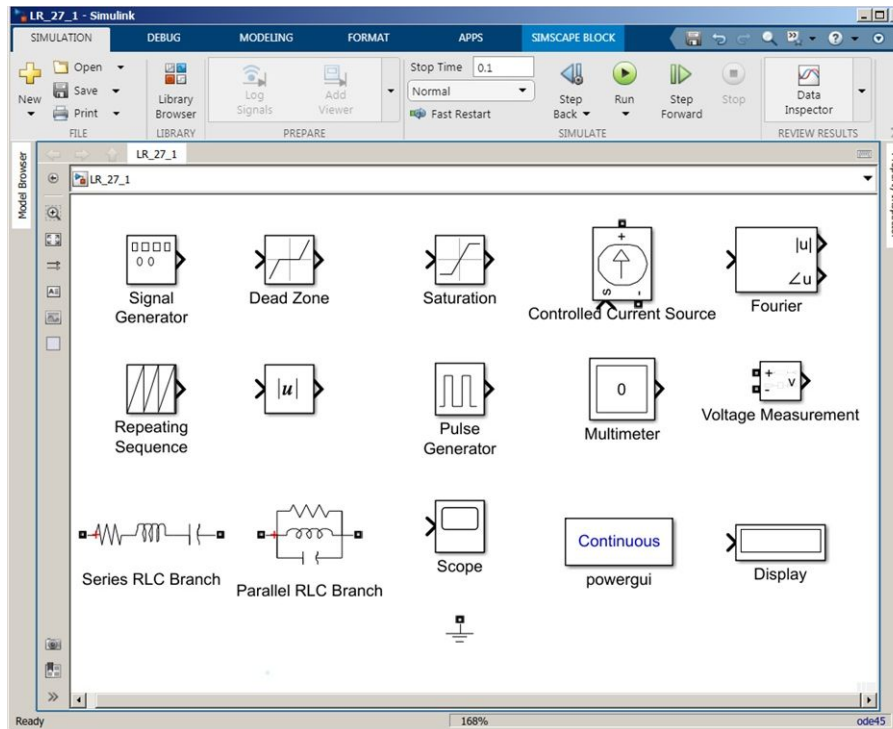


Рисунок 20.14 – Віртуальні блоки для проведення лабораторної роботи по дослідженню кіл несинусоїдного струму

3. План роботи

1. Виконання лабораторної роботи здійснюється на моделях, які представлені на рис. 20.15, 20.20, 20.24 (модель задається викладачем). При самостійному вивченні рекомендується робота на всіх моделях. У схемі рис. 20.15 як генератор несинусоїдної періодичної напруги використовується блок **Signal Generator**. Вікно налагодження параметрів блоку показано на рис. 20.16. Це вікно містить три поля. У першому полі (**Wave form**) задається форма напруги на виході генератора. З випадного меню (рис. 20.16) впливає, що генератор забезпечує чотири види вихідних сигналів: синусоїдальний, прямокутний, пилкоподібний і сигнал випадкової форми.

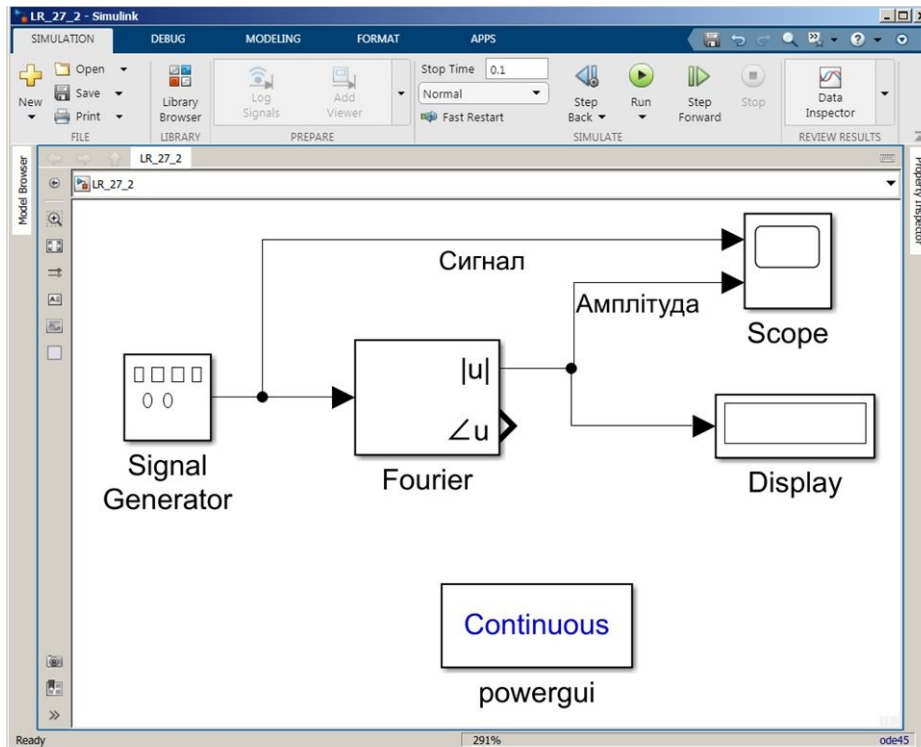


Рисунок 20.15 – Модель для гармонійного аналізу несинусоїдних напруг

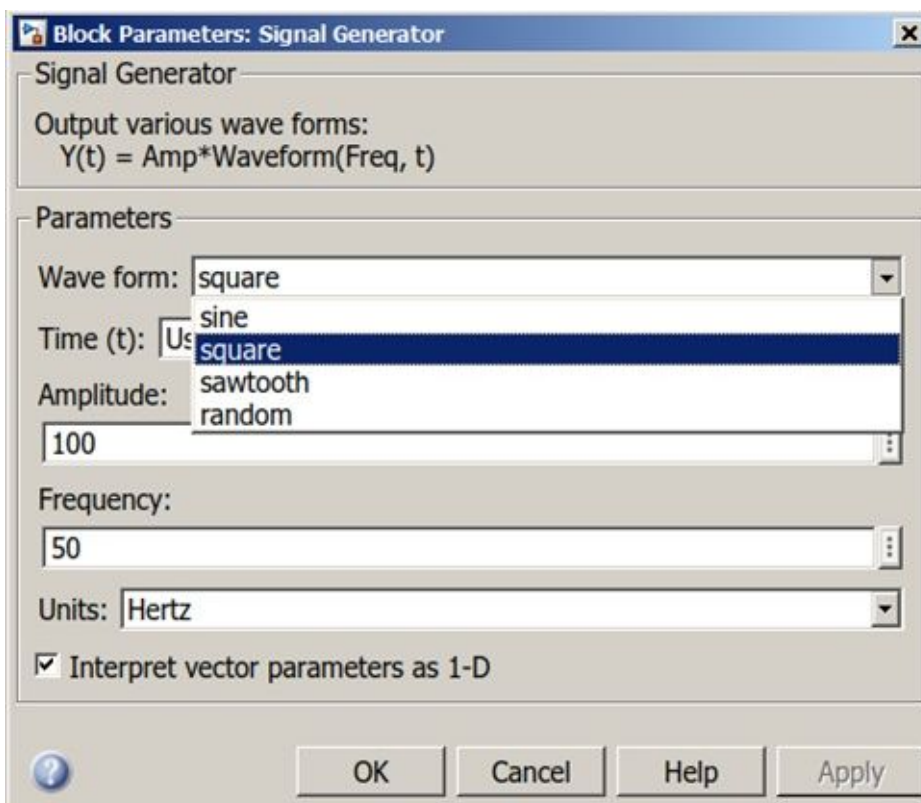


Рисунок 20.16 – Вікно налагодження блоку *Signal Generator*

2. У лабораторній роботі досліджуються напруги прямокутної і пилкоподібної форми. Величина амплітуди (варіант $10 \cdot N$) і частоти (варіант $5 \cdot N$) вихідного сигналу встановлюються в полях вікна блоку *Signal Generator* (рис. 20.16). Блок *Fourier* призначений для виділення амплітуд гармонік з

досліджуваного сигналу. У вікні налагодження цього блоку (рис. 20.17) задаються основна частота досліджуваного сигналу (у першому полі) і номер вимірюваної гармоніки (у другому полі). Для вимірювання гармонік необхідно провести моделювання кілька разів, кожного разу вказуючи номер вимірюваної гармоніки у вікні блоку.

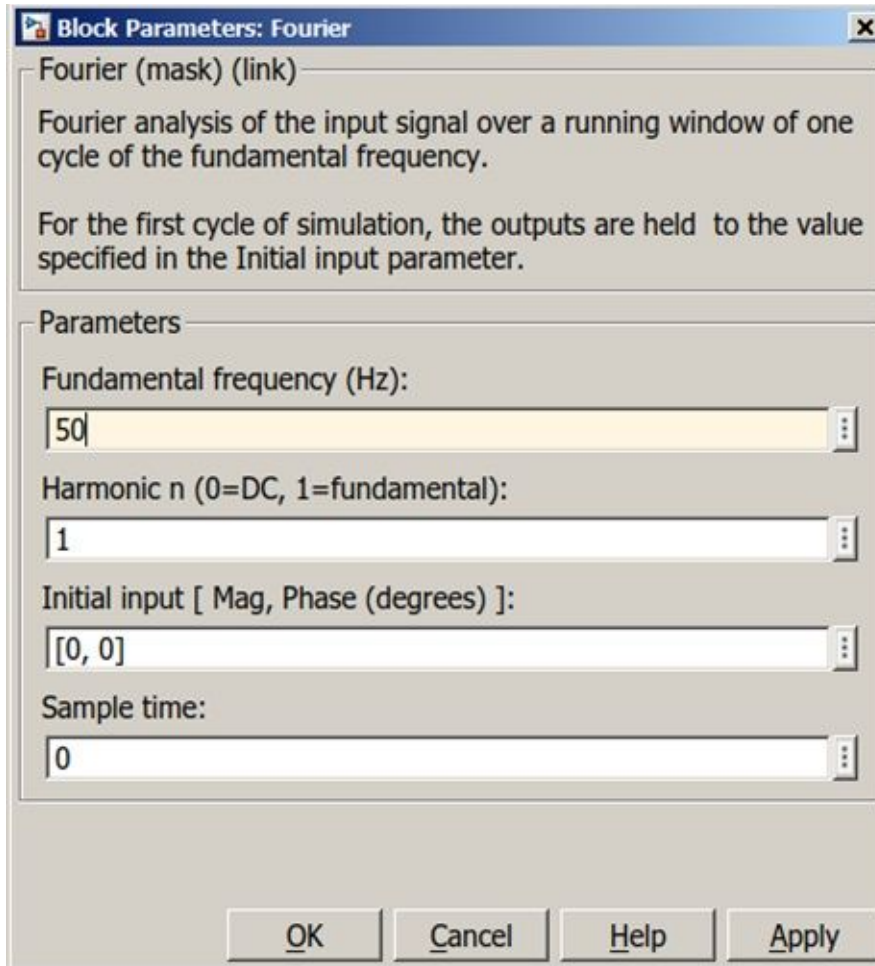


Рисунок 20.17 – Вікно налагодження блоку *Fourier*

На рис. 20.18, 20.19 показані результати моделювання, зняті з блоку *Scope* для першої і третьої гармонік прямокутної напруги. На нижньому полі блоку *Scope* видно значення амплітуд цих гармонік. Значення амплітуд гармонік можуть бути також визначені за допомогою блоку *Display* (рис. 20.15).

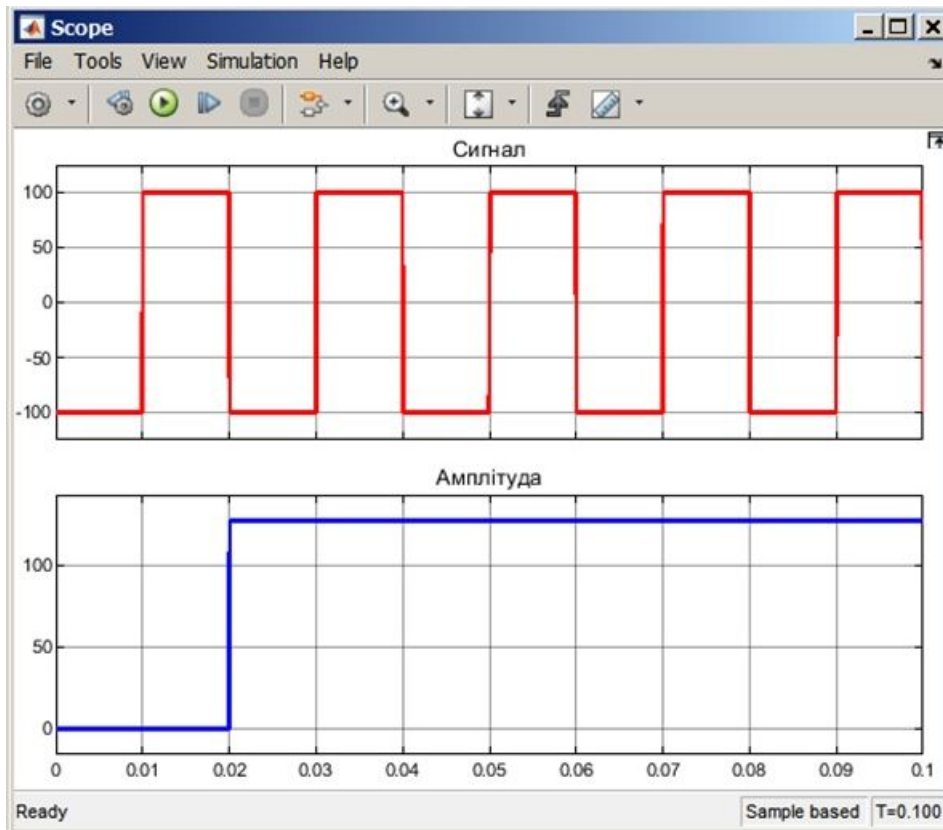


Рисунок 20.18 – Прямокутна напруга і амплітуда її першої гармоніки

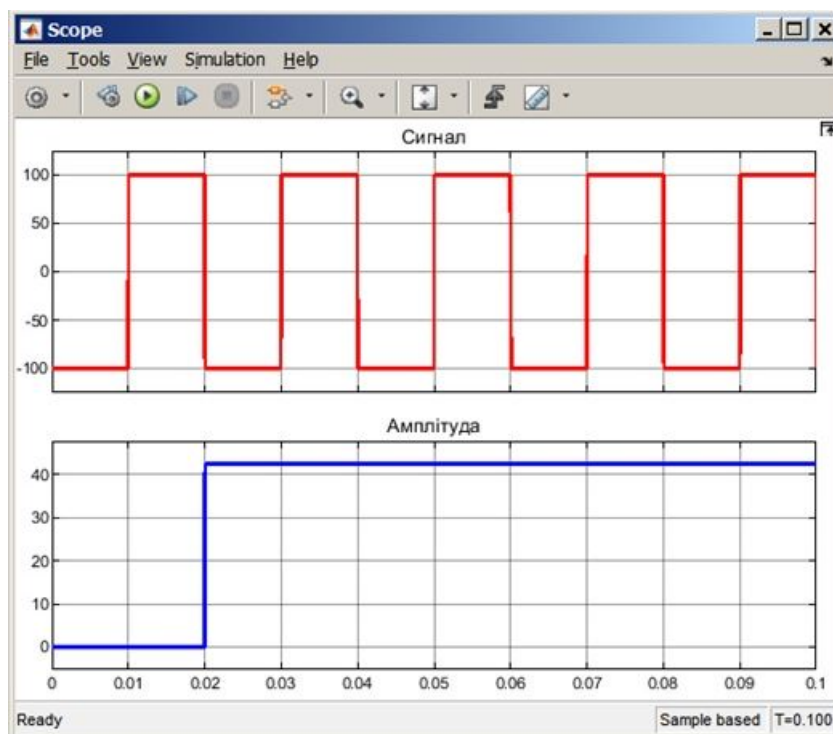


Рисунок 20.19 – Прямокутна напруга і амплітуда її третьої гармоніки

3. При дослідженні симетричної пилкоподібної (трикутної) напруги застосовується блок *Repeating Sequence*. Модель для цього випадку показана на рис. 20.20. Вікно налагодження параметрів блоку *Repeating Sequence* показано на рис. 20.21. У першому полі задаються часові моменти (варіант $0,001 \cdot N$) на

періоді вихідної напруги, де стрибком змінюється похідна вихідної напруги (сигналу). У другому полі – значення вихідної напруги в ці моменти (варіант $10 \cdot N$). З рис. 20.21 видно що період дорівнює 0,02 с ($f=50$ Гц), а напруга змінюється від -100 В до +100 В у першому півперіоді і від +100 В до -100В — в другому півперіоді. Результати моделювання для першої та п'ятої гармонік видно з рис. 20.22 і рис. 20.23.

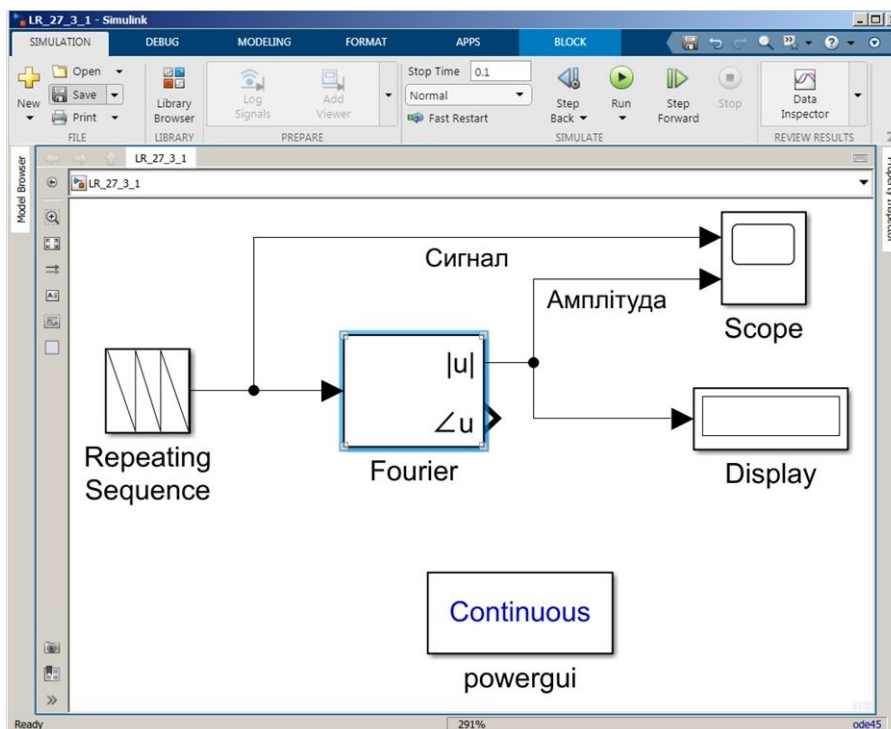


Рисунок 20.20 – Модель для гармонійного аналізу симетричної пилкоподібної напруги

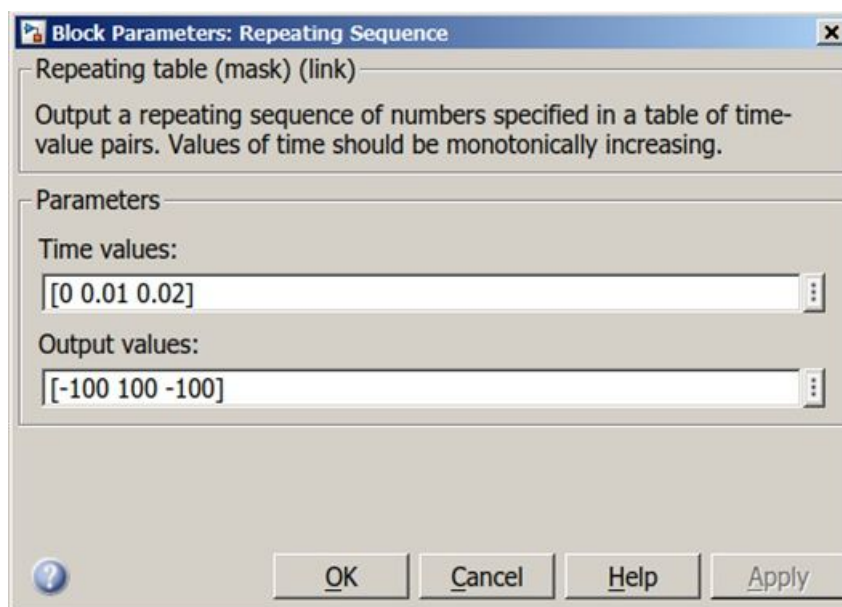


Рисунок 20.21 – Вікно налагодження блоку *Repeating Sequence*

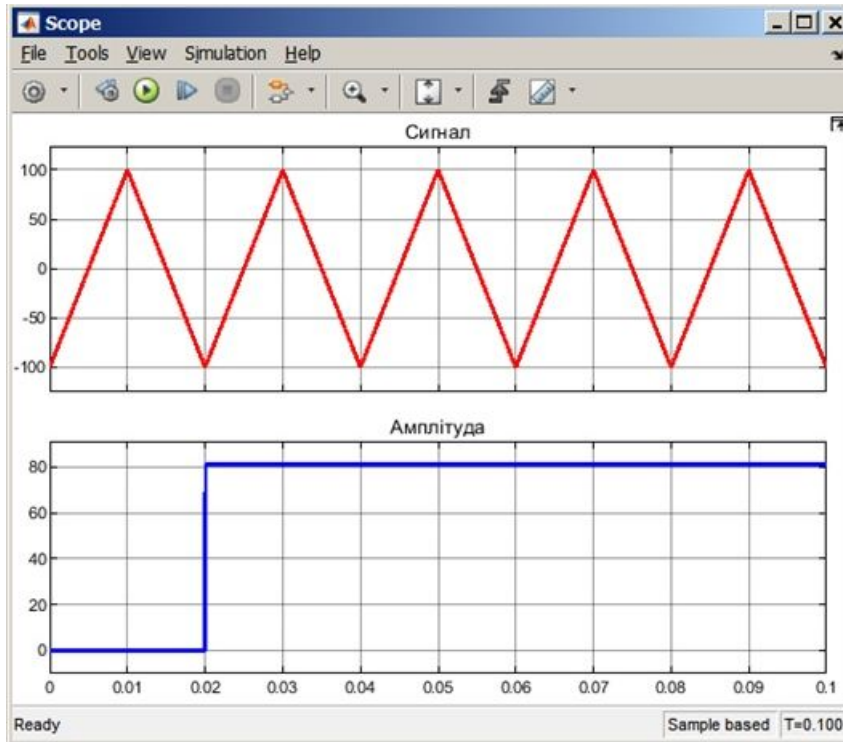


Рисунок 20.22 – Симетрична пилкоподібна напруга і амплітуда її першої гармоніки

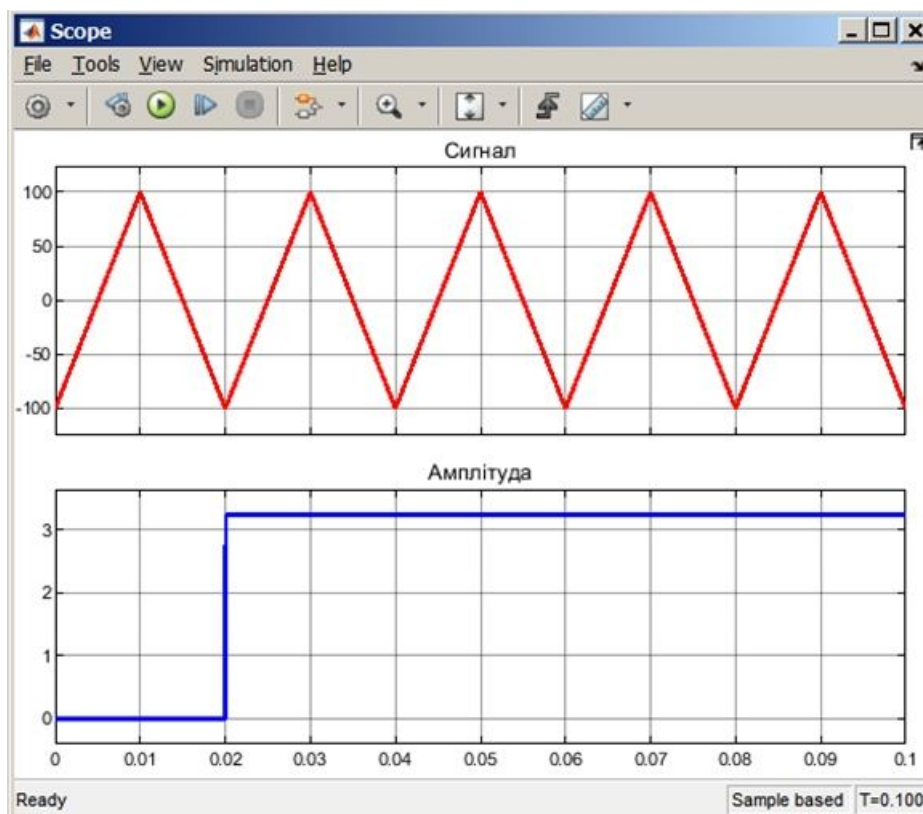


Рисунок 20.23 – Симетрична пилкоподібна напруга і амплітуда її п'ятої гармоніки

4. Модель для дослідження імпульсної напруги представлена на рис. 20.24. Вікно налагодження імпульсного генератора показане на рис 20.25. У

полях налагодження задаються період (варіант $0,001 \cdot N$), відносна тривалість імпульсу (варіант $2 \cdot N$) у відсотках по відношенню до періоду і амплітуда (варіант $10 \cdot N$).

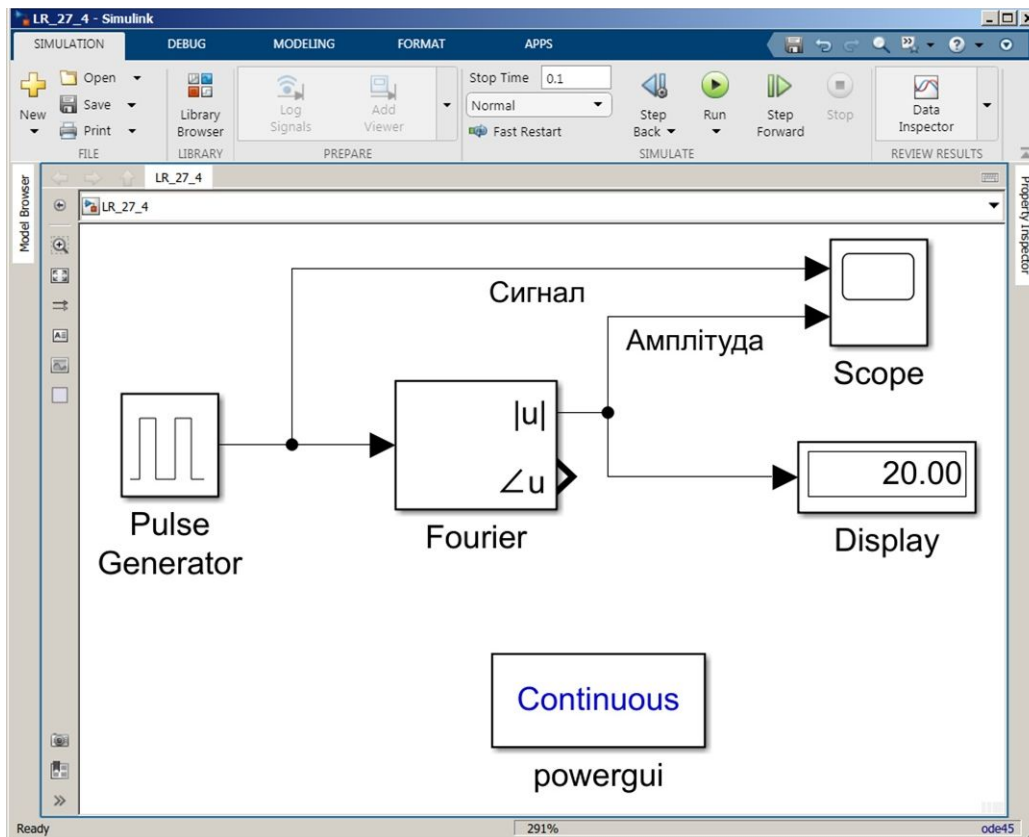


Рисунок 20.24 – Модель для дослідження імпульсної напруги

Результати дослідження нульової гармоніки (постійною складовою) видно з рис. 20.26. При виконанні лабораторної роботи викладачем задається форма досліджуваної напруги, її частота і амплітуда. Результати виконання роботи заносяться в табл. 20.2.

Таблиця 20.2 – Результати вимірювання та розрахунків

Досліджувана напруга			№ гармоніки	Результати вимірювання	Результати розрахунків
Форма	Амплітуда, В	Частота, Гц	k	Амплітуда гармоніки, В	
			0		
			1		
			2		
			3		
			4		
			5		
			6		

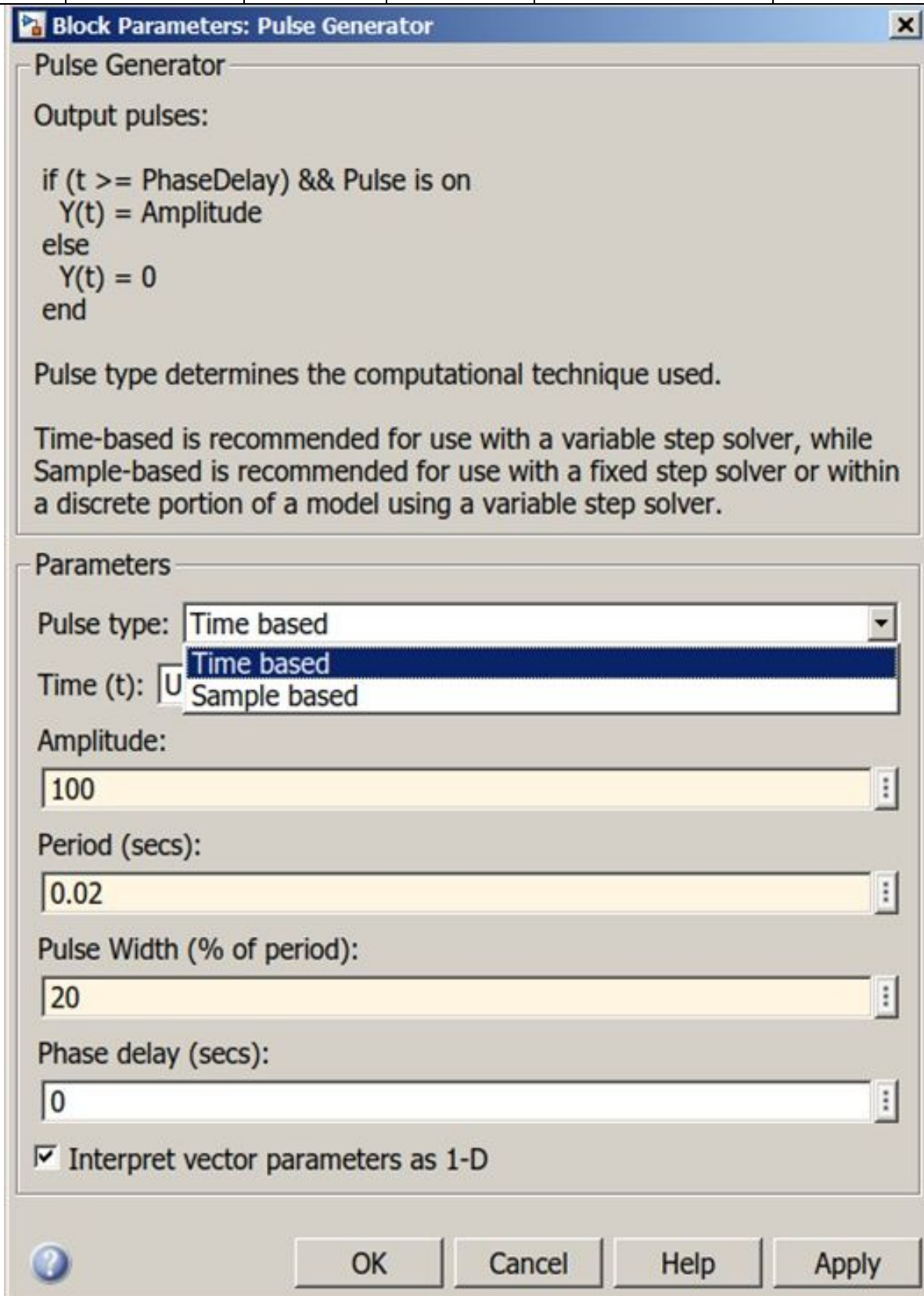


Рисунок 20.25 – Вікно налагодження параметрів блоку *Pulse Generator*

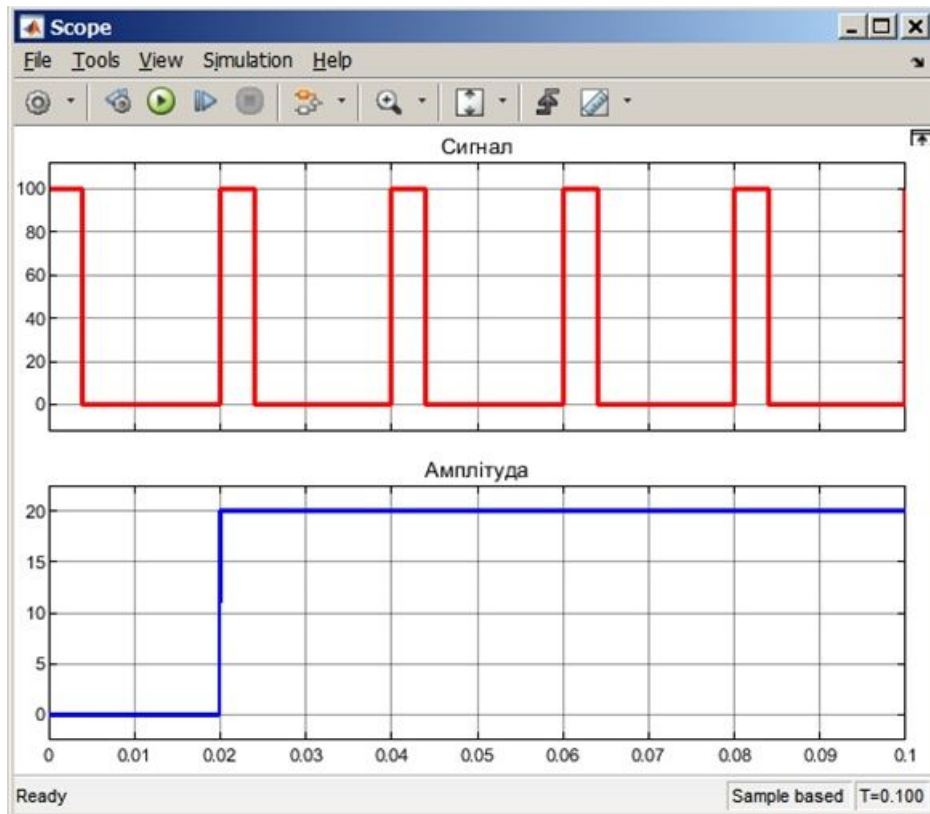


Рисунок 20.26 – Імпульсна напруга і її постійна складова

5. Вимірювання гармонійних складових періодичної напруги, що має форму спотвореної синусоїди, яка отримана з використанням нелінійних перетворювачів здійснюється з використанням нелінійних блоків:

- блок з насиченням *Saturation* (параметри *Upper limit* $0.1N$ і *Lower limit* $-0.1N$);
- блок з зоною нечутливості *Deade Zone* (параметри *Start of dead zone* $-N$ і *End of dead zone* N);
- *Abs* (блок абсолютного значення).

На вхід цих блоків подається синусоїдальний сигнал (величина амплітуди (варіант $10 \cdot N$) і частоти (варіант $5 \cdot N$)) з генератора (рис. 20.27). Результати перетворення, здійснені цими блоками, показані на рис. 20.28. Дослідження гармонійного складу цієї напруги, як і в попередньому випадку (з використанням блоків *Fourier* та *Display*). Внаслідок проведення роботи заповнюється таблиця аналогічна табл. 20.2.

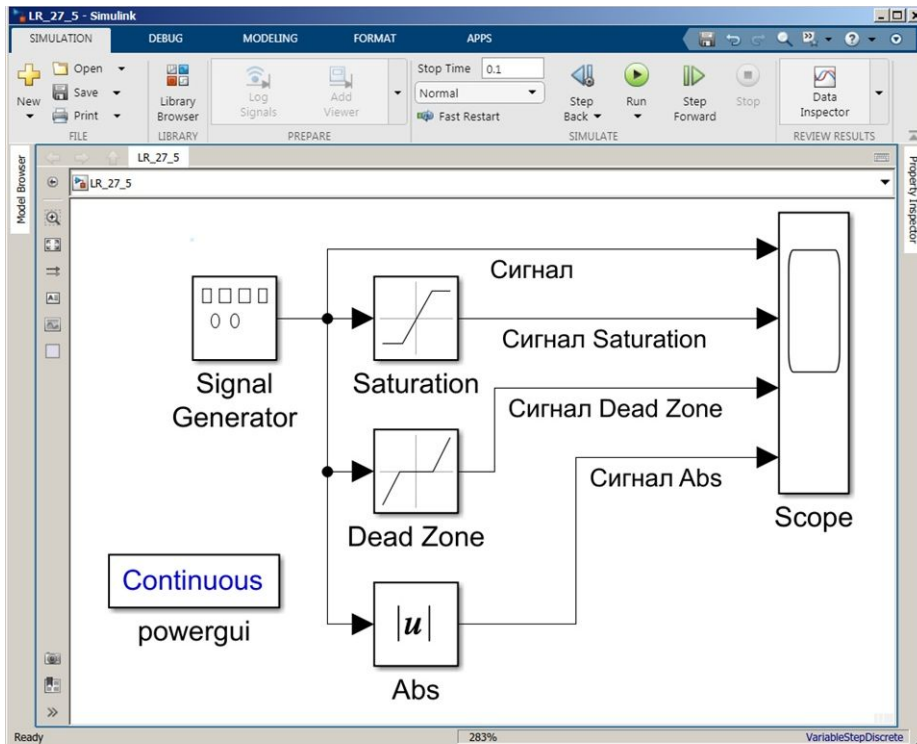


Рисунок 20.27 – Моделі для отримання несинусоїдної напруги за допомогою нелінійних перетворювачів

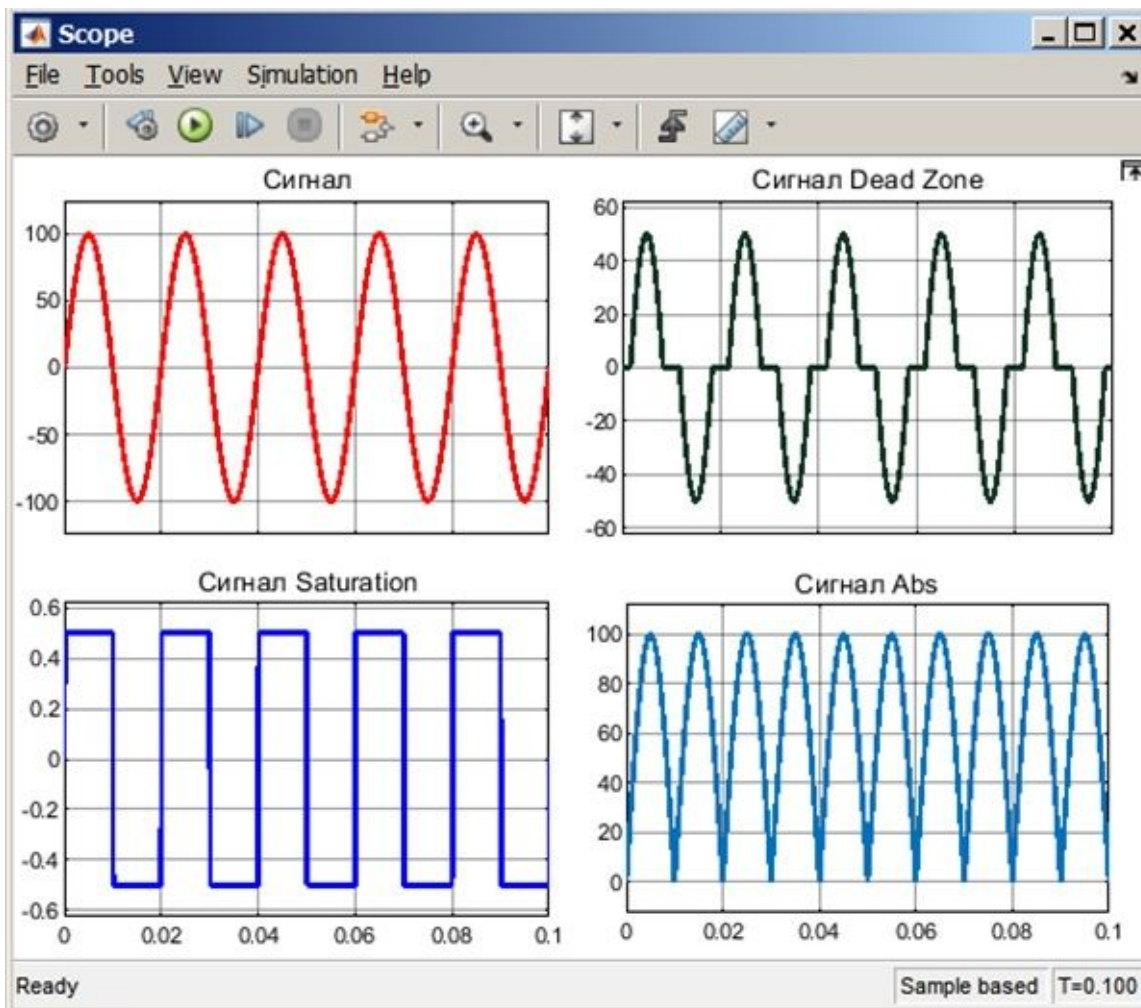


Рисунок 20.28 – Форми напруги при нелінійних перетвореннях

6. Вимірювання гармонійних складових періодичної напруги шляхом їх виділення резонансними колами реалізується на моделі, що представлена на рис. 20.29.

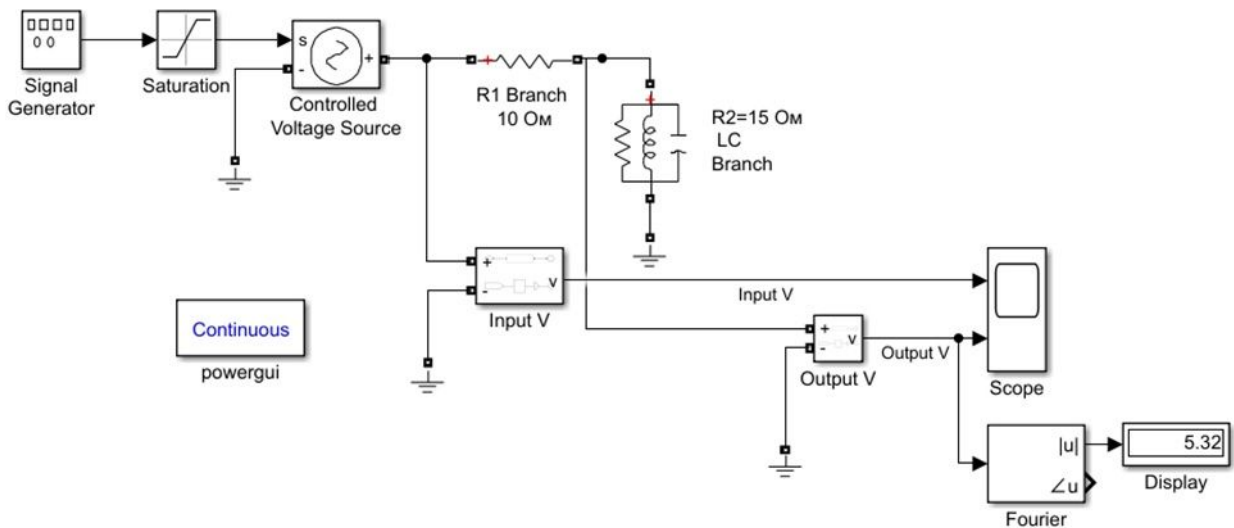


Рисунок 20.29 – Модель для виділення гармонійних складових

У моделі (рис. 20.29) генератор несинусоїдної напруги реалізований шляхом перетворення нелінійним блоком *Saturation* синусоїдного сигналу, який отримано з блоку *Signal Generator*. Зв'язок блоків основної бібліотеки *Simulink* з блоками бібліотеки *Simscape / Electrical / Specialized Power System* здійснюється за допомогою блоку *Controlled Voltage Source* (кероване джерело напруги). В блоці *Signal Generator* задайте амплітуду (варіант $10 \cdot N$), частоту (варіант $2 \cdot N$) Гц. Для блоку *Saturation* встановіть параметри *Upper limit* 75, *Lower limit* -75,

Виділення відповідної гармоніки ґрунтується на тому, що при резонансній частоті $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ реактивний опір паралельний з'єднаних L і C дорівнює нескінченності і напруга, яка вимірюється блоком *Out V* (вихідна напруга) дорівнює

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

де U_1 – напруга, яка вимірюється блоком *Input V*.

Напруги U_1 (*Input V*), U_2 (*Out V*), опори R_1 , R_2 показані на схемі моделі. На всіх інших частотах реактивний опір паралельний з'єднаних L і C дуже

малий, тому вся вхідна напруга падає на R_1 , а на виході практично рівно нулю.

Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть *Simulation time – Stop time* (час моделювання) **0.1**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode45* та запусіть моделювання.

На рис. 20.29 (на екрані дисплея) і на рис. 20.30 наведені результати моделювання під час налагодження *LC*-кола на третю гармоніку. При переналагодженні *LC*-кола параметри ємності задаються $10N$ мкФ, а значення індуктивності розраховується студентом відповідно до гармоніки, на яку налагоджується коло. При самостійній роботі величина ємності вибирається в діапазоні 50-100 мкФ. Результати вимірювань і обчислень заносяться в табл. 20.3.

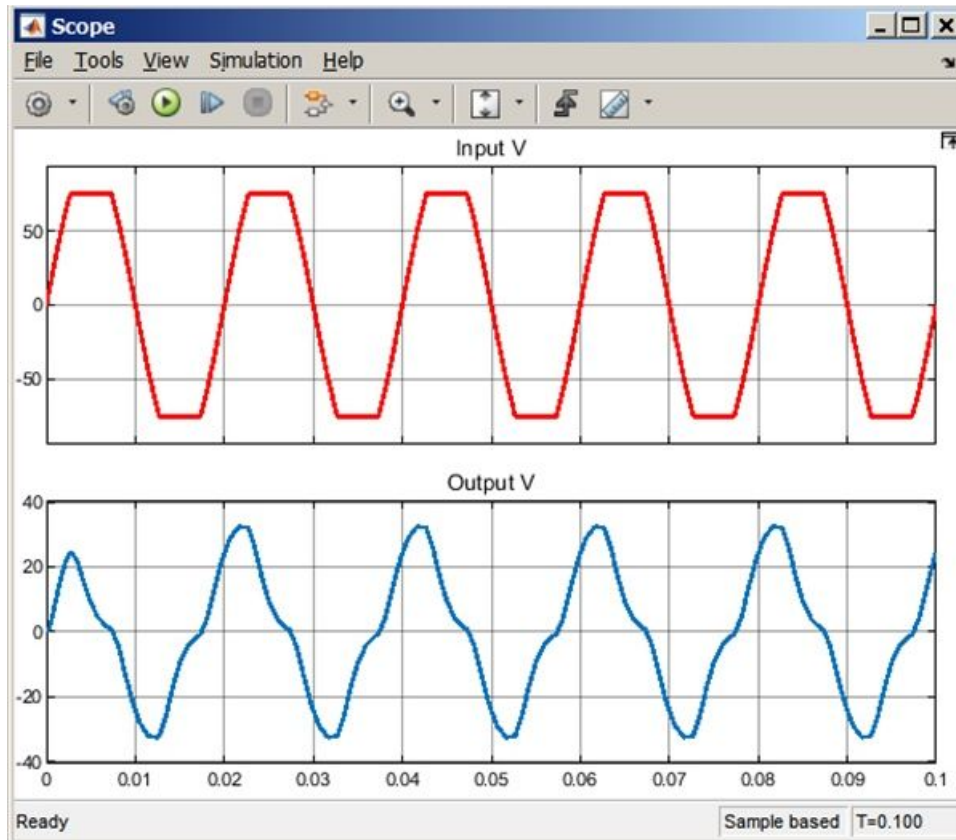


Рисунок 20.30 – Несинусоїдна напруга і її третя гармоніка

Таблиця 20.3 – Результати вимірювання та розрахунків

Досліджувана напруга			№ гармоніки	Результати вимірювання	Результати розрахунків
Форма	Амплітуда, В	Частота, Гц	k	Амплітуда вихідної напруги k -ої гармоніки, В	L (Гн), C (Ф)
			0		
			1		
			2		
			3		
			4		
			5		
			6		
			7		

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиці. Графіки.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Тригонометрична, амплітудно-фазова та комплексна форма ряду Фур'є.
2. Як визначаються коефіцієнти ряду Фур'є?
3. Які види керуючих сигналів Ви знаєте?
4. Як обчислюються коефіцієнт глибини модуляції?
5. Запишіть аналітичний вираз амплітудно-модульованого коливання.
6. Який вигляд має спектр амплітудно-модульованого коливання при тональній модуляції та модуляції складним сигналом?
7. Запишіть аналітичний вираз фазно-модульованого коливання при гармонічній модуляції й у загальному випадку.

21 ВИВЧЕННЯ СПЕКТРІВ ПЕРІОДИЧНИХ НЕГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ

1. Мета роботи

Вивчити можливості апроксимації сигналу многочленом Фур'є за ортогональною системою тригонометричних функцій.

2. Теоретична частина

Для синтезу складних сигналів як ортогональну систему функцій можна використовувати систему тригонометричних функцій кратних аргументів, ортогональну на відрізку T . Періодичний сигнал може бути представлений за допомогою ряду Фур'є. Наведемо розклади в ряд Фур'є деяких сигналів ($\omega = \frac{2\pi}{T}$):

- прямокутного коливання - "меандру" (рис. 21.1);

$$s(t) = \frac{4E}{\pi} \times \left(\frac{\cos\omega t}{1} - \frac{\cos 3\omega t}{3} + \frac{\cos 5\omega t}{5} - \dots \right); \quad (21.1)$$

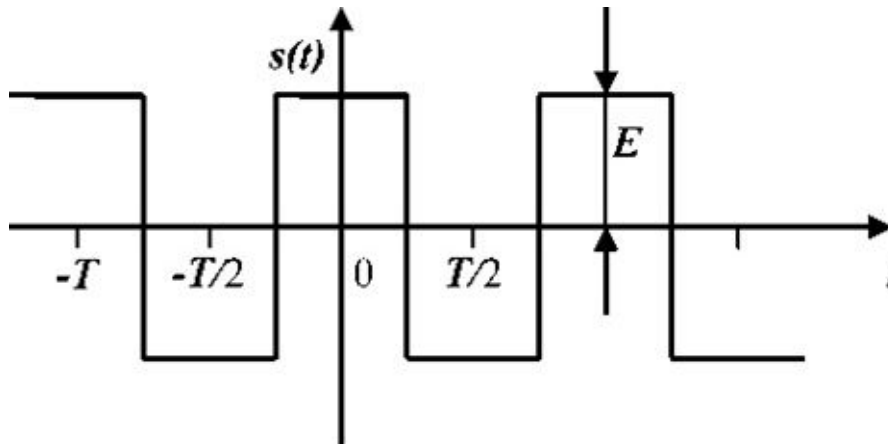


Рисунок 21.1 – Графік прямокутного коливання - "меандру"

- пилоподібного коливання (рис. 21.2);

$$s(t) \approx \frac{2E}{\pi} \left(\sin\omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t - \dots \right); \quad (21.2)$$

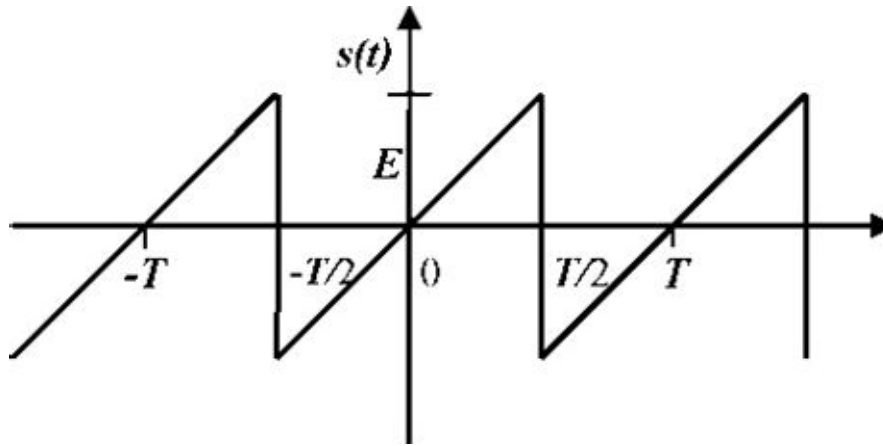


Рисунок 21.2 – Графік періодичного пилоподібного коливання - періодичної послідовності трикутних імпульсів (рис. 21.3)

$$s(t) \approx \frac{8E}{\pi^2} \left(\cos\omega t + \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t + \frac{1}{49} \sin 7\omega t + \dots \right). \quad (21.3)$$

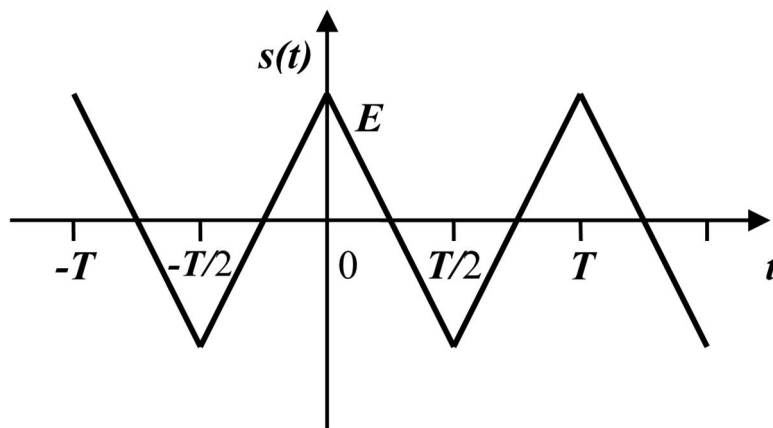


Рисунок 21.3 – Графік періодичної послідовності трикутних імпульсів

Сигнали з тональною (гармонічною) амплітудною і кутовою модуляцією можуть бути синтезовані за ортогональною системою тригонометричних функцій кратних аргументів, якщо несуча частота ω_0 і модулююча частота ω кратні, тобто $\omega_0 = n\omega$, де n – ціле число.

При амплітудній модуляції модульоване коливання можна подати у вигляді

$$a(t) = [A_0 + ks(t)] \cos(\omega_0 t + \theta_0).$$

У випадку тональної модуляції $s(t) = A_m \cos(\omega t + \gamma)$ аналітичний вираз амплітудної модуляції коливання набуває вигляду:

$$a(t) = A_0 [1 + M \cos(\omega t + \gamma)] \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (21.4)$$

де $M = \frac{kM_m}{A_0}$ – коефіцієнт глибини модуляції. У цьому випадку спектр амплітудної модуляції коливання складається з трьох гармонічних складових

$$a(t) = A_0 \cos(\omega t + \theta_0) + \frac{MA_0}{2} \cos[(\omega_0 + \omega)t + \gamma + \theta_0] + \frac{MA_0}{2} \cos[(\omega_0 - \omega)t + \gamma + \theta_0]. \quad (21.5)$$

Якщо модулюючий сигнал описується виразом (21.1), то спектр $\frac{MA_0}{2}$ коливання при $kE = A_0$ і $\theta_0 = 0$ запишеться у вигляді

$$a(t) = A_0 \cos \omega_0 t + \frac{2A_0}{\pi} \cos(\omega_0 + \omega)t + \cos(\omega_0 - \omega)t - \frac{1}{3} \cos(\omega_0 + 3\omega)t - \frac{1}{3} \cos(\omega_0 - 3\omega)t + \frac{1}{5} \cos(\omega_0 + 5\omega)t + \frac{1}{5} \cos(\omega_0 - 5\omega)t \dots \quad (21.6)$$

При гармонічній кутовій модуляції, аналітичний вираз коливання може бути записаний у вигляді

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + m \sin \omega t). \quad (21.7)$$

Спектр такого коливання має вигляд

$$a(t) = A_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m) \cos(\omega_0 t + n\omega)t. \quad (21.8)$$

де $I_n(m)$ – функція Бесселя першого роду n -го порядку (табл. 21.1) від аргументу m ; m - індекс модуляції.

Таблиця 21.1 – Функція Бесселя

n	$I_n(1)$	$I_n(2)$	$I_n(3)$	$I_n(4)$	$I_n(5)$	$I_n(6)$
0	+0,765	+0,224	-0,260	-0,397	-0,178	0,50
1	+0,440	+0,577	+0,339	-0,066	-0,328	-0,27
2	+0,115	+0,353	+0,486	+0,364	0,0466	-0,243
3	+0,020	+0,129	+0,309	+0,430	+0,365	0,115
4	+0,00248	+0,034	+0,132	+0,281	+0,391	0,358
5	+0,00025	+0,007	0,0430	0,132	0,261	0,362
6	0,000021	0,0012	0,0114	0,049	0,131	0,246
7	0,0000015	0,00018	0,00255	0,0152	0,0534	0,130

Відносна періодичної середньоквадратична похибка апроксимації

функції $s(t)$ скінченною кількістю членів ряду Фур'є може бути визначена за формулою

$$\delta = \frac{P - \sum_{n=1}^N P_n}{P}, \quad (21.9)$$

де P – середня потужність сигналу; P_n - середня потужність n -ої ортогональної складової сигналу (гармоніки).

3. План роботи

1. Виберіть згідно з варіантом (табл. 21.2) вигляд періодичного коливання. Розрахуйте і побудуйте його спектри амплітуд і фаз до 10-ї гармоніки включно. Визначте відносну середньоквадратичну похибку апроксимації сигналу зі скінченною кількістю ортогональних складових.

Таблиця 21.2 – Варіанти періодичного несинусоїдного коливання

Варіант	Форма періодичних несинусоїдних коливань для дослідження
1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87	Періодичне прямокутне коливання - "меандр" (рис. 21.1) $E = 10 \cdot N$ В, $T = 0.0001$ с.
2, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 82, 8, 18, 28, 38, 48, 58, 68, 78, 88	Періодичне пилоподібне коливання (рис. 21.2) $E = 12 \cdot N$ В, $T = 0.0001$ с.
3, 13, 23, 33, 43, 53, 63, 74, 83, 9, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 79, 89	Періодична послідовність трикутних імпульсів (рис. 21.3) $E = 6 \cdot N$ В, $T = 0.0001$ с.
4, 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74, 84, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	Коливання з тональною амплітудною модуляцією, $A_0 = 6 \cdot N$ В, модулююча частота $F = F_1 = 2$ кГц, несуча частота $f_0 = 5F_i$, коефіцієнт модуляції $M = 0.5$; 1 і $M > 1$.
5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85	Амплітудна модуляція коливання при модуляції "меандром", якщо несуча частота $f_0 = 5F_i$, частота повторення "меандру" $F = F_1 = 2$ кГц, $k_E = A_0 = 6 \cdot N$ В.
6, 16, 26, 36, 46, 56, 66, 76, 86	Коливання з гармонічною кутовою модуляцією, якщо $A_0 = 6 \cdot N$ В, модулююча частота $F = F_1 = 2$ кГц, несуча частота $f_0 = 5F_1$, індекс модуляції $m = 1, 2, 3$.

2. Складіть схему для дослідження амплітуди (рис. 21.4), частоти та

початкові фази гармонік установіть відповідно до розрахованих.

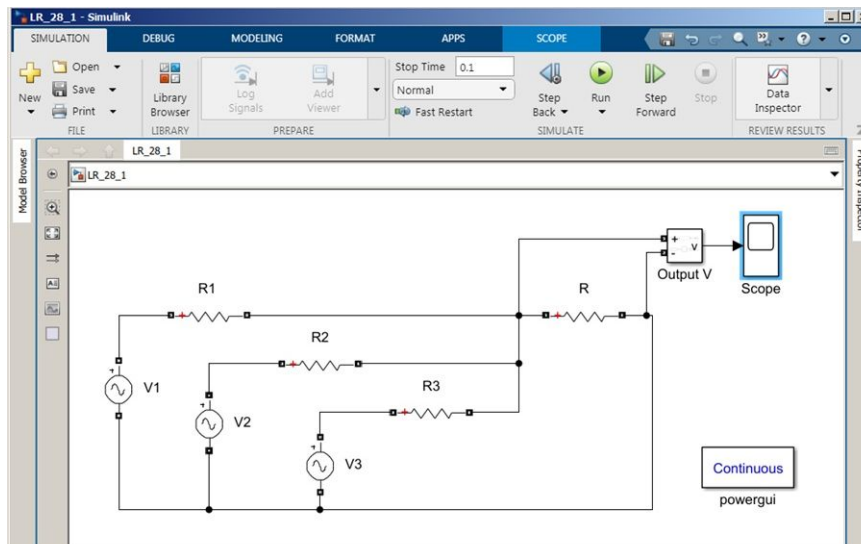


Рисунок 21.4 – Досліджувана схема

3. Вмикаючи по чергово кожну гармоніку окремо, перевірте за осцилографом правильність установки параметрів гармонік.

4. Увімкніть одна за одною гармоніки і спостерігайте на екрані осцилографа формування сигналу. Усі осцилограми нарисуйте.

5. Розрахуйте та побудуйте спектри амплітуд і фаз періодичного коливання. Визначте відносну середньоквадратичну похибку апроксимації сигналу скінченною кількістю ортогональних складових.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи

2. Схема для синтезу сигналів Фур'є. Досліджувані схеми. Таблиці. Графіки.

3. Розрахунки та графіки спектрів синтезованого сигналу. Осцилограми, які ілюструють формування сигналу при його синтезі. Розрахунки похибок апроксимації.

4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Тригонометрична, амплітудно-фазова та комплексна форма ряду Фур'є.

2. Як визначаються коефіцієнти ряду Фур'є?

3. Які види керуючих сигналів Ви знаєте?

4. Як обчислюються коефіцієнт глибини модуляції?
5. Запишіть аналітичний вираз амплітудно-модульованого коливання.
6. Який вигляд має спектр АМ коливання при тональній модуляції та модуляції складним сигналом?
7. Запишіть аналітичний вираз ФМ коливання при гармонічній модуляції й у загальному випадку.

22 АНАЛІЗ ЛІНІЙНОГО КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ.

1. Мета роботи

Вивчити методикау комплексного дослідження однофазного електричного кола періодичного негармонічного струму.

2. Теоретична частина

Забезпечення надійної роботи електричного кола несинусоїдного струму вимагає аналітичних та експериментальних досліджень його режимів, мета яких – визначення активних потужностей, а також максимальних значень напруг та струмів окремих елементів.

3. План роботи

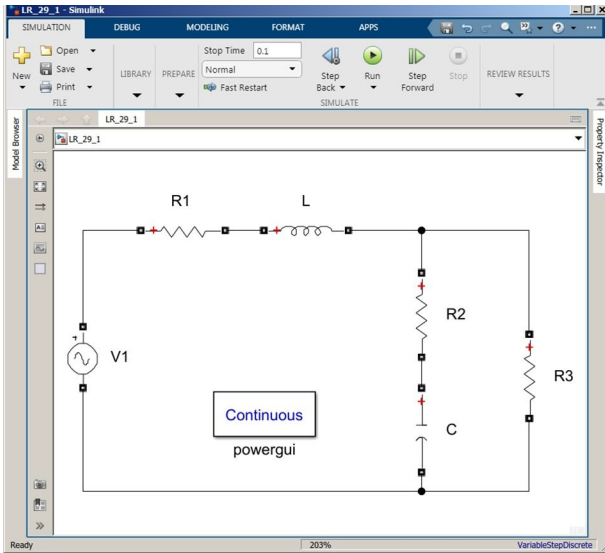
1. Схема досліджуваного кола та параметри обираються згідно з варіантом за рис. 22.2 і табл. 22.1.

Таблиця 22.1 – Варіанти параметрів схем (рис. 22.2)

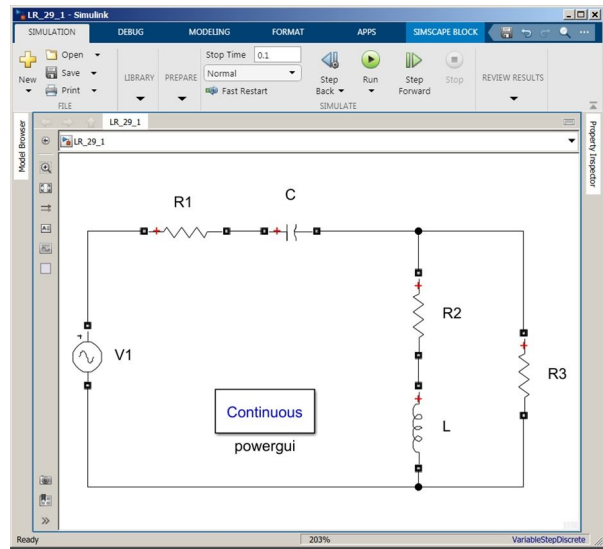
Варіант	Параметри джерела		Форма сигналу	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	$L, \text{ мГн}$	Схема
	$U_{\text{max}}, \text{ В}$	$f, \text{ Гц}$							
1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81	$1,3 \cdot N$	$10 \cdot N$	П	$10 + N$	$75 + N$	$0,5 \cdot N$	$40 + N$	$15 + N$	а
2, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 82	$1,7 \cdot N$	$13 \cdot N$	Т	$15 + N$	$75 + N$	$0,5 \cdot N$	$50 + N$	$20 + N$	б
3, 13, 23, 33, 43, 53, 63, 74, 83	$1,5 \cdot N$	$15 \cdot N$	П	$20 + N$	$50 + N$	$0,25 \cdot N$	$60 + N$	$10 + N$	в
4, 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74, 84	$20 \cdot N$	$18 \cdot N$	Т	$15 + N$	$50 + N$	$0,1 \cdot N$	$30 + N$	$10 + N$	г
5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85	$12 \cdot N$	$20 \cdot N$	П	$10 + N$	$30 + N$	$0,1 \cdot N$	$30 + N$	$20 + N$	а
6, 16, 26, 36, 46, 56, 66, 76, 66	$16 \cdot N$	$22 \cdot N$	Т	$15 + N$	$30 + N$	$0,25 \cdot N$	$35 + N$	$20 + N$	б
7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87	$14 \cdot N$	$24 \cdot N$	П	$20 + N$	$60 + N$	$0,4 \cdot N$	$45 + N$	$15 + N$	в

Варіант	Параметри джерела		Форма сигналу	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$	$L, \text{ мГн}$	Схема
	$U_{\text{max}}, \text{ В}$	$f, \text{ Гц}$							
8, 18, 28, 38, 48, 58, 68, 78, 88	$19 \cdot N$	$25 \cdot N$	Т	$20 + N$	$60 + N$	$0,4 \cdot N$	$35 + N$	$20 + N$	г
9, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 79, 89	$18 \cdot N$	$14 \cdot N$	П	$15 + N$	$40 + N$	$0,3 \cdot N$	$55 + N$	$15 + N$	а
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	$22 \cdot N$	$41 \cdot N$	Т	$15 + N$	$40 + N$	$0,3 \cdot N$	$55 + N$	$25 + N$	б

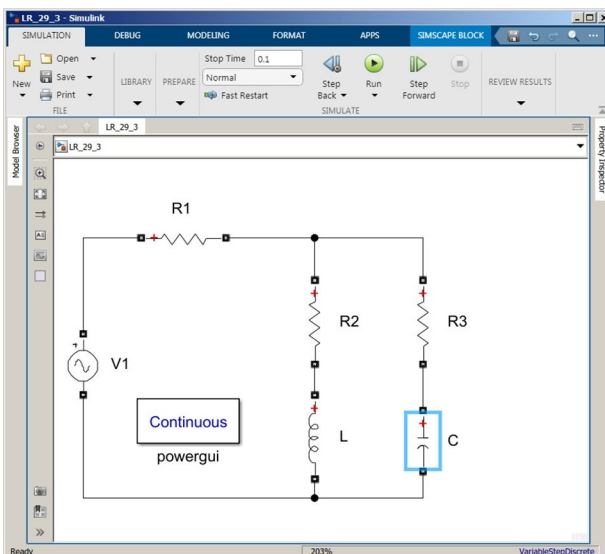
*) П(Т) – сигнал прямокутної (трикутної) форми зі шаруватістю (T/t_i), яка дорівнює 2.



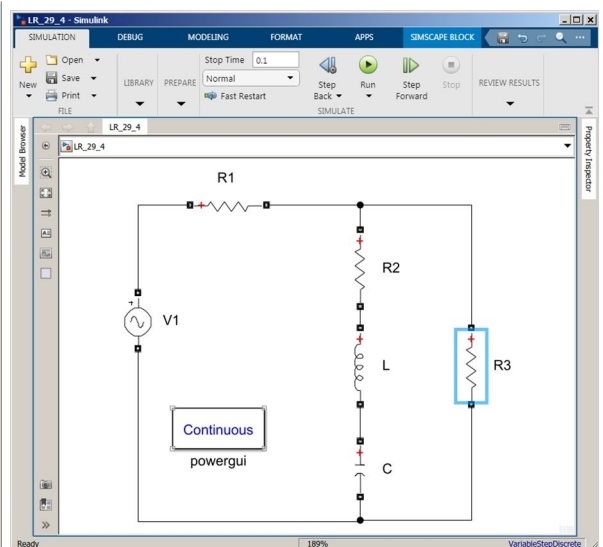
а)



б)



в)



г)

Рисунок 22.2 – Досліджувані схеми

В експериментальній частині як джерело вхідної напруги, треба вибрати функціональний генератор, а для вимірювання миттєвих значень струмів і напруги – блоки *Fourier* та *Display*.

2. Розклад вхідної напруги кола на гармонічні складові.

2.1 Розкладіть напругу джерела на гармонічні складові, до п'ятої включно. Результати гармонічного аналізу внесіть у табл. 22.2.

Таблиця 22.2 – Гармонічні складові напруги джерела

$k = 1$		$k = 3$		$k = 5$	
$U_{m1}, \text{В}$	$\psi_{U1}, \text{град}$	$U_{m3}, \text{В}$	$\psi_{U3}, \text{град}$	$U_{m5}, \text{В}$	$\psi_{U5}, \text{град}$

2.2. На основі знайдених гармонічних складових напруги джерела і параметрів елементів розрахуйте в заданому колі миттєві значення струмів віток i , i_1 , i_2 та напруги на котушці U_K і конденсаторі U_C . Результати розрахунків зведіть у табл. 22.3.

Таблиця 22.3 – Гармонічні складові струмів і напруг кола

Складові	$k = 1$		$k = 3$		$k = 5$	
	За п.2.1	За п.4.1	За п.1.1	За п.4.1	За п.1.1	За п.4.1
$I_m, \text{мА}$						
$\psi_i, ^\circ$						
$I_{m1}, \text{мА}$						
$\psi_{i1}, ^\circ$						
$I_{m2}, \text{мА}$						
$\psi_{i2}, ^\circ$						
$U_{mK}, \text{В}$						
$\psi_{U_K}, ^\circ$						
$U_{mC}, \text{В}$						
$\psi_U, ^\circ$						

2.3. За знайденими миттєвими значеннями струмів і напруги визначте їх діючі та максимальні значення. Обчисліть коефіцієнти амплітуди K_a і спотворень K_c .

Коефіцієнт амплітуди K_a дорівнює відношенню максимального значення до діючого

$$K_a = \frac{A_m}{A}.$$

Для синусоїди $K_a = \sqrt{2} = 1,41$.

Коефіцієнт спотворення K_c визначають як відношення діючого значення основної гармоніки до діючого значення несинусоїдної величини

$$K_c = \frac{A_1}{A}.$$

Для синусоїди $K_c = 1$ (для несинусоїдного струму $K_c < 1$).

Результати розрахунків зведіть у табл. 22.4.

Таблиця 22.4 – Результати розрахунків струмів і напруг

Характеристика досліджуваних величин	Досліджувані величини				
	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	u_L , В	u_C , В
Діючі значення					
Максимальні значення					
Коефіцієнт спотворень K_c					
Коефіцієнт амплітуди K_a					

2.4. Розрахуйте активні потужності джерела P_D та елементів кола P_{R1} , P_{R2} , P_{R3} .

Активна потужність

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1,3,5}^5 U_k I_k \cos \varphi_k = P_0 + P_1 + P_3 + P_5,$$

де U_k , I_k – діючі значення напруги та струму k -ї гармоніки; $\varphi_k = \psi_{ku} - \psi_{ki}$ – зсув фаз між k -ю гармонікою напруги та k -ю гармонікою струму.

Результати розрахунків потужностей окремих гармонік зведіть у табл. 22.5.

Таблиця 22.5 – Гармонічні складові потужностей

Складові	$k = 1$		$k = 3$		$k = 5$	
	За п.2.1	За п.4.1	За п.1.1	За п.4.1	За п.1.1	За п.4.1
P_D , Вт						
P_{R1} , Вт						
P_{R2} , Вт						
P_{R3} , Вт						

Результати розрахунків зведіть у табл. 22.6.

Таблиця 22.6 – Розраховані та експериментально знайдені величини

Порівнювальні величини	P_D , Вт	P_{R1} , Вт	P_{R2} , Вт	P_{R3} , Вт	I_{Km} , мА	U_{Km} , В	U_{Cx} , В
Розраховані у п.2.4							
Експериментальні з п.5.1							

3. Розрахунок миттєвих значень струмів віток і напруг котушки та конденсатора.

3.1. Зніміть осцилограми струмів віток та напруг котушки і конденсатора.

3.2. Усі зняті осцилограми повинні бути оформлені у звіті у вигляді графіків $i(t)$, $u(t)$.

4. Визначення діючих і максимальних значень розрахованих напруг і струмів та обчислення коефіцієнтів, які характеризують форму досліджуваних величин.

4.1. Розкладіть експериментально отримані часові залежності (осцилограми) струмів і напруг на гармонічні складові до п'ятої включно. Результати внесіть у табл. 22.3.

4.2. Визначте за осцилограмами максимальні та діючі значення величин, обчисліть коефіцієнти амплітуди та спотворень. Результати внесіть у таблицю, аналогічну до табл. 22.7.

Таблиця 22.7 – Результати розрахунків струмів і напруг

Характеристика досліджуваних величин	Досліджувані величини				
	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	u_L , В	u_C , В
Діючі значення					
Максимальні значення					
Коефіцієнт спотворень K_c					
Коефіцієнт амплітуди K_a					

5. Обчислення активних потужностей елементів і кола в цілому.

5.1 За діючими значеннями струмів (табл. 22.7) та опорамі елементів визначте активні потужності. Дані занесіть у табл. 22.6.

5.2. Зробіть висновки по виконану роботу, зверніть увагу на дії, що призвели до розбіжностей експериментальних і розрахованих значень величин,

а також на особливості вимірювань у колах періодичного негармонічного струму.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиці. Графіки.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Як провести розклад несинусоїдної напруги в тригонометричний ряд?
2. Який зв'язок між максимальним, діючим і середнім значеннями несинусоїдних періодичних ЕРС, струму і напруги?
3. Якими коефіцієнтами характеризують форму несинусоїдних періодичних кривих?
4. Який порядок розрахунку кіл із несинусоїдними періодичними ЕРС, напругами і струмами?
5. Як розрахувати потужність у колах несинусоїдного струму?

23 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ З ІНДУКТИВНІСТЮ

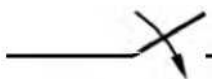
1. Мета роботи

Дослідження аперіодичних перехідних процесів при комутаціях в електричному колі постійного струму.

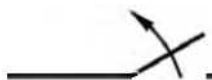
2. Теоретична частина

Під **перехідними процесами** розуміють процеси переходу від одного усталеного режиму роботи електричного кола до іншого, будь чим відрізняється від попереднього: величиною ЕРС, параметрами тощо. Перехідні процеси виникають внаслідок ввімкнення або вимкнення пасивних або активних ділянок кола; короткого замикання окремих ділянок кола, різного роду переключень, раптової зміни параметрів і т.п. Всі ці зміни називаються **комутаційними змінами** або просто **комутацією**.

Замкнення кола зображують на розрахункових схемах так:



Розімкнення кола зображують на розрахункових схемах так:



Будемо вважати, що при замиканні і розмиканні електричного кола дуга не виникає, а комутація проходить у момент часу $t = 0$.

Розглянемо ввімкнення ділянки кола з котушкою (рис. 23.1).

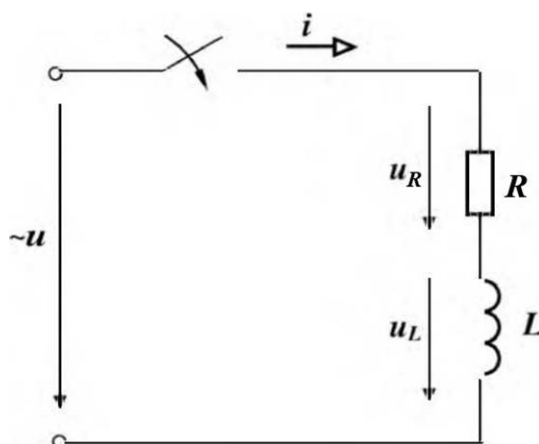


Рисунок 23.1 – Розрахункова схема ввімкнення ділянки кола з котушкою

До комутації струм у електричному колі дорівнював нулю. Після

комутації у відповідності з другим законом Кірхгофа можемо записати

$$u = u_R + u_L. \quad (23.1)$$

Якщо припустити, що в момент комутації ($t = 0$) струм зміниться стрибком, то $u = \infty$ і другий закон Кірхгофа не буде виконуватися. Тому в даному випадку в момент комутації сила струму дорівнює нулю.

З енергетичної точки зору неможливість миттєвої зміни струму в індуктивності пояснюється неможливістю зміни стрибком енергії, накопиченої в котушці. Енергія магнітного поля котушки

$$W_L = \frac{Li^2}{2}. \quad (23.2)$$

Миттєва потужність в індуктивності

$$p_L = \frac{dW_L}{dt} = Li \frac{di}{dt}. \quad (23.3)$$

Якби струм у момент часу $t = 0$ змінився стрибком, це привело б до виділення в індуктивності нескінченно великої потужності, що неможливо з фізичної точки зору.

Таким чином, можна сформулювати **перший закон комутації**: у будь-якому розгалуженні з індуктивністю струм і магнітний потік у момент комутації зберігають ті значення, які вони мали до комутації, і далі починають змінюватися від цих значень.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 23.2).

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources*, знайдіть блок *DC Voltage Source*, перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть його ім'я на *E*, відкрийте таблицю параметрів блоку та задайте нові параметри блоку *Amplitude* $10+2 \times N$ та *Measurements* – *None*.

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*, знайдіть блок *Series RLC Branch* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте лише активний опір $1+0,1 \times N$ Ом, у рядку 164

Measurements задайте **Branch voltage and Current**.

Скопіюйте блок *R1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть активний опір $2+0,2\times N$, у рядку **Measurements** задайте **Branch voltage and Current**.

Вставте у вікно моделі ще одну копію блоку *R1*, поміняйте ім'я блоку на *L*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте індуктивність $0,01\times N$, в рядку **Measurements** задайте **Branch voltage and Current**.

Відкрийте папку **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Grid Elements**, знайдіть блок **Breaker** і перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть ім'я блоку на *S1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте **Initial status** (вихідний стан) – 0, **Switching times** (час включення) – 0, **Breaker resistance Ron** (опір вимикача в стані «ввімкнено») – 0.001, **Snubber resistance Rs** (захисний опір) – $1e-6$, **Measurements** – **Branch voltage and Current**.

Скопіюйте блок *S1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *S2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть **Switching times** (час включення) – $60e-3$.

Відкрийте бібліотеку **Simulink**, відкрийте папку **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities**, знайдіть блоки **Ground** і перетягніть їх мишкою у вікно моделі.

Розташуйте блоки відповідно до схеми моделі (рис. 23.2) і з'єднайте виходи блоків із відповідними входами.

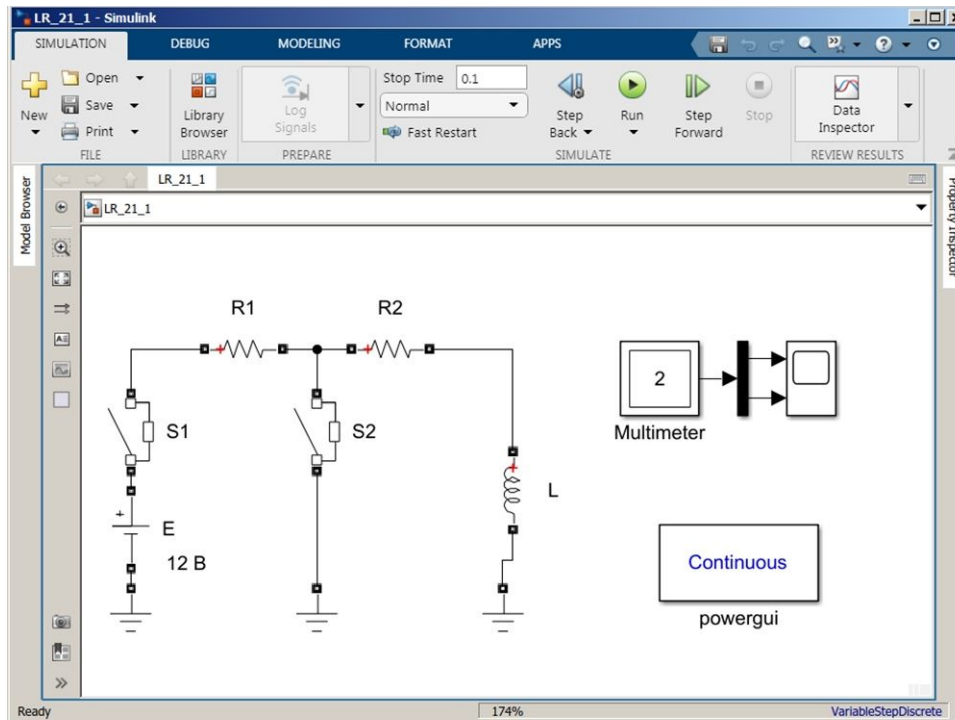


Рисунок 23.2 – Схема моделі для дослідження перехідних процесів у колі RL

Відкрийте папку *Simulink / Commonly Used Blocks*, знайдіть блок *Demux* (розділювач), перетягніть його мишкою у вікно моделі та з'єднайте його вхід із виходом блоку *Multimeter*. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Demux* і вкажіть кількість виходів 2.

Відкрийте папку *Simulink / Sinks*, знайдіть блок *Scope* (осцилоскоп) і перетягніть його мишкою у вікно моделі, задайте число входів 2 і з'єднайте їх із виходами блоку *Demux*. В меню *View* виберіть команду *Layout* і встановіть два вертикальних макета.

Відкрийте папку *Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements*, знайдіть блок *Multimeter*, перетягніть його мишкою у вікно моделі. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Multimeter*, виділіть у лівому вікні напругу індуктивності $U_{b:L}$ і струм індуктивності $I_{b:L}$ (рис. 23.3) і переведіть їх у праве вікно (виміри, що використовуються результати).

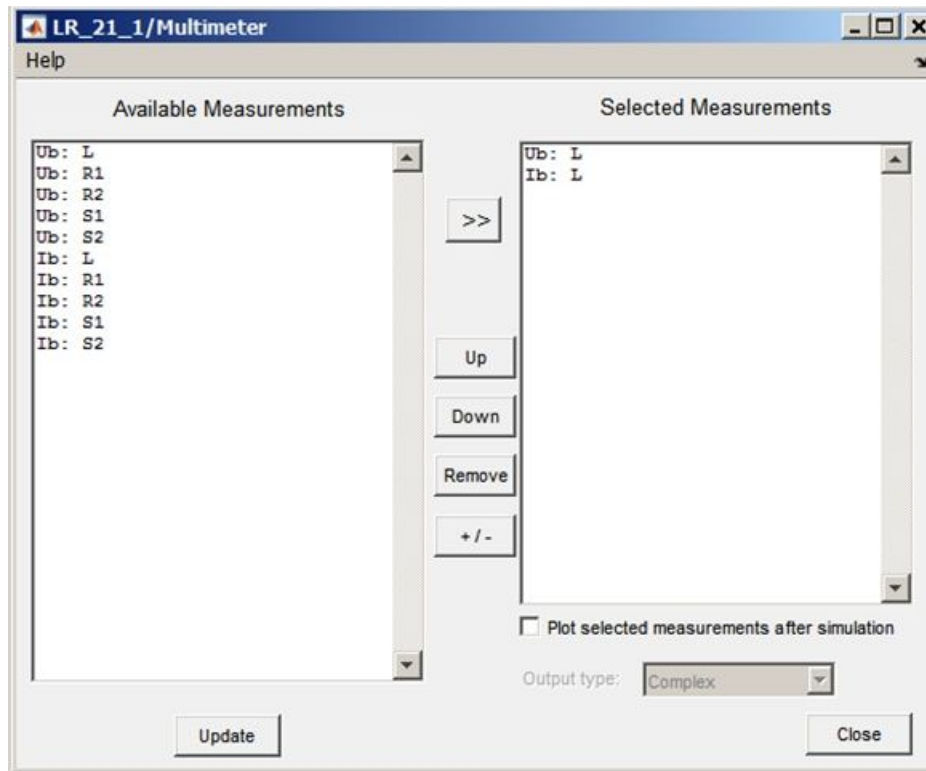


Рисунок 23.3 – Таблиця параметрів блоку Multimeter

Встановіть параметри моделювання: час початку – 0, час кінця – 0.01, крок-змінний, *ode23s*, натисніть **OK** і запусіть моделювання.

2. Відкрийте блок **Scope**, визначте за графіками характер перехідного процесу та його тривалість, знайдіть миттєві значення напруги та струму ємності при вмиканні ключа *S1* та при вмиканні ключа *S2* (рис. 23.4).

3. Перемалюйте осцилограми перехідних процесів u_L та i_L (рис. 23.4).

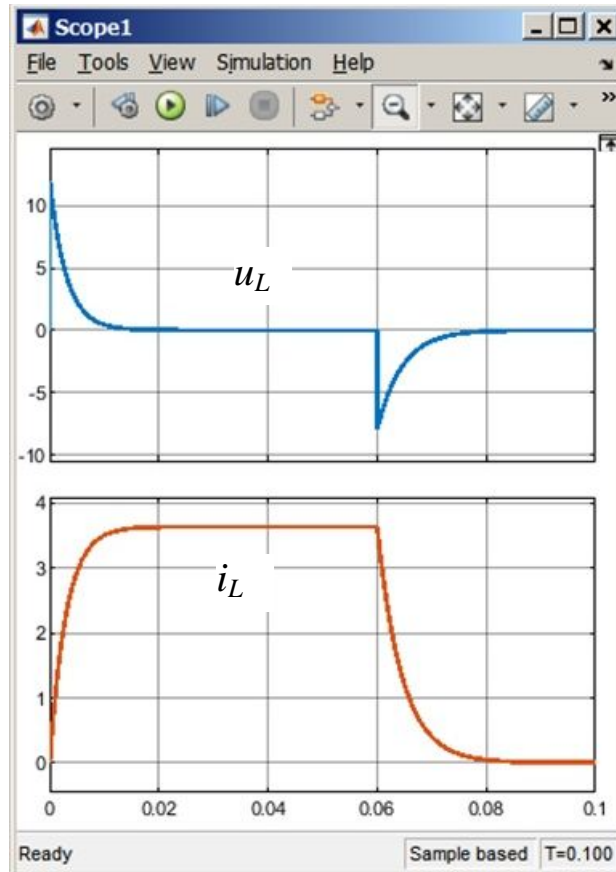


Рисунок 23.4 – Осцилограми напруги та струму індуктивності при вмиканні ключа $S1$ та при вмиканні ключа $S2$

4. Запишіть у **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів індуктивності L :

$$u_L = E * \exp(-t / \tau_1); i_L = E / (R1 + R2) * (1 - \exp(-t / \tau_1)); \tau_1 = L / (R1 + R2);$$

$$u_L = - E * R2 / (R1 + R2) * \exp(-t / \tau_2); i_L = E / (R1 + R2) * \exp(-t / \tau_2); \tau_2 = L / R2.$$

5. Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:L$ та $I_b:L$ на $U_b:R1$ та $I_b:R1$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R1$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R1$.

6. Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:R1$ та $I_b:R1$ на $U_b:R2$ та $I_b:R2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R2$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R2$.

7. Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:R2$ та $I_b:R2$ на $U_b:S2$ та $I_b:S2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних

процесів на ключі S_2 . Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів ключа S_2 .

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте закони комутації.
2. Які фізичні причини виникнення перехідних процесів?
3. Як зміняться криві зарядки при:
 - а) збільшенні ємності у два рази?
 - б) збільшенні опору у два рази?
4. Як ще можна сформулювати закони комутації?
5. Що таке постійна часу кола?

24 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ ТА РОЗРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА

1. Мета роботи

Дослідна перевірка теоретичних положень про перехідні процеси в RC -колі.

2. Теоретична частина

Перехідні процеси виникають у колах під час переходу від одного установленого режиму до іншого. Зміна режиму електричного кола відбувається внаслідок зміни його структури (вмикання, вимикання, коротке замикання віток – однієї або певної їх сукупності). Ці зміни називають комутаціями електричних кіл.

Дослідження перехідного процесу в електричному колі полягає у знаходженні закону зміни перехідної величини та тривалості перехідного процесу.

Закони комутації впливають із закону збереження енергії, накопиченої в реактивних елементах електричного кола (конденсаторах або котушках).

Розглянемо електричне коло (рис. 24.1).

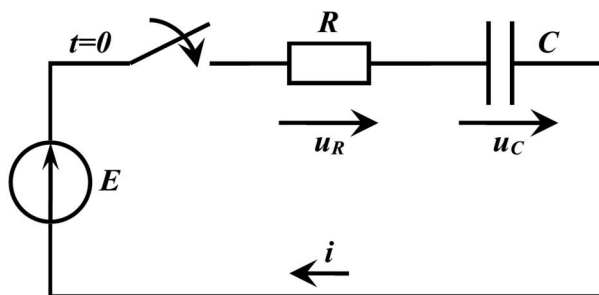


Рисунок 24.1 – RC - коло

За другим законом Кірхгофа, рівняння електричної рівноваги для цього кола після замикання ключа має вигляд

$$Ri + u_C = E. \quad (24.1)$$

З урахуванням того, що струм через конденсатор дорівнює

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad (24.2)$$

рівняння (24.1) запишемо так:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E. \quad (24.3)$$

У такому колі напруга конденсатора в момент комутації не може змінитися стрибком. Для обґрунтування підемо від зворотного, тобто припустимо, що напруга після замикання ключа змінилася стрибком. Тоді похідна $\frac{du_C}{dt}$ у цей момент часу dt прямує до нескінченності. Звідси випливає, що струм, через конденсатор теж нескінченно зростає $i = C \frac{du_C}{dt} \rightarrow \infty$, що не відповідає рівнянню електричної рівноваги (24.3). Отже, припущення про стрибкоподібну зміну напруги конденсатора в момент комутації суперечить другому закону Кірхгофа. На підставі цього можна сформулювати **другий закон комутації**: *напруга на конденсаторі безпосередньо до комутації $u_C(0_-)$ дорівнює напрузі на конденсаторі безпосередньо після комутації $u_C(0_+)$* :

$$u_C(0_-) = u_C(0_+). \quad (24.4)$$

Закони комутації можна також пояснити на підставі таких міркувань. Струми та напруги в електричних колах не можуть досягати нескінченних значень. Отже, миттєва потужність p завжди має скінченне значення. Звідси випливає, що в елементах електричних кіл енергія електричного і магнітного полів не може змінюватися стрибком, тобто потужність $P = \frac{dW}{dt}$ матиме скінченне значення при $dt \rightarrow 0$, а зміна енергії елементів кола $\Delta W = W(0_+) - W(0_-)$ прямуватиме до нуля і дорівнюватиме:

$$W(0_+) = W(0_-). \quad (24.5)$$

Оскільки енергія електричного поля:

$$W_E = \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

то рівняння (24.5) можна записати в такому вигляді:

$$u_C(0_+) = u_C(0_-); \quad (24.6)$$

$$q_C(0_+) = q_C(0_-). \quad (24.7)$$

Рівняння (24.6) і (24.7) виражають закони комутації, отримані вище.

Отже, другий закон комутації можна сформулювати ще й так: напруга та заряд конденсатора в момент комутації за своїми значеннями незмінні.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 24.2).

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources*, знайдіть блок *DC Voltage Source*, перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть його ім'я на *E*, відкрийте таблицю параметрів блоку та задайте нові параметри блоку *Amplitude* $10+2*N$ та *Measurements* – *None*.

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*, знайдіть блок *Series RLC Branch* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте лише активний опір $1+0,1*N$, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Скопіюйте блок *R1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть активний опір $2+0,2*N$, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Вставте у вікно моделі ще одну копію блоку *R1*, поміняйте ім'я блоку на *C*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте ємність $(100*N)e-6$ (*N* – номер варіанта), в рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Grid Elements*, знайдіть блок *Breaker* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть ім'я блоку на *S1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте *Initial status* (вихідний стан) – 0, *Switching times* (час включення) – 0, *Breaker resistance Ron* (опір вимикача в стані «ввімкнено») – 0.001, *Snubber resistance Rs* (захисний опір) – $1e-6$, *Measurements* – *Branch voltage and Current*.

Скопіюйте блок *S1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *S2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть *Switching times* (час включення) – $60e-3$.

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Simscape / Electrical /*

Specialized Power Systems / Utilities, знайдіть блоки **Ground** і перетягніть їх мишкою у вікно моделі.

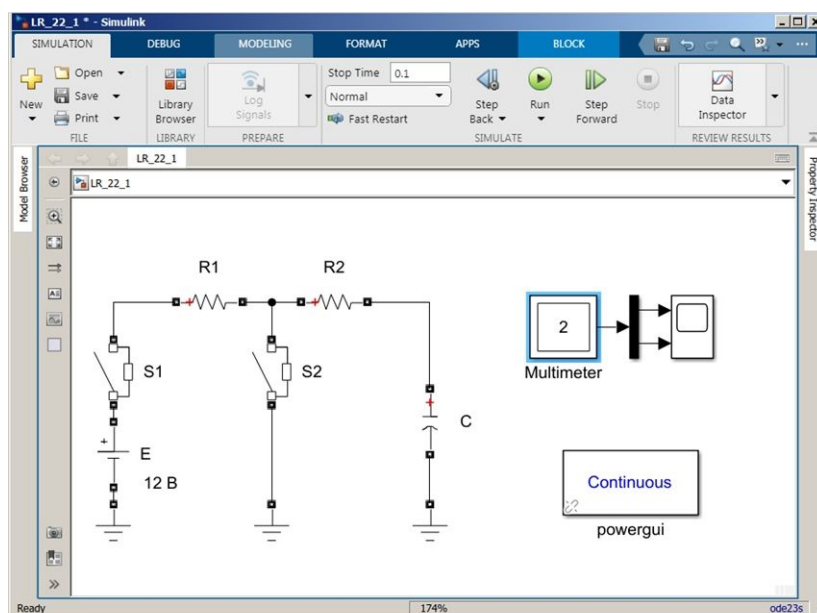


Рисунок 24.2 – Схема моделі для дослідження перехідних процесів у колі *RC*

Відкрийте папку *Simulink / Commonly Used Blocks*, знайдіть блок **Demux** (розділювач), перетягніть його мишкою у вікно моделі та з'єднайте його вхід із виходом блоку **Multimeter**. Відкрийте таблицю параметрів блоку **Demux** і вкажіть кількість виходів 2.

Відкрийте папку *Simulink/Sinks*, знайдіть блок **Scope** (осцилоскоп) і перетягніть його мишкою у вікно моделі, задайте число входів 2 і з'єднайте їх із виходами блоку **Demux**. В меню **View** виберіть команду **Layout** і встановіть два вертикальних макета.

Відкрийте папку *Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements*, знайдіть блок **Multimeter**, перетягніть його мишкою у вікно моделі. Відкрийте таблицю параметрів блоку **Multimeter**, виділіть у лівому вікні напругу на ємності $U_b:C$ та струм ємності $I_b:C$ (рис. 23.3) і переведіть їх у праве вікно (виміри, що використовуються результати).

Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть **Simulation time – Stop time** (час моделювання) **0.01**, **Solver selection – Type** (спосіб моделювання) – **Variable-step** (зі змінним кроком) та **Solver** (метод розрахунку) – **ode 23s**, натисніть **OK** та запустіть моделювання.

Встановіть параметри моделювання: час початку 0, час кінця 0.01, крок-змінний, *ode23s*, натисніть ОК і запустіть моделювання.

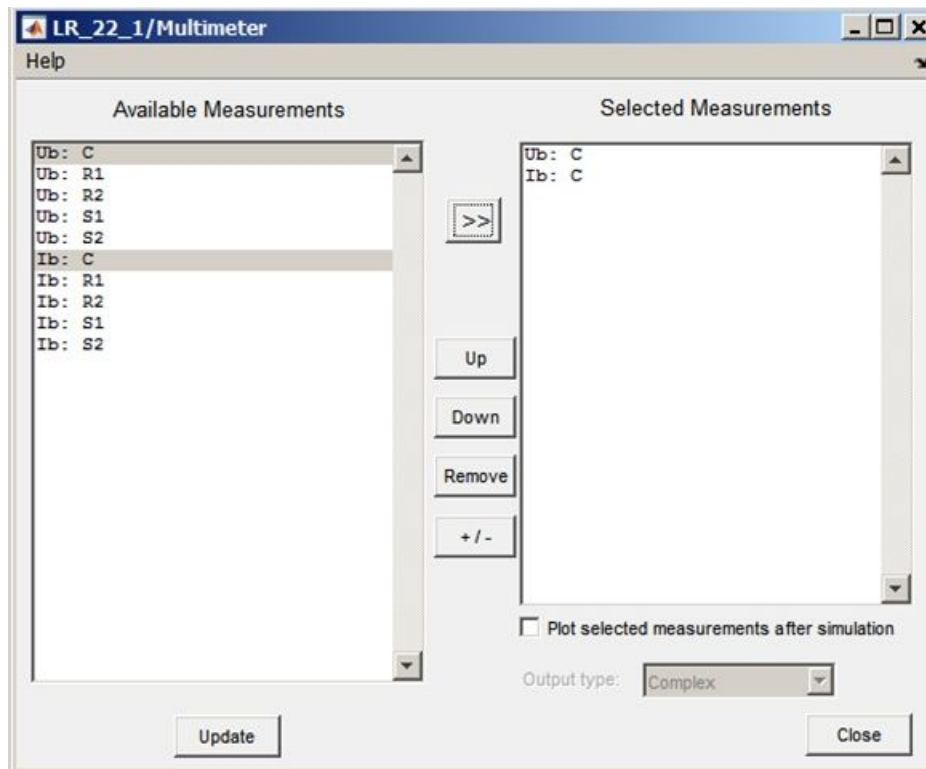


Рисунок 24.3 – Таблиця параметрів блоку Multimeter

2. Відкрийте блок *Scope*, визначте за графіками характер перехідного процесу та його тривалість, знайдіть миттєві значення напруги на ємності та струму ємності при вмиканні ключа *S1* та при вмиканні ключа *S2*.

3. Перемалюйте осцилограми перехідних процесів u_C та i_C (рис. 24.4).

4. Запишіть у *Script (Live Script)* (скрипт) чи *Command Windows* (вікно команд) вирази перехідних значень напруги та струмів ємності *C*:

$$u_C = E \cdot (1 - \exp(-t/\tau_1)); \quad i_C = E / (R_1 + R_2) \cdot \exp(-t/\tau_1); \quad \tau_1 = (R_1 + R_2) \cdot C;$$

$$u_C = E \cdot \exp(-t/\tau_2); \quad i_C = -E / R_2 \cdot \exp(-t/\tau_2); \quad \tau_2 = R_2 \cdot C.$$

5. Замініть у правому вікні блоку *Multimeter* *Ub:C* та *Ib:C* на *Ub:R1* та *Ib:R1*, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі *R1*. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора *R1*.

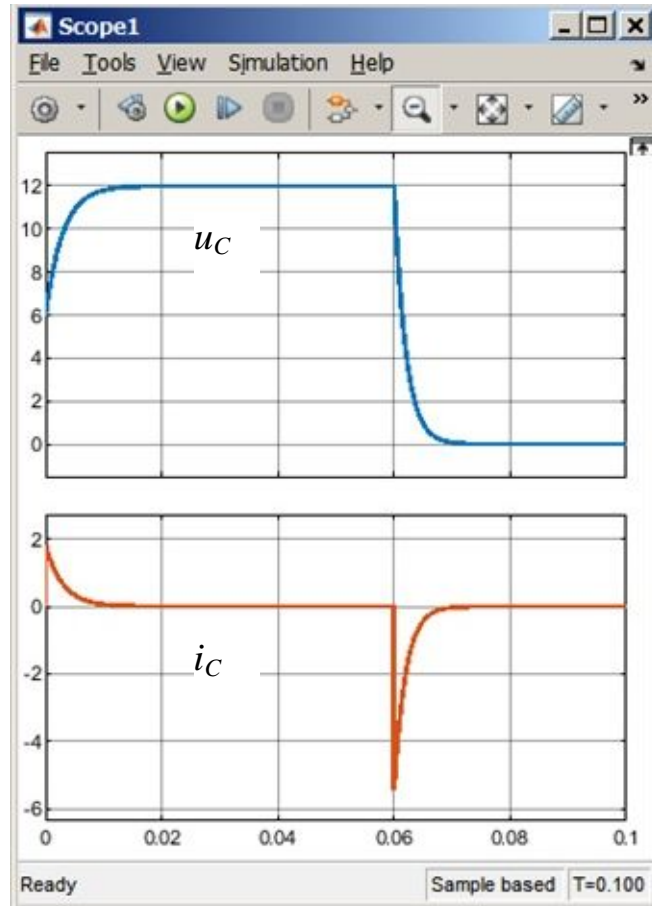


Рисунок 24.4 – Осцилограми напруги та струму ємності при вмиканні ключа $S1$ та при вмиканні ключа $S2$

Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:R1$ та $I_b:R1$ на $U_b:R2$ та $I_b:R2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R2$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R2$.

Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:R2$ та $I_b:R2$ на $U_b:S2$ та $I_b:S2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на ключі $S2$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів ключа $S2$.

6. За даними значеннями R та C обчислити постійні часу τ , 2τ , 3τ , 4τ , 5τ , ($\tau = RC$)

Спостерігати перехідний процес на осцилографі. Подвійним натисканням лівої клавіші мишки по зображенню осцилографа розкрийте його вікно. Запишіть значення напруги у моменти часу τ , 2τ , 3τ , 4τ , 5τ при заряді та розряді.

Дані вимірів та розрахунків внести в табл. 24.1.

Таблиця 24.1 – Результати вимірювань і розрахунків

Час, с	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$u_3(t)$, В						
$u_p(t)$, В						
$i_3(t)$, мА						
$i_p(t)$, мА						

7. За дослідними даними розрахувати струм зарядки $i_3(t)$ для $t = \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$ і струм розряду $i_p(t)$ конденсатора, розраховані дані занести в табл. 24.1.

$$i_3 = \frac{E - u_3}{R},$$

$$i_p = -\frac{u_p}{R}.$$

6. Побудувати графіки $u(t)$, $i(t)$ в одних координатах.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схема дослідження.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Таблиця з даними вимірів та розрахунків, графіки.
5. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Сформулюйте закони комутації.
2. Які фізичні причини виникнення перехідних процесів?
3. Як зміняться криві зарядки при:
 - збільшенні ємності C у два рази?
 - збільшенні опору R у два рази?
4. Як ще можна сформулювати закони комутації?
5. Що таке постійна часу кола?

25 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У НЕРОЗАЛУДЖЕНИХ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

1. Мета роботи:

Дослідження перехідних процесів в простих електричних колах першого та другого порядків при вмиканні на постійну напругу.

2. Теоретична частина

До виконання лабораторної роботи слід приступити після вивчення теорії перехідних процесів в лінійних електричних колах:

- дослідження перехідного процесу в RL -колі.
- дослідження перехідного процесу в RLC -колі у випадку від'ємних дійсних коренів.
- дослідження перехідного процесу в RLC -колі у випадку комплексно спряжених коріннях.

3. План роботи

Дослідження перехідного процесу в RL -колі здійснюється на моделі рис. 25.1. Параметри RL -кола і джерела постійної напруги $R = 50 + N$ Ом, $L = (8 + N)$ мГн, $E = (3 + N)$ В, N – номер варіанта.. Блоком *Multimeter* вимірюється тільки струм в колі (рис. 25.2).

В блоці *Powergui*, на панелі *Tools* натиснути кнопку *Use Linear System Analyzer* і відкрити *Open Linear System Analyzer*. В меню *Edit* вибрати команду *Plot Configuration* і у лівому полі вікна (рис. 25.3), що відкрилося, вмикається прапорець вибору тільки однієї характеристики, а в правому полі - вид цієї характеристики. На рис. 25.3 вибраний відгук кола на стрибок вхідної дії (*step*), тобто перехідний процес при вмиканні кола на постійну напругу. Результати моделювання показані на рис. 25.5. Тут же показано визначення постійною часу кола. Нагадаємо, що при аналізі перехідних процесів в моделі автоматично здійснюється масштабування, тобто вхідний сигнал задається рівним одиниці незалежно від значення напруги джерела.

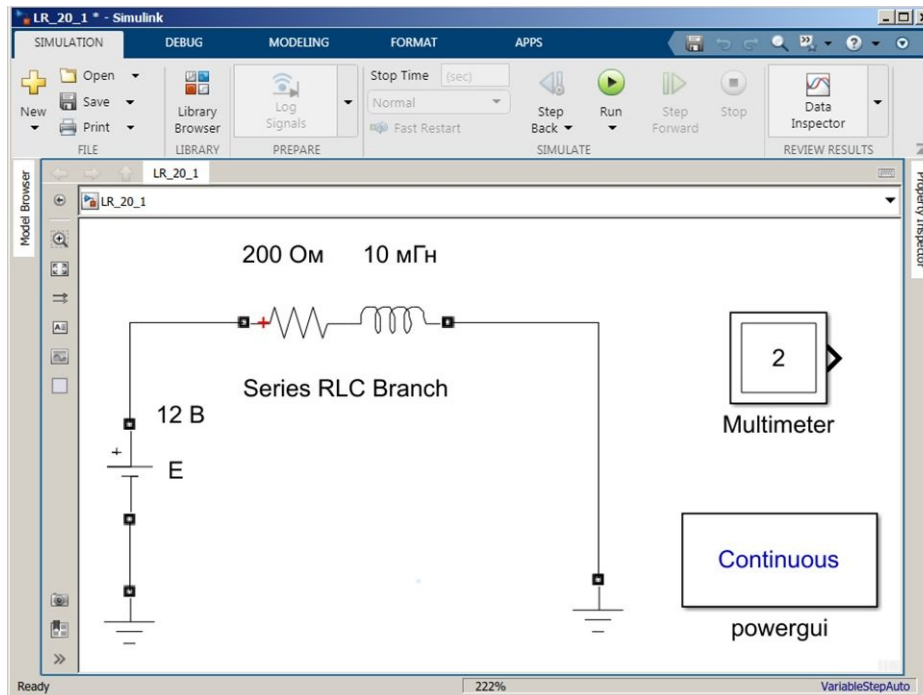


Рисунок 25.1 – Модель для дослідження перехідного процесу в RL -колі

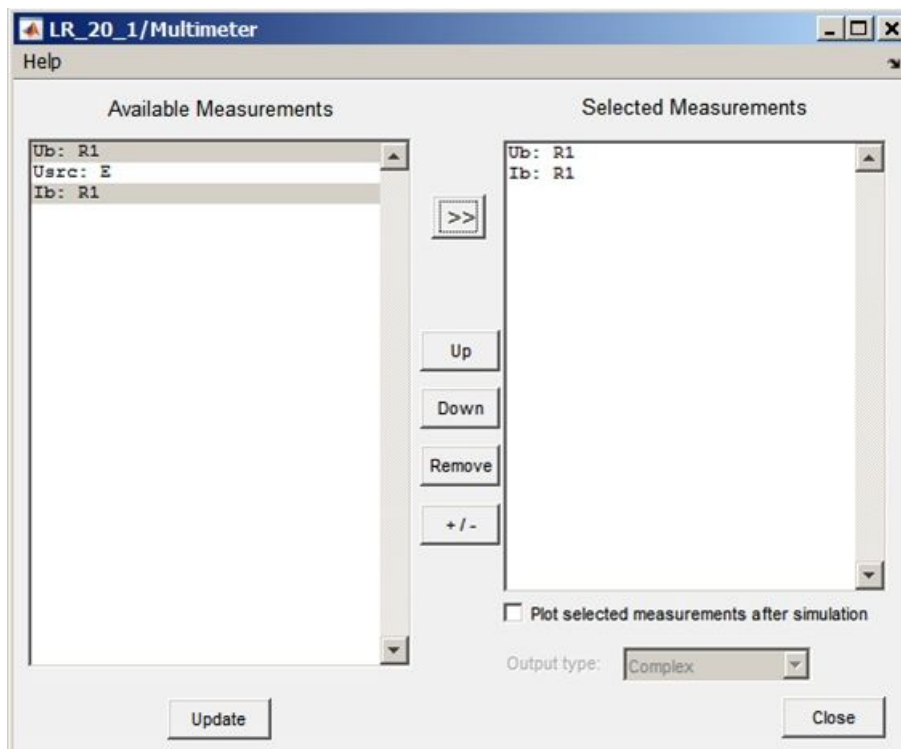


Рисунок 25.2 – Вікно налагодження блоку *Multimeter*

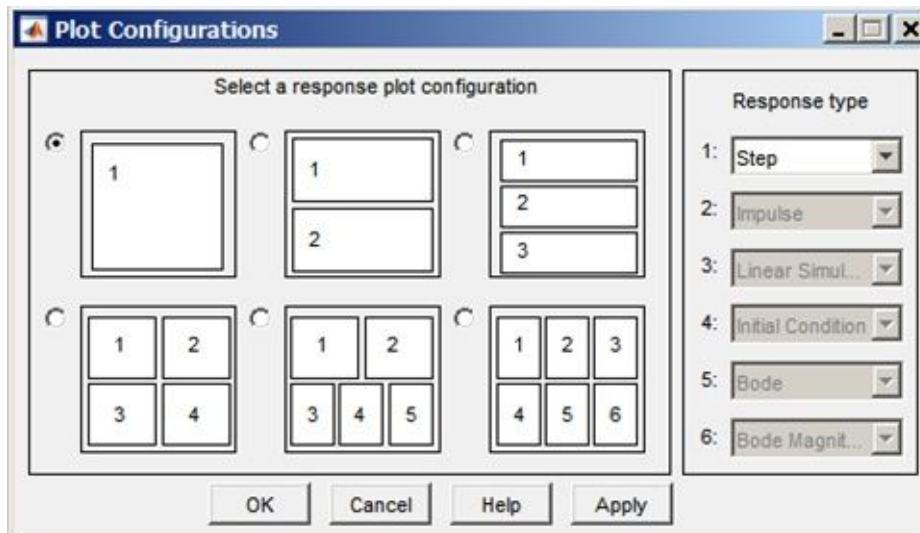


Рисунок 25.3 – Вікно налагодження конфігурації вихідних характеристик

Таблиця 25.1 –Результати вимірювання та обчислення

Параметри			Результати вимірювання			Результати обчислювання	
R , Ом	L , Гн	C , Ф	U_1 , В	U_2 , В	T_0 , с	ω_0 , рад/с	δ_0 , 1/с

Дослідження перехідного процесу в RLC -колі у випадку від'ємних дійсних коренів та у випадку комплексно спряжених коріннях здійснюється на моделі рис. 25.4. Параметри RLC -кола для випадку від'ємних дійсних коренів і для випадку комплексно спряжених коренів задаються викладачем. Викладач задає числове значення тільки одного реактивного елементу. Значення іншого реактивного елементу для випадку комплексно спряжених і від'ємних дійсних коренів студент задає самостійно. Для цього він повинен записати загальний вид коріння характеристичного рівняння, підставити туди задані параметри і отримати параметри, які не задані.

Результати моделювання, що відповідають цим випадкам, показані на рис. 25.5, 25.6. Значення параметрів RLC показано на рис. 25.4. Ці, або близькі до цих, значення слід вибирати при самостійному вивченні матеріалу. За наслідками досліджень, визначаються власна частота коливань і коефіцієнт затухання τ кола. При цьому заповнюється табл. 25.1.

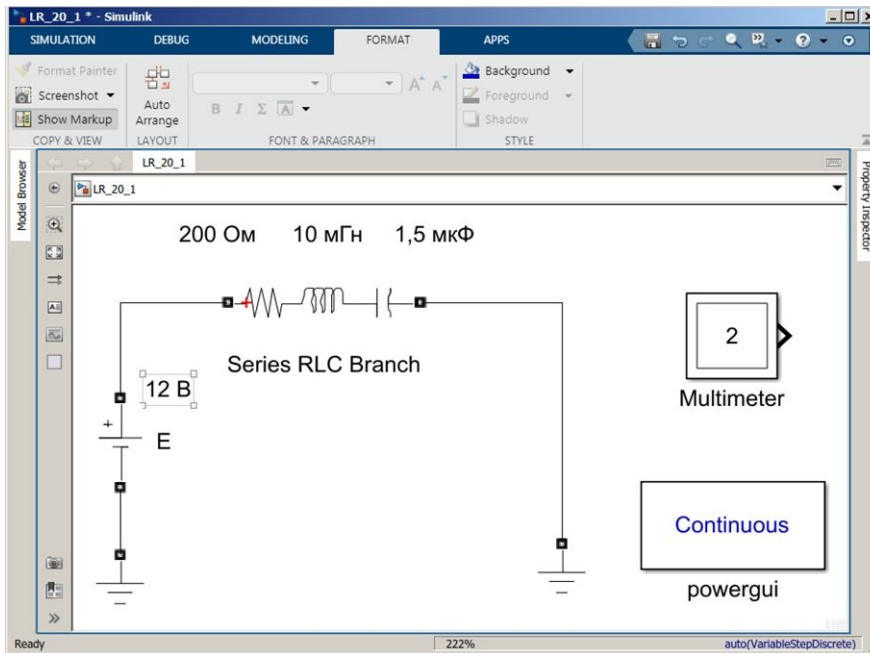


Рисунок 25.4 – Модель для дослідження перехідного процесу в RLC -колі

Отримайте на екрані осцилографа графік досліджуваної величини і визначте згасання δ_0 і період T_0 вільних коливань. При визначенні δ_0 можна скористатися двома послідовними максимальними значеннями U_1 і U_2 згасаючих періодичних коливань. Тоді експериментальне значення

$$\delta_0 = \frac{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}{T_0}.$$

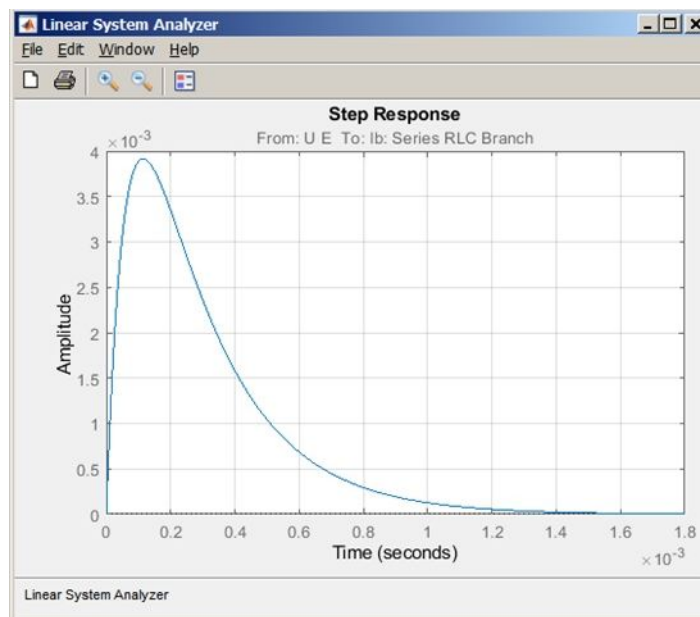


Рисунок 25.5 – Перехідною функція струму при вмиканні RLC -кола (у випадку від'ємних дійсних коренів)

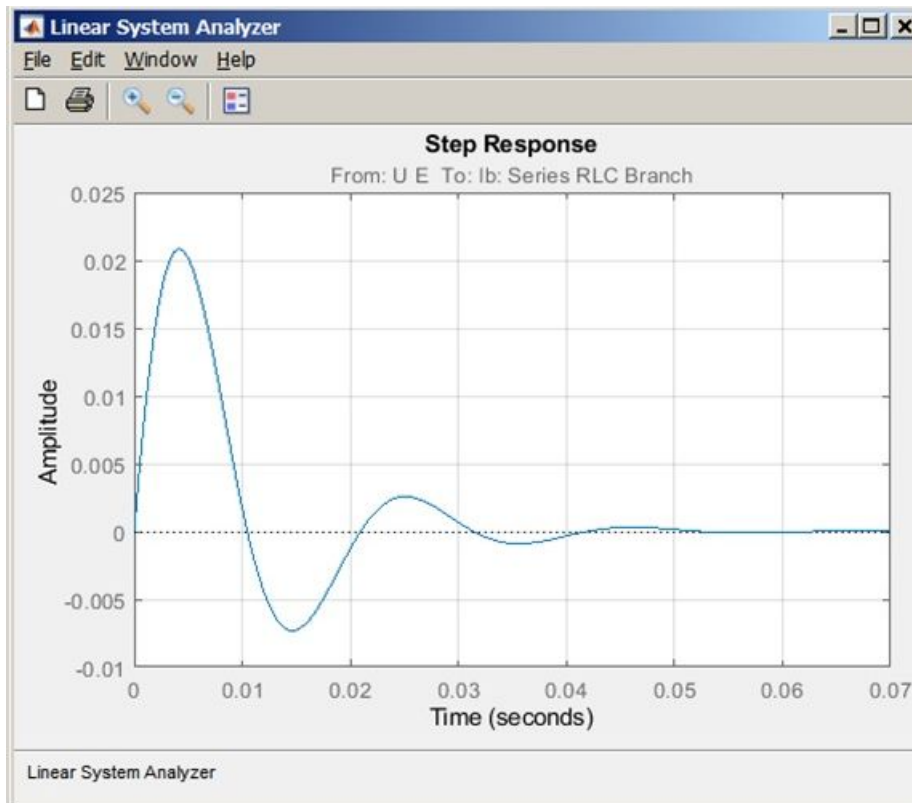


Рисунок 25.6 – Перехідною функція струму при вмиканні RLC -кола (у випадку комплексно спряжених коренів)

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Які закони комутації ви знаєте та на якому базовому фізичному законі вони ґрунтуються?
2. Яка фізична та математична сутність вимушеної і вільної складових перехідного процесу?
3. Якою енергією забезпечується вільна складова перехідного процесу?
4. Що таке стала часу електричного кола та як її можна визначити?
5. За яких умов виникає коливальний або аперіодичний перехідний процес?
6. Що таке початкові умови, якими вони бувають і як визначаються?
7. Як визначити сталі інтегрування загального рішення перехідного

струму

8. Чому виникають перехідні процеси?
9. Які складові мають струми та напруги під час перехідного процесу?
10. Якою енергією забезпечується вільна складова перехідного процесу?
11. Чи можуть змінюватись стрибком напруга і струм котушки індуктивності або напруга і струм конденсатора?

26 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ У РОЗАЛУДЖЕНИХ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

1. Мета роботи

Вивчити методику комплексного дослідження перехідних режимів електричних кіл, щоб визначити вплив різних факторів на вигляд і характеристики процесів за допомогою програми *Simulink*.

2. Теоретична частина

Проектування надійних електронних приладів пов'язане з обов'язковим урахуванням можливих відхилень режиму кола від деякого номінального, що спостерігається, зокрема, при перехідних режимах. Пояснюється це тим, що величини, які характеризують процеси при зміні одного усталеного режиму іншим, можуть істотно відрізнитися від їхніх значень у номінальному режимі.

Основним інструментом під час експериментальних досліджень перехідних режимів є осцилограф, який не лише дає форму часової залежності досліджуваної величини, але й слугує для кількісних вимірювань.

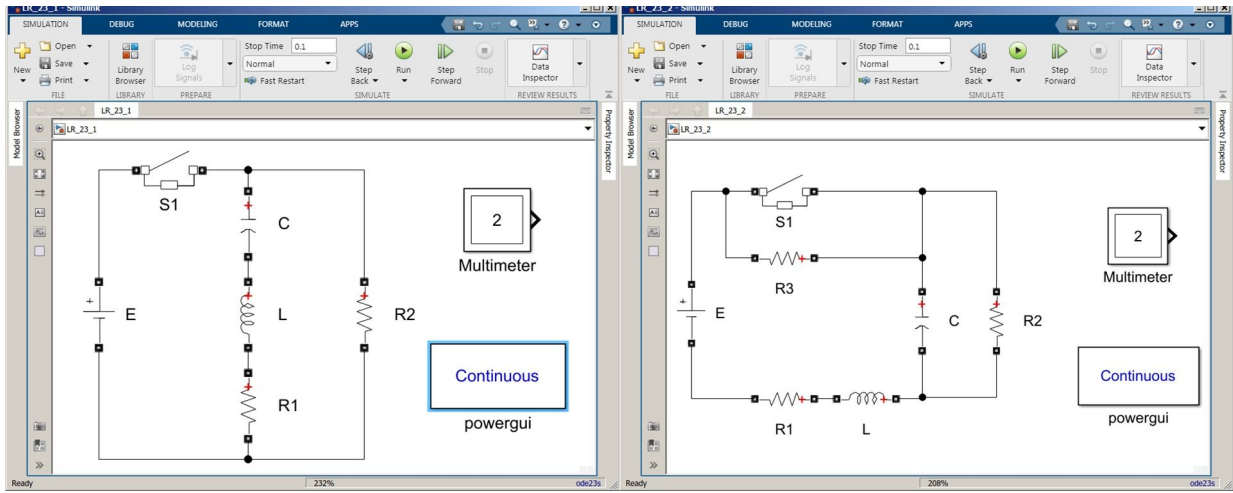
3. План роботи

1. Схема досліджуваного кола та параметри обираються згідно з варіантом за рис. 26.1 і табл. 26.1.

2. Розрахунок опору резистора, який забезпечує періодичний характер перехідного процесу в заданому колі.

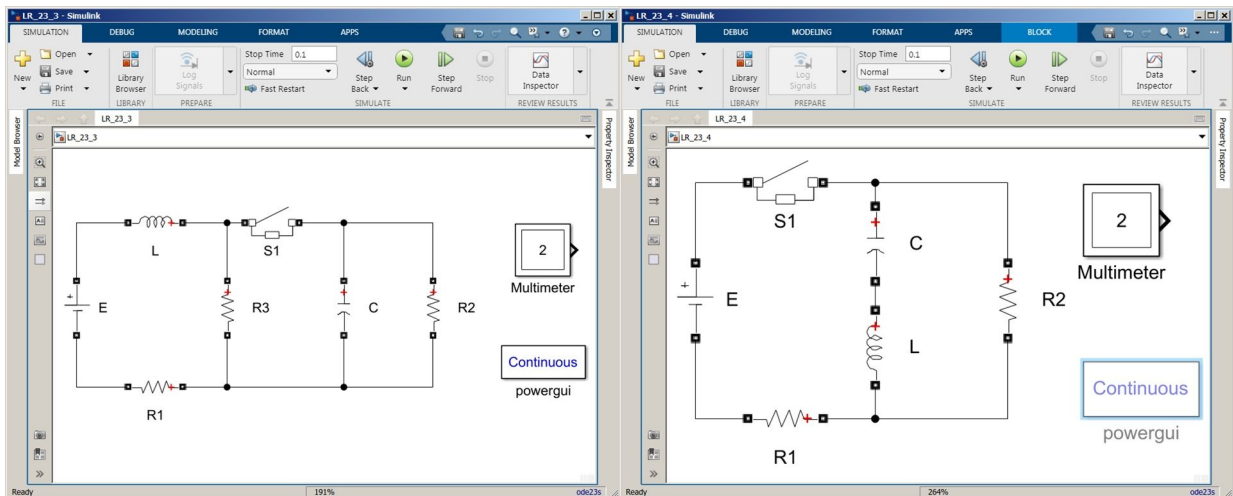
2.1. Для обраної схеми, згідно з варіантом завдання, розрахуйте критичне значення $R_{к1}$ опору резистора R_1 , яке визначає граничний випадок аперіодичного перехідного процесу при замиканні ключа $S1$.

2.2. Для значення $R_1=0,01R_{к1}$ розрахуйте затухання і частоту вільних коливань. Розрахуйте перехідний процес для величини, вказаної в табл. 26.1, при замиканні ключа $S1$. Побудуйте графік досліджуваної величини.



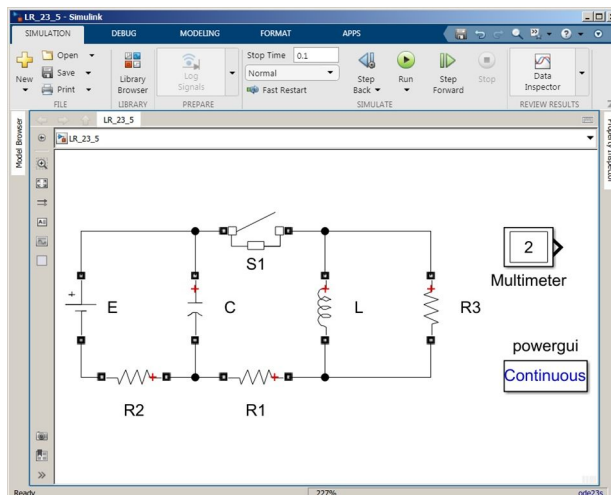
а)

б)



в)

г)



д)

Рисунок 26.1 – Схема досліджуваного кола

Таблиця 26.1 – Варіанти параметрів схем (рис. 26.1)

Варіант	U , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	C , мкФ	L , мГн	Досліджувана величина	Схема
1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81	$1,1 \cdot N$	$100 \cdot N$	$1,0N$	$0,5 \cdot N$	$10 \cdot N$	i_C	<i>a</i>
2, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 82	$1,4 \cdot N$	$100 \cdot N$	$1,2N$	$0,7 \cdot N$	$10 \cdot N$	u_L	<i>a</i>
3, 13, 23, 33, 43, 53, 63, 73, 83	$1,6 \cdot N$	$100 \cdot N$	$1,4N$	$0,8 \cdot N$	$10 \cdot N$	i_L	<i>б</i>
4, 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74, 84	$1,8 \cdot N$	$100 \cdot N$	$1,6N$	$0,9 \cdot N$	$10 \cdot N$	u_C	<i>б</i>
5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85	$2 \cdot N$	$100 \cdot N$	$1,8N$	$1,0 \cdot N$	$10 \cdot N$	u_{R1}	<i>в</i>
6, 16, 26, 36, 46, 56, 66, 76, 86	$2,2 \cdot N$	$100 \cdot N$	$2N$	$1,1 \cdot N$	$10 \cdot N$	i_C	<i>в</i>
7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 77, 87	$2,4 \cdot N$	$100 \cdot N$	$2,2N$	$1,2 \cdot N$	$10 \cdot N$	u_L	<i>г</i>
8, 18, 28, 38, 48, 58, 68, 78, 88	$2,6 \cdot N$	$100 \cdot N$	$2,4N$	$1,3 \cdot N$	$10 \cdot N$	i_L	<i>г</i>
9, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 79, 89	$2,8 \cdot N$	$100 \cdot N$	$2,6N$	$1,4 \cdot N$	$10 \cdot N$	u_C	<i>д</i>
10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	$3 \cdot N$	$100 \cdot N$	$2,8N$	$1,5 \cdot N$	$10 \cdot N$	u_{R1}	<i>д</i>

N – номер варіанта.

3. Розрахунок перехідного режиму досліджуваного кола.

3.1. Складіть задане коло та встановіть параметри його елементів згідно з п.2. Отримайте на екрані осцилографа графік досліджуваної величини і визначте затухання δ_0 і період T_0 вільних коливань. При визначенні δ_0 можна скористатися двома послідовними максимальними значеннями A_1 і A_2 затухаючих періодичних коливань. Тоді експериментальне значення

$$\delta_0 = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{T_0}.$$

Дані вимірів та розрахунків звести в табл. 26.2.

3.2. На основі осцилограм отримайте графіки перехідного процесу при варіації R_1 із метою знаходження R_{1min} , що забезпечує мінімальний час $t_{пн}$ перехідного процесу.

Для зняття осцилограми струму, вхід **Scope** під'єднується паралельно до

резистора, який увімкнено у вітку з досліджуваним струмом. Усі зняті осцилограми повинні бути оформлені у звіті у вигляді графіків $i(t)$, $u(t)$.

4. Для досліджуваної величини, згідно з варіантом завдання, розрахуйте перехідний процес, використовуючи параметри елементів п. 3.2. ($R_1 = R_{1min}$).

Таблиця 26.2 – Результати досліджень перехідного процесу при замиканні ключа $S1$

Величина	Розрахунок	Експеримент	$\delta 0, \%$
δ_0, c^{-1}			
$T_0, мс$			
ω_0, c^{-1}			

5. Побудуйте графік перехідного процесу Порівняйте час, отриманий згідно експерименту та в розрахунках. Оцініть похибку, і у разі необхідності, повторіть дослідження.

6. Зробіть висновки про виконану роботу, зверніть увагу на причини, які призвели до розходжень експериментальних і розрахованих значень величин, а також на вплив параметрів на вигляд у характеристики перехідного процесу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте і проілюструйте закони комутації.
2. Яка умова аперіодичного перехідного процесу в колах 2- го порядку?
3. Яка послідовність розрахунку перехідних процесів класичним методом?
4. Які особливості моделювання перехідних процесів у Simulink?

27 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ВИМКНЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ

1. Мета роботи

Дослідження ефективності пристроїв захисту елементів електричного кола постійного струму від комутаційних перенапруг.

2. Теоретична частина

Вивчіть рекомендації щодо розробки та дослідження математичних моделей електричних кіл у середовищі *Matlab/Simulink* (див. Додаток А).

3. План роботи

1. Дослідження перехідного процесу при вмиканні кола з резистором та індуктивністю на постійну напругу (ключ з пристроєм захисту від перенапруг вимкнений).

1.1. Електроприймач *Load*, що має активний опір R та індуктивність L , вмикається ключем S на постійну напругу (рис. 27.1). Для захисту ключа від перенапруг при вимкненні електроприймача паралельно з ключем ввімкнено коло із послідовно з'єднаними резистором R_S і конденсатором C_S (на схемі не показано).

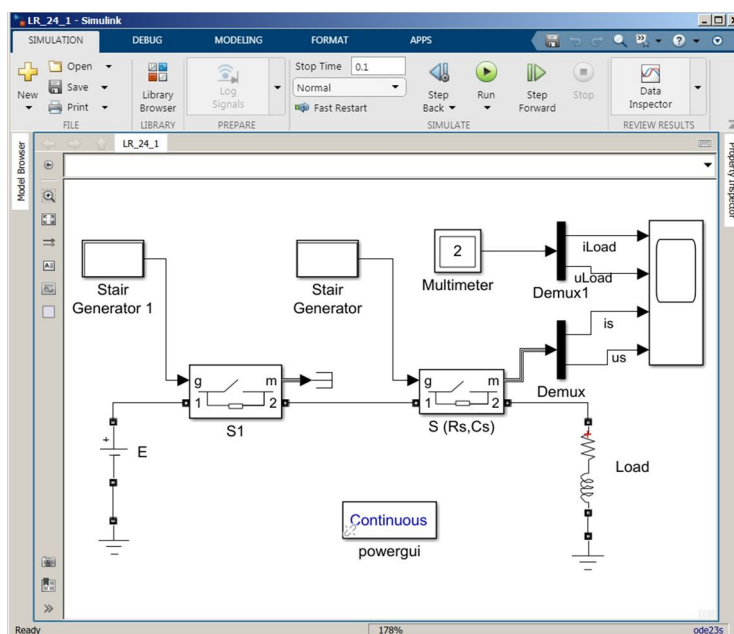


Рисунок 27.1 – Схема моделі кола для дослідження ефективності пристроїв захисту від перенапруг

При підключенні джерела постійної ЕРС E ключем S_1 при відключеному ключі S індуктивність навантаження L і захисна ємність C_S ключа S утворюють послідовний коливальний контур і в колі виникають вільні коливання згасають з періодом T_v , частотою ω_v і коефіцієнтом загасання δ .1

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources*, знайдіть блок *DC Voltage Source*, перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть його ім'я на E , відкрийте таблицю параметрів блоку та задайте амплітуду джерела ЕРС *Amplitude* $1+2*N$.

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*, знайдіть блок *Series RLC Branch* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку *Load*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте активний опір R $1+0,1*N$ Ом і індуктивність L $0,1*N$, Гн у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Electronics*, знайдіть блок *Ideal Switch* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть ім'я блоку на S , відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте *Internal resistance Ron* (опір вимикача в стані "ввімкнено") – 0.01, *Initial status* (вихідний стан) – 0, *Snubber resistance R_S* (захисний опір) – $10*N$ Ом та *Snubber Capacitance C_S* (захисну ємність) – $10*N$ мкФ.

Скопіюйте блок S , вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на S_1 , відкрийте таблицю параметрів блоку, поставте *Snubber resistance R_S* (захисний опір) – $1e6$, *Snubber Capacitance C_S* (захисна ємність) – $1e-6$.

Відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources / Signal Generator Sources* знайдіть блок *Stair Generator* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте час $[0, 1, 2]$ та амплітуду $[0, 1, 0]$.

Скопіюйте блок *Stair Generator*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *Stair Generator 1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте час $[0, 1e-6, 5]$ та амплітуда $[0, 1, 0]$.

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities*, знайдіть блок *Ground* та перетягніть їх мишкою у вікно моделі.

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Library Browser / Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements*, знайдіть блок *Multimeter*, перетягніть його мишкою у вікно моделі. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Multimeter*, виділіть у лівому вікні струм навантаження $I_b: \text{Load}$ і напругу навантаження $U_b: \text{Load}$ і переведіть їх у праве вікно (рис.).

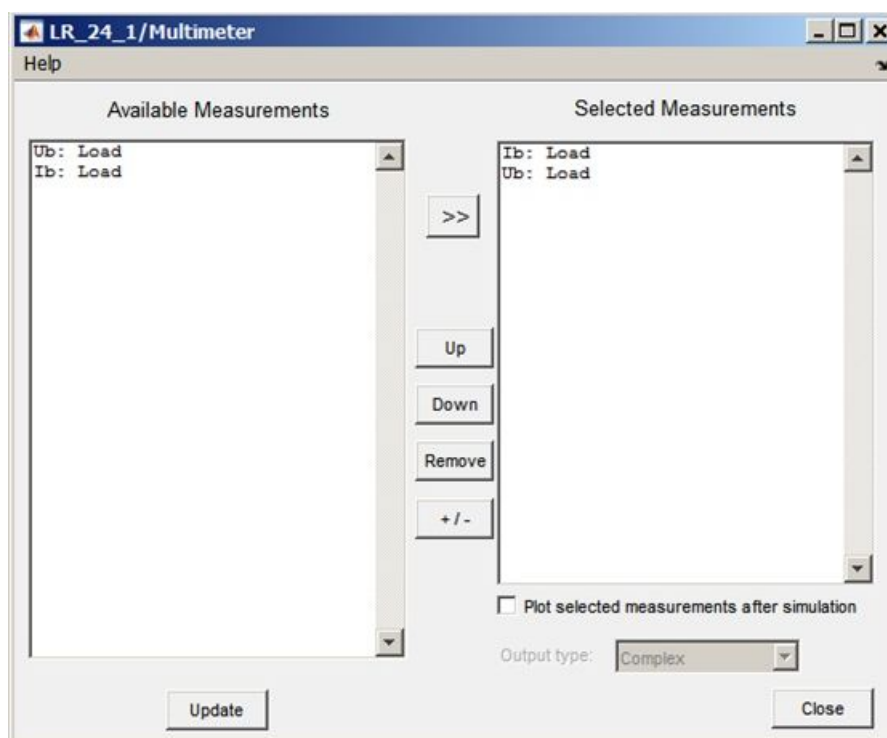


Рисунок 27.2 – Параметри блоку *Multimeter*

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Simulink / Commonly Used Blocks*, знайдіть блок *Demux*, перетягніть його мишкою у вікно моделі, відкрийте таблицю параметрів блоку та задайте число виходів 2.

Скопіюйте блок *Demux*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *Demux1*.

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Simulink / Sinks*, знайдіть блок *Scope*, перетягніть його мишкою у вікно моделі та з'єднайте його вхід із виходом блоку *Multimeter*. Задайте число входів 4. В меню *View* виберіть команду *Layout* і встановіть чотири вертикальних макета.

Розташуйте блоки відповідно до схеми моделі (рис. 27.1) та з'єднайте виходи блоків з відповідними входами.

Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть *Simulation time – Stop time* (час моделювання) – **0.1**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode 23s*, натисніть **OK** та запусіть моделювання.

1.2. Відкрийте блок *Scope*, визначте за графіками характер перехідного процесу, перемалюйте осцилограми (рис. 27.3).

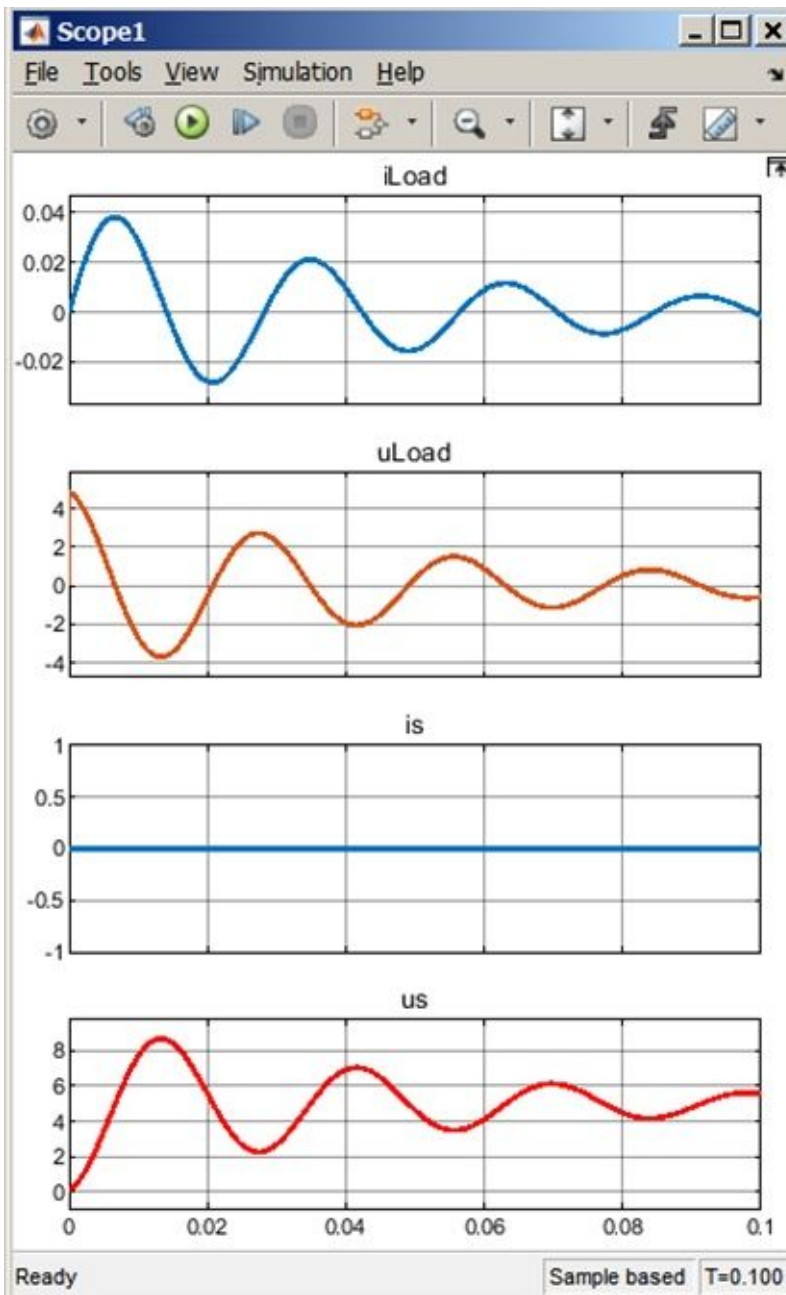


Рисунок 27.3 – Результати моделювання перехідного процесу при підключенні до кола джерела постійної ЕРС E та розімкнутого ключа S

1.3. За результатами моделювання виміряйте:

- струм ключа до $I_S(0_-)$ і після комутації $I_S(0_+)$, максимальний I_{Smax} і усталений I_{Sy} ;
- напруги на ключі до $U_S(0_-)$ і після комутації $U_S(0_+)$, максимальну напругу (перший максимум) U_{Smax1} і усталену напругу U_{Sy} ;
- струм навантаження до $I_L(0_-)$ і після комутації $I_L(0_+)$, максимальний I_{Lmax} і усталений I_{Ly} ;
- напруги на навантаженні до $U_L(0_-)$ і після комутації $U_L(0_+)$, максимальну U_{Lmax} і усталену U_{Ly} ;
- період вільних коливань T_B ;
- максимальне значення перехідної напруги на ключі (другий максимум) U_{Smax2} через час T_θ після першого максимуму.

1.4. Розрахуйте параметри кола:

- коефіцієнт загасання

$$\delta = \frac{\ln \frac{U_{Smax1}}{U_{Smax2}}}{T_B};$$

- кутова частота вільних коливань

$$\omega_B = \frac{2\pi}{T_B}.$$

1.5. Результати вимірювань та розрахунків помістіть у табл. 27.1.

Таблиця 27.1 – Результати моделювання перехідного процесу при підключенні до кола джерела постійної ЕРС E та розімкненому ключі S

$I_S(0_-)$,		$I_S(0_+)$, А		I_{Smax} , А		I_{Sy} , А	
$U_S(0_-)$, В		$U_S(0_+)$, В		U_{Smax1} , В		U_{Sy} , В	
$I_L(0_-)$, А		$I_L(0_+)$, А		I_{Lmax} , А		I_{Ly} , А	
$U_L(0_-)$, В		$U_L(0_+)$, В		U_{Lmax} , В		U_{Ly} , В	
T_θ , с		U_{Smax2} , В		δ , с ⁻¹		ω_B , с ⁻¹	

2. Дослідження перехідного процесу в колі з резистором та індуктивністю, ввімкненою на постійну напругу, при вмиканні ключа з

пристроєм захисту від перенапруг.

2.1. Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть нові параметри моделювання: *Simulation time – Stop time* (час моделювання) – **2**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode 23s*, натисніть **OK** та запустіть моделювання.

2.2. Відкрийте блок *Scope*, визначте за графіками характер перехідного процесу, натисніть «*Zoom in*» (збільшення мірила), виділіть частину осцилограми на інтервалі часу від 1 до 2 с від початку до кінця перехідного процесу, перемалюйте осцилограми (рис. 27.4).

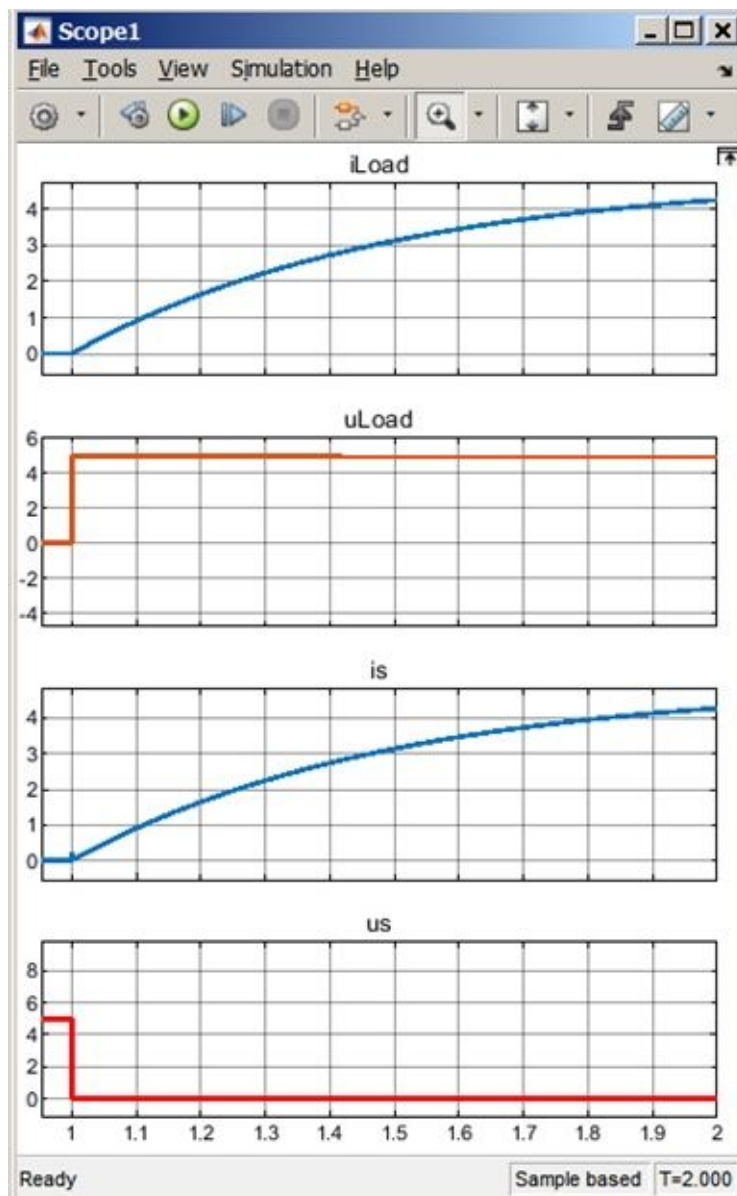


Рисунок 27.4 – Результати моделювання перехідного процесу при вмиканні навантаження на постійну напругу

2.3. За результатами моделювання виміряйте:

- струм ключа до $I_S(0_-)$ і після комутації $I_S(0_+)$, максимальний I_{Smax} і усталений I_{Sy} ;
- напруги на ключі до $U_S(0_-)$ і після комутації $U_S(0_+)$, максимальну U_{Smax} і усталену U_{Sy} ;
- струм навантаження до $I_L(0_-)$ і після комутації $I_L(0_+)$, максимальний I_{Lmax} і усталений I_{Ly} ;
- напруги на навантаженні до $U_L(0_-)$ і після комутації $U_L(0_+)$, максимальне U_{Lmax} усталену і U_{Ly} ;
- постійну часу кола розряду ємності τ_S і тривалість перехідного процесу розряду ємності T_S ;
- постійну часу навантаження τ_L та тривалість перехідного процесу при вмиканні навантаження на постійну напругу T_L .

2.4. Результати вимірювань та розрахунків помістіть у табл. 27.2.

Таблиця 27.2 – Результати моделювання перехідного процесу при вмиканні навантаження на постійну напругу

$I_S(0_-)$, А		$I_S(0_+)$, А		I_{Smax} , А		I_{Sy} , А	
$U_S(0_-)$, В		$U_S(0_+)$, В		U_{Smax} , В		U_{Sy} , В	
$I_L(0_-)$, А		$I_L(0_+)$, А		I_{Lmax} , А		I_{Ly} , А	
$U_L(0_-)$, В		$U_L(0_+)$, В		U_{Lmax} , В		U_{Ly} , В	
τ_S , с		T_S , с		τ_L , с		T_L , с	

3. Дослідження перехідного процесу в колі з резистором та індуктивністю, ввімкненою на постійну напругу, при вимиканні ключа з пристроєм захисту від перенапруг.

3.1. Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть нові параметри моделювання: *Simulation time – Stop time* (час моделювання) – **3**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode 23s*, натисніть **OK** та запустіть моделювання.

3.2. Відкрийте блок *Scope*, визначте за графіками характер перехідного процесу, натисніть "*Scale Y-Axis Limits*" (МЕЖІ шкали по осі Y), натисніть

"**Zoom in**" (збільшення мірила), виділіть частину осцилограми на інтервалі часу від $t=2$ до $t=2+2 \cdot T_B$, перемалуйте осцилограми (рис. 27.5).

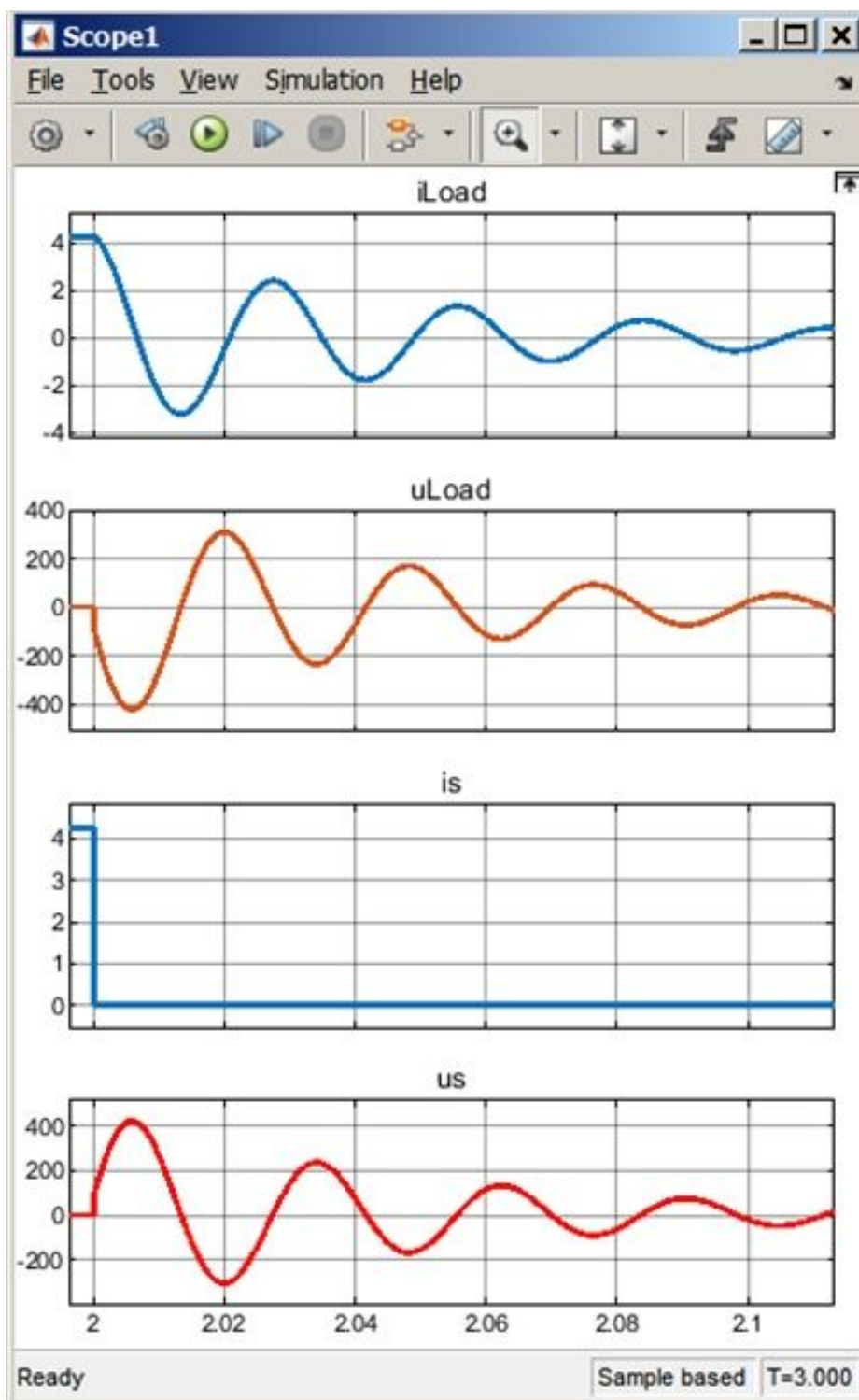


Рисунок 27.5 – Результати моделювання перехідного процесу при вимкненні навантаження

3.3. За результатами моделювання виміряйте:

- струм ключа до $I_S(0_-)$ і після комутації $I_S(0_+)$, максимальний I_{Smax} і усталений I_{Sy} ;

- напруги на ключі до $U_S(0_-)$ і після комутації $U_S(0_+)$, максимальну U_{Smax1} і усталену U_{Sy} ;
- струм навантаження до $I_L(0_-)$ і після комутації $I_L(0_+)$, максимальний I_{Lmax} і усталений I_{Ly} ;
- напруги на навантаженні до $U_L(0_-)$ і після комутації $U_L(0_+)$, максимальне U_{Lmax} і усталену U_{Ly} ;
- період вільних коливань T_B ;
- максимальне значення перехідної напруги на ключі U_{Smax2} через час T_e після першого максимуму.

3.4. Розрахуйте параметри кола:

- коефіцієнт загасання

$$\delta = \frac{\ln \frac{U_{Smax1}}{U_{Smax2}}}{T_B};$$

- кутова частота вільних коливань

$$\omega_B = \frac{2\pi}{T_B}.$$

3.5. Результати вимірювань та розрахунків помістіть у табл. 27.3.

Таблиця 27.3 – Результати моделювання перехідного процесу при вимкненні навантаження

$I_S(0_-)$, А		$I_S(0_+)$, А		I_{Smax} , А		I_{Sy} , А	
$U_S(0_-)$, В		$U_S(0_+)$, В		U_{Smax1} , В		U_{Sy} , В	
$I_L(0_-)$, А		$I_L(0_+)$, А		I_{Lmax} , А		I_{Ly} , А	
$U_L(0_-)$, В		$U_L(0_+)$, В		U_{Lmax} , В		U_{Ly} ,	
T_B , с		U_{Smax2} , В		δ , с ⁻¹		ω_B , с ⁻¹	

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиці. Графіки.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання та завдання

1. Дослідження перехідного процесу під час увімкнення кола з резистором та індуктивністю на постійну напругу без ключа із пристроєм захисту від перенапруг.

2. Дослідження перехідного процесу в колі з резистором та індуктивністю, увімкненому на постійну напругу, під час увімкнення ключа з пристроєм захисту від перенапруг.

3. Дослідження перехідного процесу в колі з резистором та індуктивністю, увімкненому на постійну напругу, під час вимкнення ключа з пристроєм захисту від перенапруг.

4. Період вільних коливань

5. Коефіцієнт загасання

6. Кутова частота вільних коливань

28 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕРОЗГАЛУЖЕНОМУ КОЛІ З КОТУШКОЮ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ЇЇ ДО ДЖЕРЕЛА СИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ

1. Мета роботи

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесів в котушці у лінійних нерозгалужених колах при підключенні її до джерела синусоїдної напруги.

2. Теоретична частина

Нехай котушка індуктивності підключається (рис. 28.1) до джерела гармонійної ЕРС з рівнянням

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e). \quad (28.1)$$

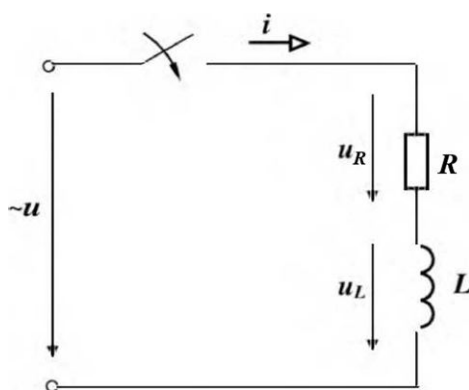


Рисунок 28.1 – Розрахункова схема підключення котушки до джерела синусоїдної напруги

Для цього кола в момент після комутації справедливі рівняння

$$L \frac{di}{dt} + Ri = e, \quad (28.2)$$

або

$$\tau \frac{di}{dt} + i = \frac{E_m}{R} \sin(\omega t + \psi_i), \quad (28.3)$$

де τ - постійна часу перехідного процесу

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (28.4)$$

В загальному вигляді рівняння перехідного струму можна записати у вигляді суми вимушеної і усталеної складових

$$i = i_g + i_y. \quad (28.5)$$

Вимушений струм в колі

$$i_e = I_m \sin(\omega t + \psi_e - \varphi), \quad (28.6)$$

де I_m – максимальний струм

$$I_m = \frac{E_m}{Z}. \quad (28.7)$$

Повний опір електричного кола у перехідному режимі

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (28.8)$$

Кут зсуву фаз між напругою і струмом кола в перехідному режимі

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}. \quad (28.9)$$

Усталена складова струму змінюється за експонентою $i_y = A e^{\frac{t}{\tau}}$.

Рівняння перехідного струму у загальному вигляді з урахуванням вимушеної складової струму

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_e - \varphi) + A e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (28.10)$$

Постійну інтегрування перехідного струму знаходимо з початкових умов: $t = 0$ та $i(0) = 0$, тому

$$A = -I_m \sin(\psi_e - \varphi). \quad (28.11)$$

Остаточно одержимо рівняння перехідного струму

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_e - \varphi) - I_m \sin(\psi_e - \varphi) e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (28.12)$$

Максимально можливого значення струм досягає, якщо в момент включення котушки примусовий струм буде мати амплітудне значення при початковій фазі $\psi_i = \psi_e - \varphi = \frac{\pi}{2}$, а постійна часу кола буде дуже великою ($R \approx 0$, $\tau \rightarrow \infty$), тобто усталений струм буде затухати дуже повільно (рис. 28.2).

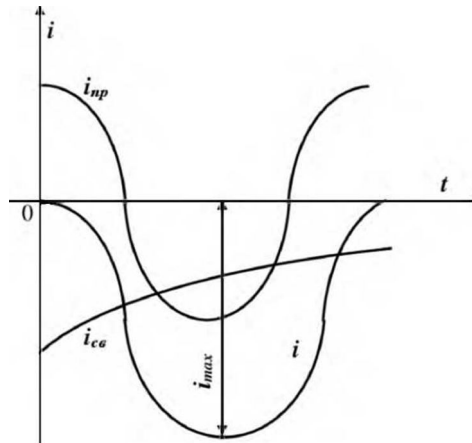


Рисунок 28.2 – Графіки примусового, вільного і перехідного струму при його

$$\text{початкові фазі } \psi_i = \psi_e - \varphi = \frac{\pi}{2}$$

За цих умов $\psi = \varphi$ і прикладена напруга буде проходити через нуль. У цьому випадку амплітуда перехідного струму може досягти подвоєного значення амплітуди примусового (усталеного) струму.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 28.3).

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources*, знайдіть блок *AC Voltage Source*, перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть його ім'я на *E*, відкрийте таблицю параметрів блоку та задайте нові параметри блоку *Amplitude* $10+2*N$ та *Measurements* – *None*.

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*, знайдіть блок *Series RLC Branch* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте лише активний опір $1+0.1*N$ Ом, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Скопіюйте блок *R1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть активний опір $2+0.2*N$, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Вставте у вікно моделі ще одну копію блоку *R1*, поміняйте ім'я блоку на *L*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте індуктивність $0.01*N$, в рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Grid Elements*, знайдіть блок *Breaker* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть ім'я блоку на *S1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте *Initial status* (вихідний стан) – 0, *Switching times* (час включення) – 0, *Breaker resistance Ron* (опір вимикача в стані «ввімкнено») – 0.001, *Snubber resistance Rs* (захисний опір) – 1e6, *Measurements – Branch voltage and Current*.

Скопіюйте блок *S1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *S2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть *Switching times* (час включення) – 60e-3.

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities*, знайдіть блоки *Ground* і перетягніть їх мишкою у вікно моделі.

Розташуйте блоки відповідно до схеми моделі (рис. 28.3) і з'єднайте виходи блоків із відповідними входами.

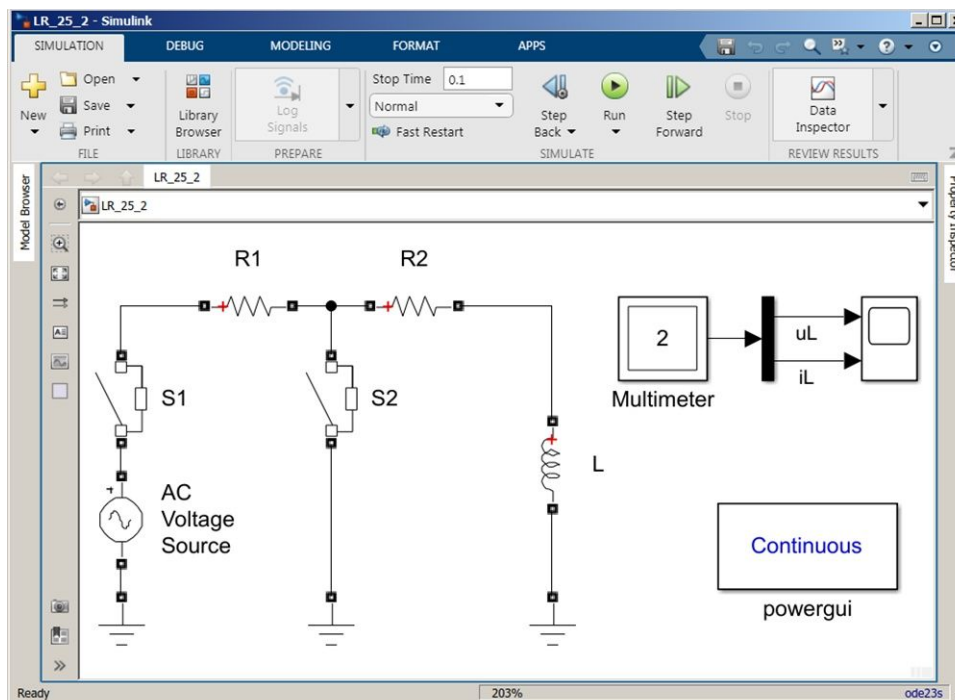


Рисунок 28.3 – Схема моделі для дослідження перехідних процесів у колі *RL*

Відкрийте папку *Simulink / Commonly Used Blocks*, знайдіть блок *Demux* (розділювач), перетягніть його мишкою у вікно моделі та з'єднайте його вхід із виходом блоку *Multimeter*. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Demux* і вкажіть кількість виходів 2. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Demux* і

вказіть кількість виходів 2.

Відкрийте папку *Simulink / Sinks*, знайдіть блок *Scope* (осцилоскоп) і перетягніть його мишкою у вікно моделі, задайте число входів 2 і з'єднайте їх із виходами блоку *Demux*. В меню *View* виберіть команду *Layout* і встановіть два вертикальних макета.

Відкрийте папку *Library Browser / Simscape /Electrical / Specialized Power Systems /Sensors and Measurements*, знайдіть блок *Multimeter*, перетягніть його мишкою у вікно моделі. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Multimeter*, виділіть у лівому вікні напругу індуктивності $U_b:L$ і струм індуктивності $I_b:L$ (рис. 28.4) і переведіть їх у праве вікно (виміри, що використовуються результати).

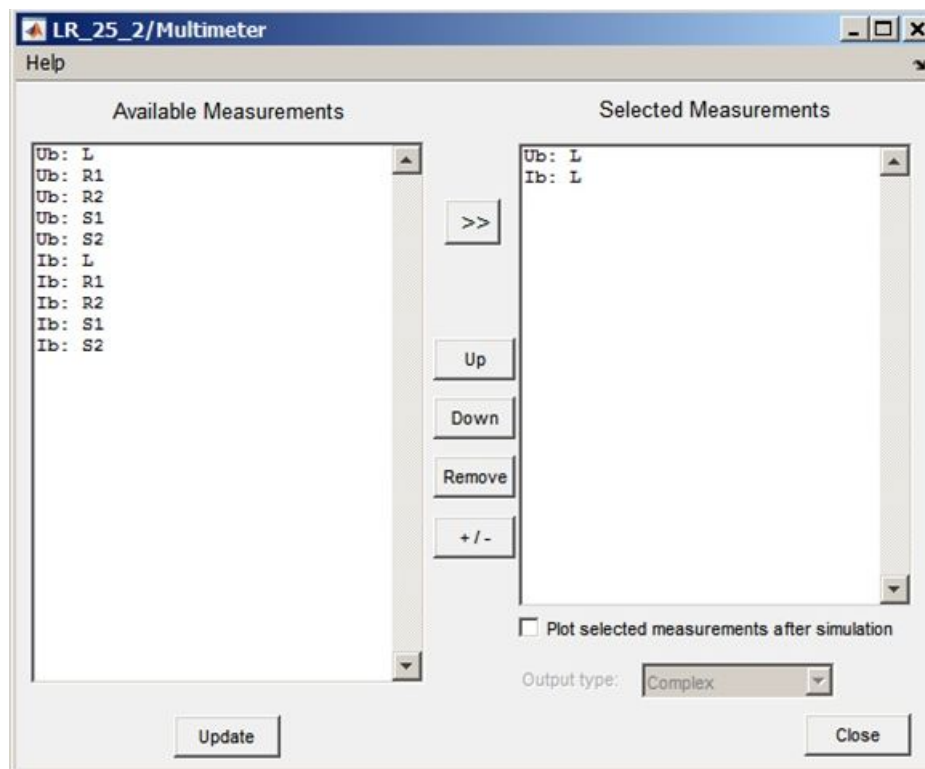


Рисунок 28.4 – Таблиця параметрів блоку Multimeter

Встановіть параметри моделювання: час початку – 0, час кінця – 0.01, крок-змінний, *ode23s*, натисніть **OK** і запусіть моделювання.

2. Відкрийте блок *Scope*, визначте за графіками характер перехідного процесу та його тривалість, знайдіть миттєві значення напруги на ємності та струму ємності при вмиканні ключа *S1* та при вмиканні ключа *S2* (рис. 28.5).

3. Перемалюйте осцилограми перехідних процесів u_L та i_L (рис. 28.5).

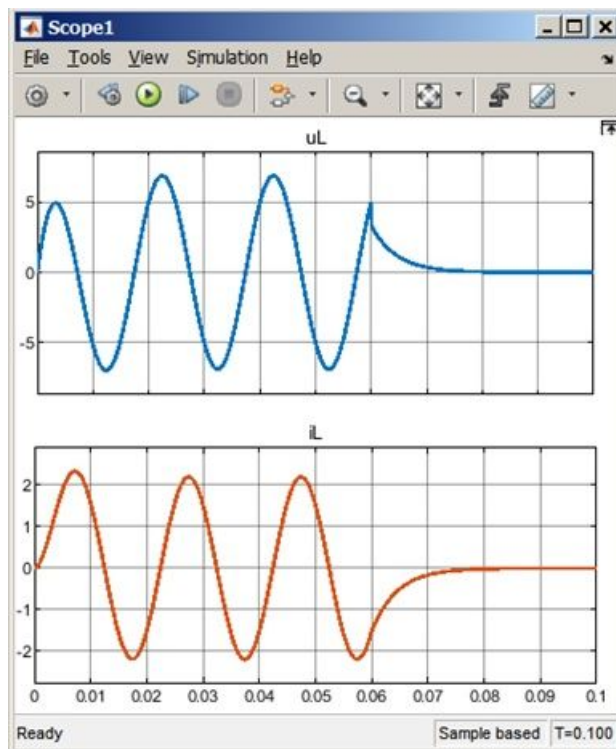


Рисунок 28.5 – Осцилограми напруги та струму індуктивності при вмиканні ключа $S1$ та при вмиканні ключа $S2$

4. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів індуктивності L .

5. Замініть у правому вікні блоку *Multimeter* $U_b:L$ та $I_b:L$ на $U_b:R1$ та $I_b:R1$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R1$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R1$.

6. Замініть у правому вікні блоку *Multimeter* $U_b:R1$ та $I_b:R1$ на $U_b:R2$ та $I_b:R2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R2$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R2$.

7. Замініть у правому вікні блоку *Multimeter* $U_b:R2$ та $I_b:R2$ на $U_b:S2$ та $I_b:S2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на ключі $S2$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів ключа $S2$.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.

3. Розрахунки за результатами досліджень.

4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Складіть диференціальне рівняння електричного кола при вмиканні котушки до джерела синусоїдної напруги.

2. Як розрахувати постійну часу при вмиканні котушки до джерела синусоїдної напруги?

3. Як визначити корінь характеристичного рівняння?

4. Як розрахувати примушену складову струму при вмиканні котушки до джерела синусоїдної напруги?

5. Як знайти початкові умови струму в колі при вмиканні котушки до джерела постійної ЕРС в післякомутаційний період?

6. Як визначити постійну інтегрування струму при вмиканні котушки до джерела синусоїдної напруги, записавши початкові умови?

7. Запишіть математичне рівняння перехідного струму при вмиканні котушки до джерела постійної ЕРС.

29 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ З СИНУСОЇДНОЮ ЕРС

2. Мета роботи:

Придбання практичних навичок при дослідженні перехідних процесу зарядження конденсатора через резистор в лінійних колах з синусоїдною ЕРС.

2. Теоретична частина

Нехай послідовно з'єднані резистор і конденсатор підключаються до джерела синусоїдної ЕРС (рис. 29.1), що має рівняння

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e).$$

(29.1)

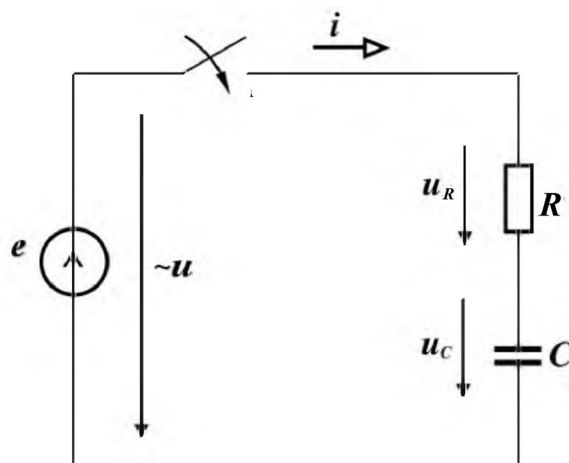


Рисунок 29.1 – Розрахункова схема послідовно з'єднаних резистора і конденсатор при підключенні до джерела синусоїдної ЕРС

Для цього кола справедливе рівняння за другим законом Кірхгофа

$$Ri + \frac{1}{C} \int idt = e. \quad (29.2)$$

Струм у колі

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \quad (29.3)$$

тоді

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = e, \quad (29.4)$$

або

$$\tau \frac{du_C}{dt} + u_C = e, \quad (29.5)$$

де $\tau = RC$ – постійна часу кола, с.

Перехідна напруга на ємності

$$u_C = u_{Cy} + u_{\epsilon}. \quad (29.6)$$

Усталена (примусова) напруга на ємності

$$u_{Cy} = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_e + \varphi - 90^\circ), \quad (29.7)$$

оскільки рівняння усталеного (примусового) струму

$$i_y = I_m \sin(\omega t + \psi + \varphi), \quad (29.8)$$

де амплітудний струм в колі

$$I_m = \frac{E_m}{Z}. \quad (29.9)$$

Повний опір кола

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (29.10)$$

Рівняння усталеної складової напруги на ємності

$$u_{C\epsilon} = A e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (29.11)$$

Для перехідної напруги на ємності одержимо рівняння у загальному вигляді

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_e + \varphi - 90^\circ) + A e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (29.12)$$

Знаходимо постійну інтегрування напруги на ємності з початкових умов:

$t = 0$ $u_C(0) = 0$, тому постійна інтегрування напруги на ємності

$$A = -U_{Cm} \sin(\psi + \varphi - 90^\circ). \quad (29.13)$$

Остаточно одержимо рівняння перехідної напруги на ємності

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_e + \varphi - 90^\circ) - U_{Cm} \sin(\psi + \varphi - 90^\circ) e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (29.14)$$

Максимально можливого значення напруга на ємності досягає, якщо в момент включення кола примусова складова напруги буде мати амплітудне значення. Це буде мати місце за умови, якщо початкова фаза напруги на

ємності $\psi_{uC} = \psi_e + \varphi = \pi$. Крім того, будемо вважати, що постійна часу кола має дуже мале значення, оскільки активний опір конденсатора $R_C \rightarrow 0$ (рис. 29.2).

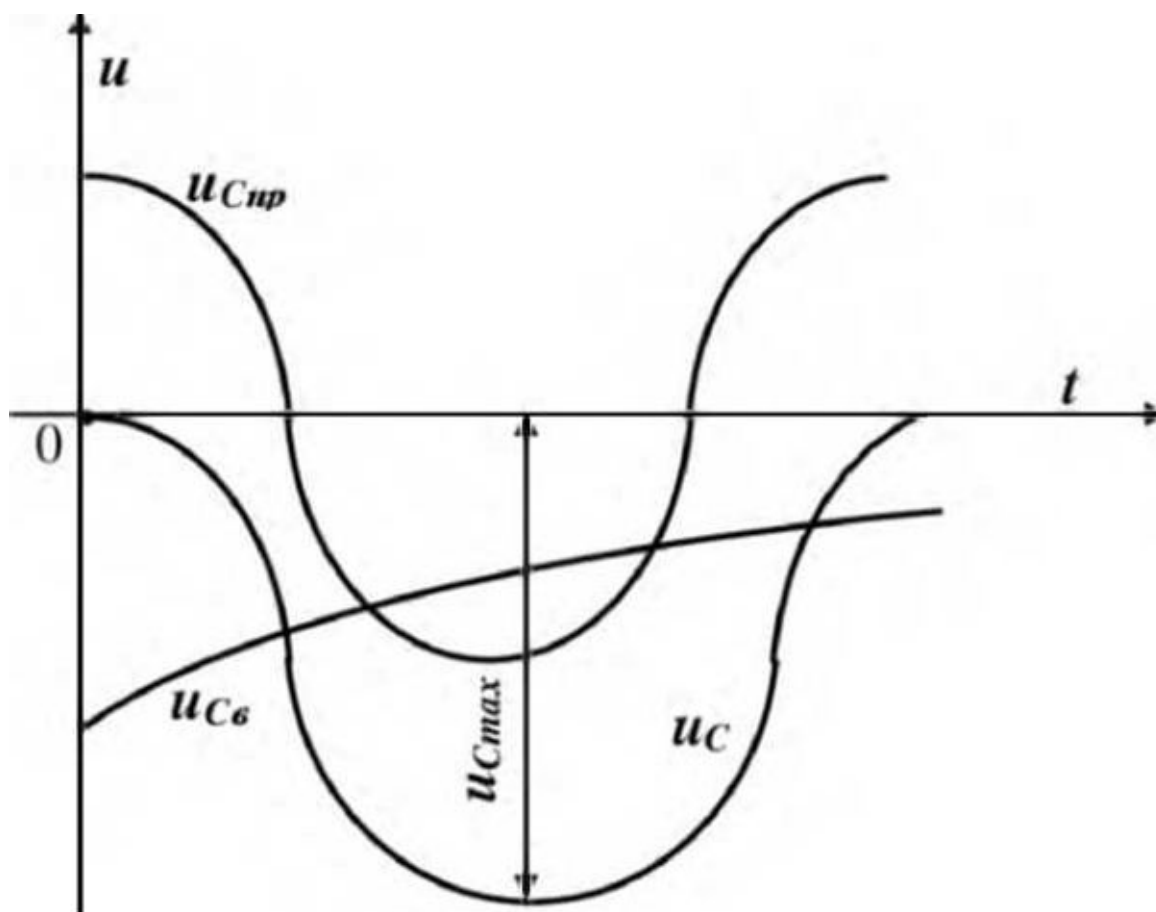


Рисунок 29.2 – Графік вимушеної, усталеної і перехідної напруги на ємності, якщо початкова фаза напруги на ємності $\psi_{uC} = \psi_e + \varphi = \pi$

У цьому випадку максимальне значення перехідної напруги на ємності може досягати майже подвоєного значення амплітуди вимушеної складової перехідної напруги на ємності.

3. План роботи

1. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему (рис. 29.3).

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources*, знайдіть блок *AC Voltage Source*, перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть його ім'я на *E*, відкрийте таблицю параметрів блоку та задайте нові параметри блоку *Amplitude* $10+2*N$ та *Measurements* – *None*.

У бібліотеці *Simulink* відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives*, знайдіть блок *Series RLC Branch* і перетягніть його

мишкою у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте лише активний опір $1+0.1*N$, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Скопіюйте блок *R1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *R2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть активний опір $2+0.2*N$, у рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Вставте у вікно моделі ще одну копію блоку *R1*, поміняйте ім'я блоку на *C*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте ємність $(1000-100*N)e-6$ (*N* – номер варіанта), в рядку *Measurements* задайте *Branch voltage and Current*.

Відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Grid Elements*, знайдіть блок *Breaker* і перетягніть його мишкою у вікно моделі, змініть ім'я блоку на *S1*, відкрийте таблицю параметрів блоку, задайте *Initial status* (вихідний стан) – 0, *Switching times* (час включення) – 0, *Breaker resistance Ron* (опір вимикача в стані «ввімкнено») – 0.001, *Snubber resistance Rs* (захисний опір) – $1e6$, *Measurements* – *Branch voltage and Current*.

Скопіюйте блок *S1*, вставте у вікно моделі, поміняйте ім'я блоку на *S2*, відкрийте таблицю параметрів блоку, встановіть *Switching times* (час включення) – $60e-3$.

Відкрийте бібліотеку *Simulink*, відкрийте папку *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Utilities*, знайдіть блоки *Ground* і перетягніть їх мишкою у вікно моделі.

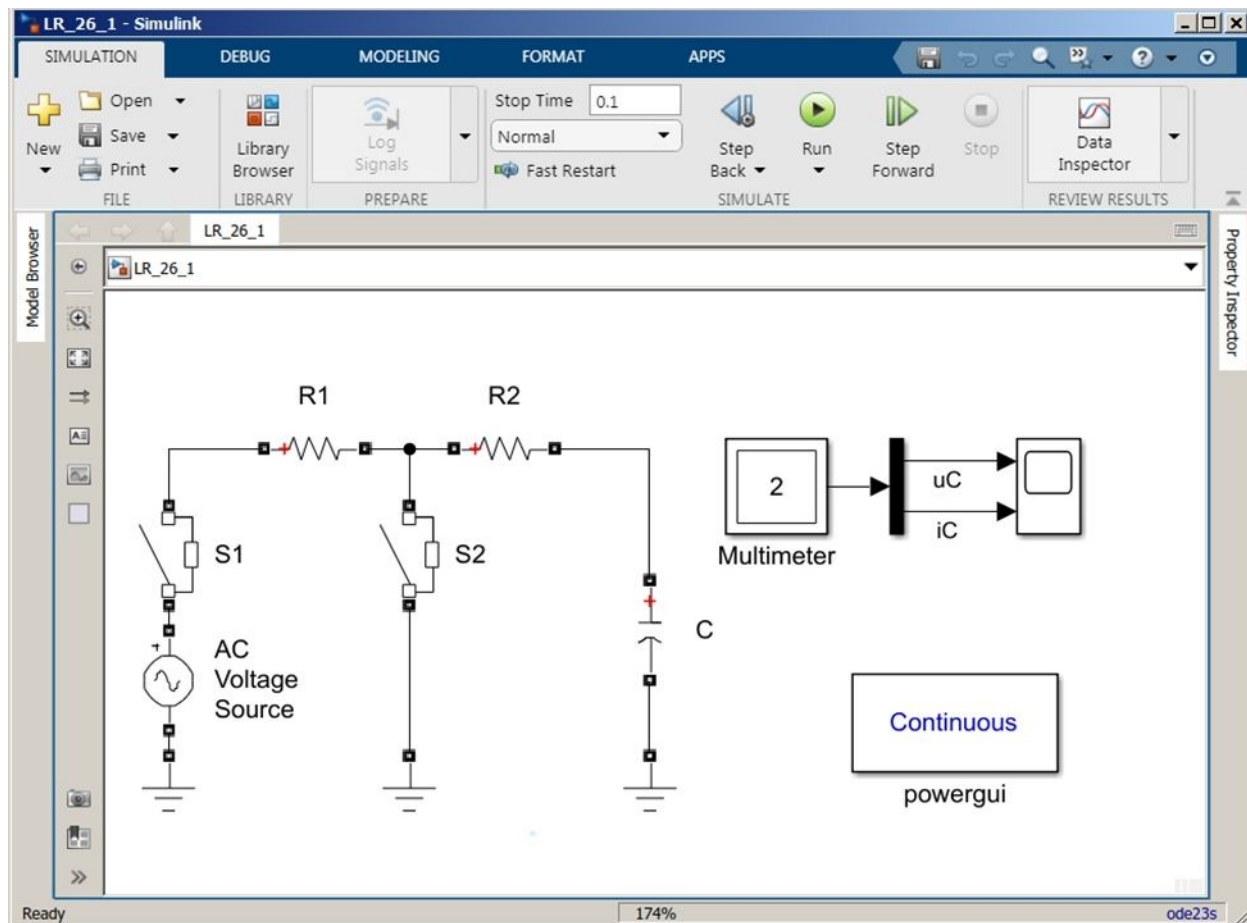


Рисунок 29.3 – Схема моделі для дослідження перехідних процесів у колі RC

Відкрийте папку *Simulink / Commonly Used Blocks*, знайдіть блок *Demux* (розділювач), перетягніть його мишкою у вікно моделі та з'єднайте його вхід із виходом блоку *Multimeter*. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Demux* і вкажіть кількість виходів 2.

Відкрийте папку *Simulink/Sinks*, знайдіть блок *Scope* (осцилоскоп) і перетягніть його мишкою у вікно моделі, задайте число входів 2 і з'єднайте їх із виходами блоку *Demux*. В меню *View* виберіть команду *Layout* і встановіть два вертикальних макета.

Відкрийте папку *Library Browser / Simscape /Electrical / Specialized Power Systems /Sensors and Measurements*, знайдіть блок *Multimeter*, перетягніть його мишкою у вікно моделі. Відкрийте таблицю параметрів блоку *Multimeter*, виділіть у лівому вікні напругу на ємності $U_b:C$ та струм ємності $I_b:C$ (рис. 29.4) і переведіть їх у праве вікно (виміри, що використовуються результати).

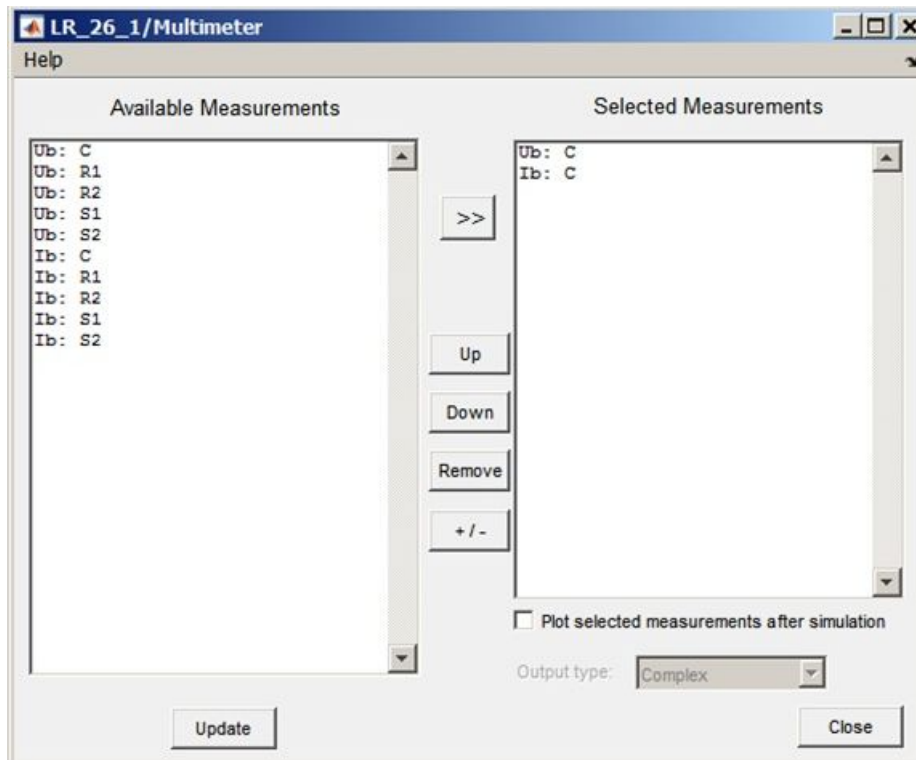


Рисунок 29.4 – Таблиця параметрів блоку Multimeter

Відкрийте *Modeling / Model Settings*, встановіть *Simulation time – Stop time* (час моделювання) **0.01**, *Solver selection – Type* (спосіб моделювання) – *Variable-step* (зі змінним кроком) та *Solver* (метод розрахунку) – *ode 23s*, натисніть **OK** та запусіть моделювання.

Встановіть параметри моделювання: час початку 0, час кінця 0.01, крок-змінний, *ode23s*, натисніть **OK** і запусіть моделювання.

2. Відкрийте блок *Scope*, визначте за графіками характер перехідного процесу та його тривалість, знайдіть миттєві значення напруги на ємності та струму ємності при вмиканні ключа *S1* та при вмиканні ключа *S2*.

3. Перемалуйте осцилограми перехідних процесів u_C та i_C (рис. 24.4).

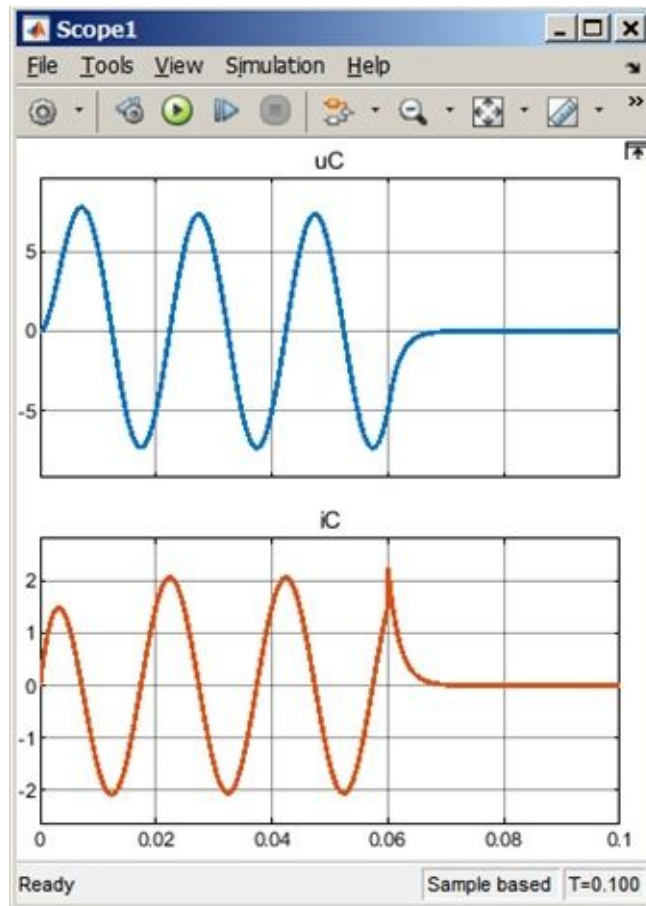


Рисунок 29.5 – Осцилограми напруги та струму ємності при вмиканні ключа $S1$ та при вмиканні ключа $S2$

4. Запишіть у **Script (Live Script)** (скрипт) чи **Command Windows** (вікно команд) вирази перехідних значень напруги та струмів ємності C :

$$u_C = E \cdot (1 - \exp(-t/\tau_1)); \quad i_C = E / (R_1 + R_2) \cdot \exp(-t/\tau_1); \quad \tau_1 = (R_1 + R_2) \cdot C;$$

$$u_C = E \cdot \exp(-t/\tau_2); \quad i_C = -E / R_2 \cdot \exp(-t/\tau_2); \quad \tau_2 = R_2 \cdot C.$$

5. Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:C$ та $I_b:C$ на $U_b:R1$ та $I_b:R1$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R1$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R1$.

Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:R1$ та $I_b:R1$ на $U_b:R2$ та $I_b:R2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних процесів на резисторі $R2$. Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів резистора $R2$.

Замініть у правому вікні блоку **Multimeter** $U_b:R2$ та $I_b:R2$ на $U_b:S2$ та $I_b:S2$, повторіть моделювання та перемалюйте осцилограми перехідних

процесів на ключі S_2 . Запишіть аналітичні вирази перехідних значень напруги та струмів ключа S_2 .

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиці. Графік перехідної напруги на ємності в масштабі.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Складіть розрахункову схему для дослідження перехідного процесу зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС.
2. Складіть диференціальне рівняння електричного кола при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС в післякомутаційний період.
3. Як розрахувати постійну часу при зарядженні конденсатора?
4. Як визначити корінь характеристичного рівняння?
5. Як розрахувати примусову складову струму при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС?
6. Як знайти початкові умови напруги на ємності в колі при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС?
7. Як визначити постійну інтегрування напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС, записавши початкові умови?
8. Запишіть рівняння перехідної напруги на ємності при зарядженні конденсатора від джерела синусоїдної ЕРС.

30 ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОЇ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ БЕЗ ВТРАТ

1. Мета роботи

Придбання практичних навичок при визначенні хвильовими процесами в однорідних довгих лініях без втрат у сталих синусоїдних режимах.

2. Теоретична частина

Для передачі електричної енергії можливо, як мінімум, два проводи. Розповсюдження електричної енергії вздовж такої лінії має хвильовий характер. Довжина хвилі електромагнітного випромінювання визначається за рівнянням

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (30.1)$$

де c – швидкість світла, м/с. Швидкість світла $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; f – частота гармонійного джерела, Гц.

Лінії, геометрична довжина яких сумірна з довжиною хвилі λ , представляються еквівалентними схемами з розподіленими параметрами. Такі лінії називають *довгими лініями*.

Опір активних втрат R провідність g , індуктивність L ; і ємність C розподіляються рівномірно вздовж лінії. Ці параметри називають погонними або *первинними*: $[R]=$ Ом/м, $[L]=$ Гн/м, $[C]=$ Ф/м, $[g]=$ См/м, а довгу лінію вважають однорідною. Лінію, у якій відсутні втрати енергії, називають *ідеальною* лінією, або *лінією без втрат*. Для коротких високочастотних ліній справедливі співвідношення $R \ll \omega L$; й $g \ll \omega C$. Тому часто розглядають такі двопровідні та коаксіальні лінії, як лінії без втрат. Лінію без втрат варто розглядати як ідеалізацію дійсної лінії. Така ідеалізація не вносить помітних кількісних похибок і дозволяє більш характерно виявити якісні особливості виникаючих процесів. Швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж лінії залежить від параметрів самої лінії

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (30.2)$$

і, зазвичай, v менша швидкості світла. Тому реакція і різних точках довгої лінії

на вхідний вплив буде спізнюватися. Час запізнення (затримка) τ залежить від довжини лінії ℓ і швидкості розповсюдження

$$\tau = \frac{\ell}{v} = \ell \sqrt{LC}, \quad (30.3)$$

Найбільш простішою у розумінні процесів, що мають місце у довгій лінії, є двопровідна однорідна лінія. Рівняння ідеальної лінії виходять з рівнянь реальної лінії, записаних у комплексній формі з використанням гіперболічних функцій

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma \cdot x + \underline{Z}_C \underline{I}_2 \operatorname{sh} \gamma \cdot x, \\ \underline{I} &= \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma \cdot x + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} \gamma \cdot x, \end{aligned} \quad (30.4)$$

де \underline{U} і \underline{I} – комплексні діючі значення напруги і струму на відстані x від кінця лінії; \underline{U}_2 і \underline{I}_2 – комплексні діючі значення напруги і струму в кінці лінії; \underline{Z}_C – хвильовий або характеристичний опір лінії без втрат

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (30.5)$$

γ – коефіцієнт поширення

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (30.6)$$

де α – коефіцієнт загасання, Непер. В лінії без втрат $\alpha = 0$; β – коефіцієнт фази, рад.

Рівняння (30.4) мають дві складові, кожна з яких є біжучою хвилею. Одна хвиля – падаюча хвиля і відбита хвиля.

Якщо опір навантаження в кінці лінії дорівнює хвильовому ($Z_n = Z_C$) відбита хвиля відсутня, і в лінії встановлюється режим біжучої хвилі, яка подає енергію від джерела до навантаження. При цьому в лінії без втрат потужність джерела буде тільки активною і рівною потужності приймача. Такий режим роботи довгої лінії називають **режимом узгодженого навантаження**.

Якщо опір навантаження рівний 0 ; ∞ або має тільки реактивний характер, в лінії виникає режим **стоячої хвилі**. Передачі енергії від джерела до навантаження не відбувається.

Змішаний режим – коли в лінії є біжучі хвилі і стоячі хвилі. Цей режим виникає, коли навантаження носить комплексний характер. У змішаному режимі передається у навантаження мала частка енергії джерела живлення.

Щоб лінія передавала максимальну потужність до навантаження і одночасно була неспотвореною, потрібно виконати дві умови:

1. Узгодження лінії як збоку навантаження ($Z_n = Z_C$), так і збоку генератора ($Z_G = Z_C$). Це умова повного узгодження лінії, що виключає виникнення відбитих хвиль як від кінця, так і від її початку.

2. Для лінії без втрат ($\alpha = 0$) швидкість розповсюдження хвиль повинна бути постійною

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \text{const.} \quad (30.7)$$

Ця умова виконується, коли коефіцієнт фази буде лінійно залежати від частоти

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (30.8)$$

Однорідна лінія характеризується **вторинними параметрами** (Z_C і γ). Для визначення їхніх значень на заданій частоті достатньо виміряти вхідний опір лінії для двох значень опорів навантаження лінії.

На практиці знайшов широке застосування метод вимірювання параметрів лінії, що отримав назву методу неробочого ходу (НХ) і короткого замикання (КЗ). З рівнянь (30.4), прийняв $\underline{I}_2 = 0$ (режим НХ), а потім $\underline{U}_2 = 0$ (режим КЗ), знаходять $Z_{НХ}$ і $Z_{КЗ}$ лінії:

$$\begin{aligned} Z_{НХ} &= \frac{U_0}{I_0} = Z_C \operatorname{ch} \gamma \cdot \ell, \quad \underline{I}_2 = 0, \\ Z_{КЗ} &= \frac{U_{КЗ}}{I_{КЗ}} = Z_C \operatorname{th} \gamma \cdot \ell, \quad \underline{U}_2 = 0, \end{aligned} \quad (30.9)$$

де U_2, I_2 – комплексні діючі значення напруги і струму на початку лінії (якщо $x = \ell$); ℓ – довжина лінії; $\gamma \ell$ – стала передачі.

Спільне рішення (30.9) дозволяє визначити хвильовий опір лінії.

Довгу лінію можливо розглядати як пасивний чотириполіусник з

еквівалентною Т-подібною або П-подібною схемою. Тому приблизно можна лінію кінцевої довжини замінити коловою схемою з кінцевим числом Т або П ланок із зосередженими параметрами. Чим більше ланок буде містити *колова* схема, тим вище буде точність моделювання.

Можливість моделювання довгих ліній має велике значення при їхньому проектуванні, експериментальному дослідженні у лабораторних умовах процесів у довгих лініях, а також в різних схемах, що поєднуються довгими лініями. Штучні довгі лінії використовуються у електроніці як лінії затримки.

Для розрахунку параметрів моделі довгої лінії приймаємо, що лінія замінена еквівалентною *коловою* схемою, яка містить n ланок. Кожна ланка такої схеми являє собою П-подібний чотириполіусник – фільтр низьких частот. У розрахунках будемо вважати, що лінія є однорідною і без втрат, а параметри L_0 (Гн/м); C_0 (Ф/м) будемо вважати погонними параметрами (первинними). Визначимо параметри довгої лінії з рівнянь (30.1)-(30.5).

1. Визначимо частоту, при якій електрична довжина лінії, що містить n ланок, буде дорівнювати довжині хвилі генератора, підключеного до входу лінії

$$f_0 = \frac{1}{n\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (30.10)$$

2. Еквівалентна електрична довжина лінії

$$\ell_e = \frac{c}{f_0} = cn \sqrt{L_0 C_0} = \lambda.. \quad (30.11)$$

Якщо повітряна лінія мала такі ж первинні параметри, що і модель, на частоті 50 Гц вона повинна мати довжину

$$\ell_e = \frac{c}{50n}$$

3. Хвильовий опір лінії

$$Z_c = \rho = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (30.12)$$

4. Коефіцієнт поширення

$$\gamma = j\omega \sqrt{L_0 C_0} = j\beta. \quad (30.13)$$

5. Час затримки

$$\tau = n \sqrt{L_0 C_0}. \quad (30.14)$$

6 Вхідний опір лінії залежить від режиму роботи лінії:

- 1) режим неробочого ходу ($Z_H = \infty, Z_2 = 0$);
- 2) режим короткого замикання ($Z_H = 0; \underline{U}_2 \neq 0$);
- 3) режим роботи на реактивне навантаження ($Z_H = jX_H; \underline{U}_2 \neq 0; \underline{I}_2 \neq 0; \varphi_2 = \pm \frac{\rho}{2}$);
- 4) режим роботи на узгоджене навантаження ($Z_H = Z_C = \rho, \underline{U}_2 \neq 0; \underline{I}_2 \neq 0; \varphi_2 = 0$);
- 5) режим роботи на неузгоджене навантаження ($Z_H \neq Z_C; \underline{U}_2 \neq 0; \underline{I}_2 \neq 0, \varphi_2 < \pm \frac{\rho}{2}$);

Режими 1), 2), 3) є режимами стоячих хвиль у довгій лінії. Передачі енергії від генератора до навантаження відсутнє. При узгодженому навантаженні (режим 4) в лінії встановлюється режим біжучої хвилі в навантаження передається максимальна ємність. Якщо навантаження носить комплексний характер, то в лінії устанавлюється змішаний режим, при якому в лінії існують і стоячі хвилі і хвилі, що біжать. Передається до навантаження тільки частина енергії генератора.

6.1. Вхідний опір розімкнутої лінії без втрат (режим НХ) є реактивним

$$-Z_{HX} = jZ_C \operatorname{ctg} \beta \ell = jZ_C \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} \ell. \quad (30.15)$$

Якщо $\frac{3}{4} \lambda < \ell < \lambda$, то Z_{HX} є індуктивністю, а при $\frac{1}{2} \lambda < \ell < \frac{3}{4} \lambda$ – ємність.

6.2. Вхідний опір короткозамкненої лінії без втрат (режим КЗ) є також реактивним

$$-Z_{KЗ} = jZ_C \operatorname{tg} \beta \ell = jZ_C \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \ell. \quad (30.16)$$

Опір в залежності від довжини ℓ може бути індуктивним або ємнісним.

Якщо $\frac{3}{4} \lambda < \ell < \lambda$, то вхідний опір ємнісний, а при умові $\frac{1}{2} \lambda < \ell < \frac{3}{4} \lambda$ – індуктивність. При $\ell = \lambda$, лінія може бути представлена послідовним резонансним контуром, а при $\ell = \frac{3}{4} \lambda$ – паралельним.

6.3. Вхідний опір лінії, яка навантажена на індуктивність або ємність.

В цьому випадку реактивне навантаження можна представити відрізком лінії довжиною менше $\frac{1}{4} \lambda$. При індуктивному навантаженні $Z_H = jX_L$ відрізком короткозамкненої лінії, довжину ℓ якого можна визначити з співвідношення

$$\omega L = g \frac{2\pi}{\lambda} \ell'. \quad (30.17)$$

Для ємнісного навантаження $Z_H = -jX_C$ вибирають відрізок лінії довжиною ℓ' , розімкнений на кінці

$$\frac{1}{\omega C} = Z_C \cdot \text{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} \ell'. \quad (30.18)$$

Таким чином, лінія, навантажена на індуктивність або ємність, може бути замінена лінією, замкненою або розімкненою в кінці, еквівалентна довжина якої збільшена на ℓ' . Вхідний опір буде носити реактивний характер.

6.4. Вхідний опір лінії, навантаженої на узгоджене навантаження, буде носити активний характер

$$Z_{ex} = Z_C = \rho. \quad (30.19)$$

Вхідний опір лінії, навантаженої на неузгоджене навантаження носить комплексний характер якщо $\alpha \neq 0$

$$Z_{ex} = Z_C = \frac{Z_H + Z_C \cdot \text{tg} \beta \cdot \ell}{Z_H \cdot \text{th} \beta \cdot \ell + Z_C}. \quad (30.20)$$

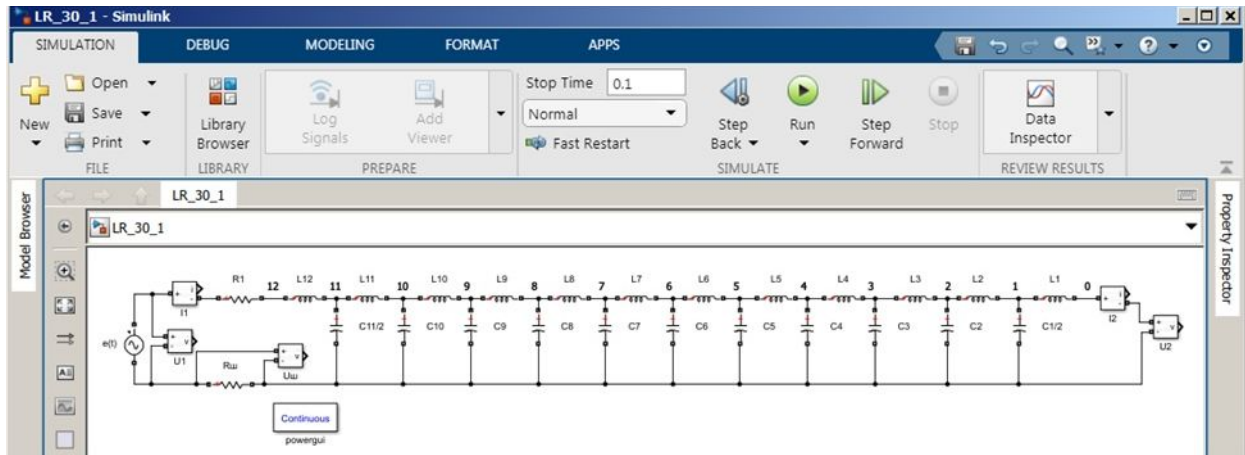
3. План роботи

1. Зібрати схему рис. 30.1.

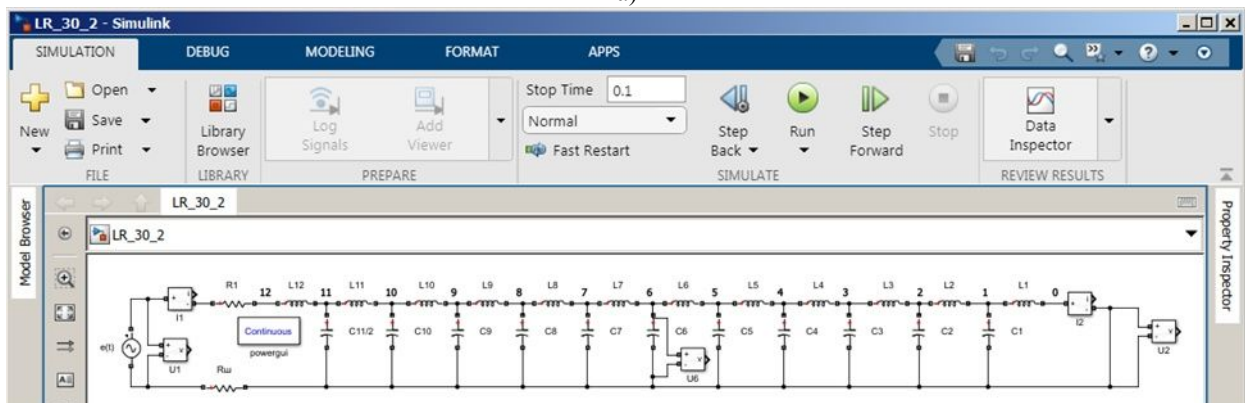
При складанні розрахункової схеми прийняті наступні допущення:

- модель довгої лінії виконана з 12 однакових П-подібних ланок, з'єднаних каскадно; П-подібні ланки виконані з елементів з зосередженими

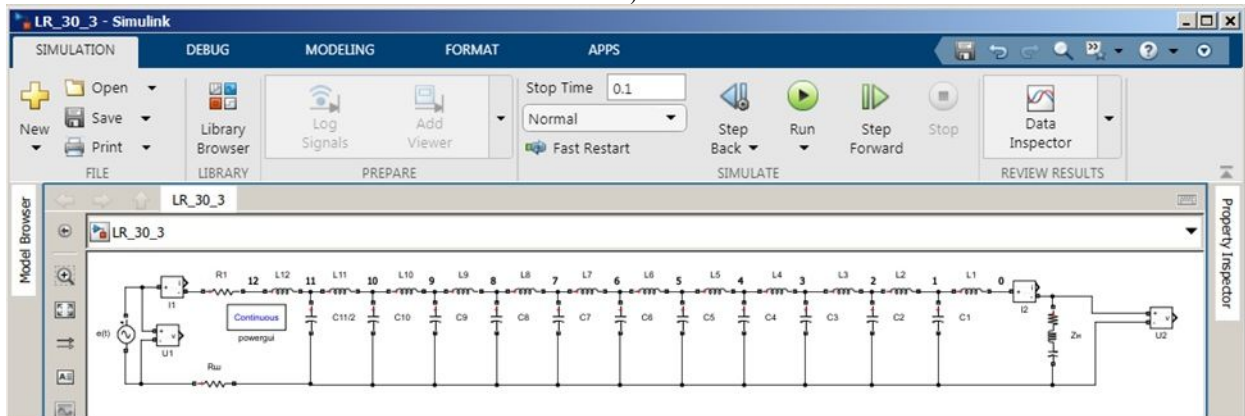
параметрами L_0 і $\frac{C_0}{2}$;



а)



б)



в)

Рисунок 30.1 – Розрахункові схеми дослідження довгої лінії:

а) для НХ; б) для КЗ; в) для навантажень різного характеру.

- вимірювальні прилади підключаються до кожної ланки, нумерація яких виконана від кінця лінії;

Параметри моделі довгої лінії: $R_1 = N$ Ом; $R_{ш} = 18+N$ Ом; $L_0 = 6+N$ мГн; $C_0 = 4 \cdot N$ мкФ; $Z_2 = 1,1 \cdot N e^{j0}$ кОм; $Z = 2,2 \cdot N e^{j0}$ кОм; $C_n = 3 \cdot N$ мкФ; $L_n = 5+N$ мГн; кількість ланок $n=12$.

2. Зробити попередній розрахунок моделі довгої лінії: визначити частоту генератора f_0 і вторинні параметри лінії: хвильовий опір Z_C коефіцієнт розповсюдження γ .

3. Встановити амплітудну напругу $U_m = 6-10$ В. Скласти схему для режиму КЗ (рис. 30.1, б). Підключити вимірювач напруги **U6** до входу **6**. Для визначення частоти, при якій на лінії укладається одна хвиля, слід послідовно відкрити вікно налагодження блоку **Powergui** і на панелі **Tools** натиснути кнопку **Use Linear System Analyzer**. Для проведення лінійного аналізу необхідно натиснути кнопку **Open Linear System Analyzer**, і вибрати напругу вимірювача напруги **U6**. Потім в полі вікна, що з'явилося, клацнути правою кнопкою і в меню, що розкрилося, з рядка **Plot Types** вибрати тип лінійного аналізу **Bode**, за допомогою якого реалізується аналіз частотної залежності амплітуди розглянутого кола. Частота, при якій напруга буде мінімальна і буде шуканою частотою. Знайдена частота встановити в джерелі $e(t)$. В подальших експериментах частоту не змінювати.

4. Дослідити розподілення напруги у довгій лінії при різних опорах навантаження (рис. 30.1, в), заміряючи напругу на відводах ланок лінії (0-12), експериментальні дані занести до табл. 30.1.

5. Виміряти вхідний опір лінії в режимі НХ (Z_{HX}). Для цього скласти схему для режиму НХ (рис. 30.1, а). Вимірювач напруги **U_u** підключити паралельно R_u . Виміряти напругу на вході лінії U_{mHX} і виміряти напругу на R_u , а також фазу (відносно U_{mHX}). За законом Ома розрахувати струм I_{mHX} , а потім Z_{HX}

$$\underline{Z}_{HX} = \frac{U_{mHX}}{I_{mHX}}. \quad (30.21)$$

Треба врахувати, що напругу R_u повернута на 180° .

6. Виміряти вхідний опір лінії в режимі КЗ (Z_{K3}). Для цього скласти схему для режиму НХ (рис. 30.1, б). і повторити виміри згідно пункту 5. За результатами вимірів визначити

$$\underline{Z}_{K3} = \frac{U_{mK3}}{I_{mK3}}. \quad (30.22)$$

Таблиця 30.1 – Результати експериментальних досліджень довгої лінії

Номери відводів	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\frac{1}{\lambda}$	0	$\frac{1}{12}$	$\frac{2}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{4}{12}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{6}{12}$	$\frac{7}{12}$	$\frac{8}{12}$	$\frac{9}{12}$	$\frac{10}{12}$	$\frac{11}{12}$	$\frac{12}{12}$
НХ $Z_H = \infty$; $U_m, В$													
КЗ $Z_H = 0$; $U_m, В$													
$Z_H = Z_C$; $U_m, В$													
$Z_H = j\omega L_0$; $U_m, В$													
$Z_H = -\frac{1}{j\omega L_0}$; $U_m, В$													
$Z_H = 2Z_C$; $U_m, В$													

7. За результатами 6 вимірів побудувати криві розподілення напруги вздовж лінії для всіх видів навантаження.

8. За результатами вимірів пунктів 5 і 6 розрахувати вторинні параметри довгої лінії і порівняти з теоретичними розрахунками.

4. Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Досліджувані схеми. Таблиця. Графіки.
3. Розрахунки за результатами досліджень.
4. Висновок щодо умов створення узгодженої довгої лінії..

5. Контрольні запитання

1. Що розуміють під довгою лінією?
2. Які параметри довгої лінії називають первинними?
3. Які параметри довгої лінії називають вторинними?
4. За яких умов довга лінія вважається лінією без втрат?
5. Який фізичний смисл фазової частоти?
6. За яких умов в лінії виникають стоячі хвилі?

7. За яких умовах в лінії виникають хвилі що біжать?
8. За яких умовах в лінії виникають змішані хвилі?
9. Чому при відсутності активного опору і активної провідності довгу лінію називають лінією без втрат?
10. Як визначити хвильовий опір довгої лінії?
11. Як визначити коефіцієнт розповсюдження хвилі в лінії?
12. Як визначити час затримки довгої лінії?

ДОДАТОК А

Розробка моделей електричних кіл у середовищі *MATLAB/SIMULINK*

1. Загальні відомості

Програма *Simulink* є додатком до пакетів *MATLAB*. При моделюванні з використанням *Simulink* реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою та здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачеві не потрібно досконально вивчати мову програмування та чисельні методи математики, а досить загальних знань, які потрібні при роботі на комп'ютері і, природно, знань тієї предметної області, в якій він працює.

Результати моделювання представляються у вигляді графіків або таблиць.

2. Запуск *Simulink*

Для запуску програми необхідно запустити пакет *MATLAB*. Основне вікно пакету *MATLAB* показано на рис. А.1

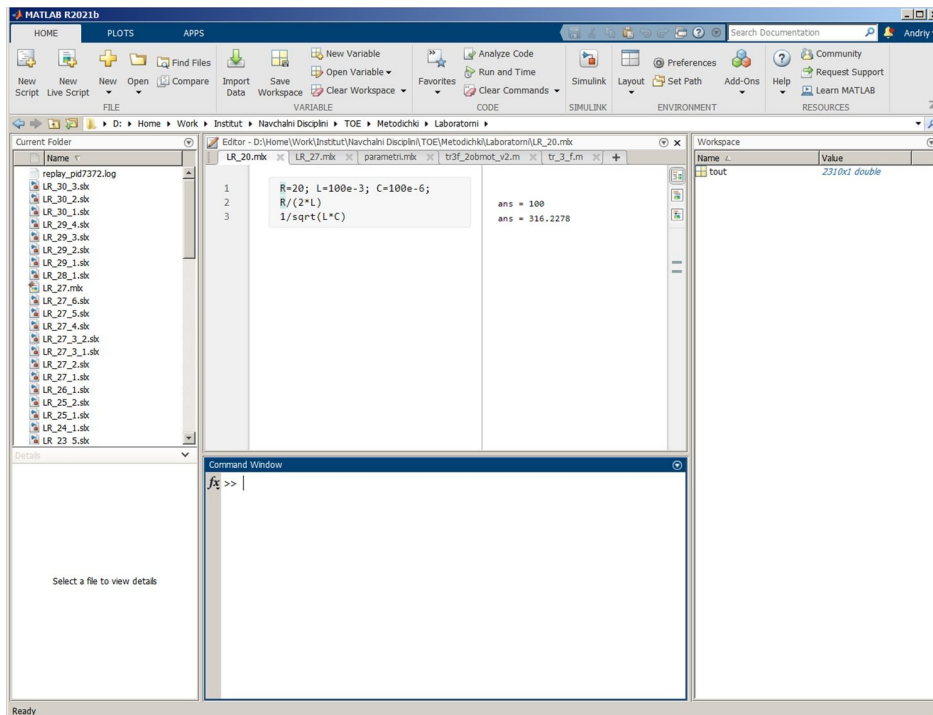


Рисунок А.1 – Основне вікно програми *MATLAB*

Після відкриття основного вікна програми **MATLAB** потрібно запустити програму **Simulink**, натиснувши кнопку **Simulink** на панелі інструментів командного вікна **MATLAB**, що призводить до відкриття вікна браузера розділів бібліотеки **Simulink**.

3. Оглядач розділів бібліотеки **Simulink**

Вікно браузера бібліотеки блоків містить такі елементи (рис. А.2):

Заголовок з назвою вікна - **Simulink Library Browser**.

Бібліотека **Simulink** містить такі основні розділи:

Commonly Used Blocks – найчастіше використовувані блоки;

Continuous – лінійні блоки;

Dashboard – блоки панелей приладів;

Discrete – дискретні блоки;

Logic and Bit Operations – блоки логічних та бітових операцій;

Lookup Tables – блоки таблиць пошуку;

Math Operations – блоки математичних операцій;

Matrix Operations – блоки матричних операцій;

Messages & Events – блоки повідомлень та подій;

Model Verification – блоки перевірки моделей;

Model-Wide Utilities – блоки універсальних утиліт моделі;

Ports & Subsystems – блоки портів та підсистем;

Signals Attributes – блоки атрибутів сигналів;

Signals Routing – блоки маршрутизації сигналів;

Sinks – блоки реєструючих пристроїв;

Sources – блоки джерел сигналів та впливів;

String – блоки роботи з рядками;

User-Defined Functions – блоки функцій користувача;

Additional Math & Discrete – блоки розширеної математики та дискретності;

Quick Insert – набір попередніх блоків для швидкої вставки.

Список розділів бібліотеки *Simulink* представлений у вигляді дерева та правила роботи з ним є загальними для списків такого виду: піктограма згорнутого вузла дерева містить символ "+", а піктограма розгорнутого містить символ "-".

Щоб розгорнути або згорнути вузол дерева, достатньо клацнути на його піктограмі лівою клавішею миші (ЛКМ).

При виборі відповідного розділу бібліотеки у правій частині вікна відображається вміст (рис. А.2).

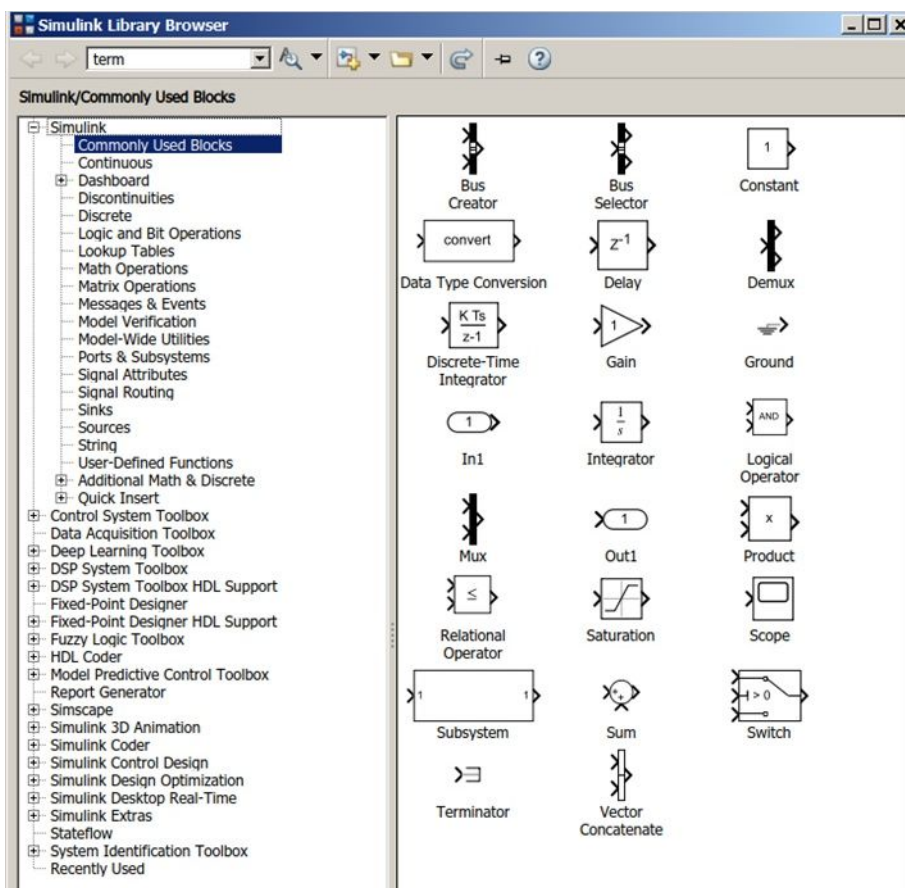


Рисунок А.2 – Вікно браузера розділів бібліотеки *Simulink* з вибраним блоком *Math Operation/Product*

4. Створення моделі

Для створення моделі в середовищі *SIMULINK* необхідно послідовно виконати низку дій.

Створити новий файл моделі за допомогою команди *HOME/New/Simulink Model* або за допомогою кнопки на панелі інструментів.

Розташувати блоки у вікні моделі. Для цього необхідно відкрити відповідний розділ бібліотеки (наприклад, *Sources* – Джерела). Далі, вказавши курсором на необхідний блок і натиснувши ліву клавішу “миші” і перетягнути блок у створене вікно. Клавішу миші потрібно тримати натиснутою. На рис. А.3 показано вікно моделі, що містить блоки.

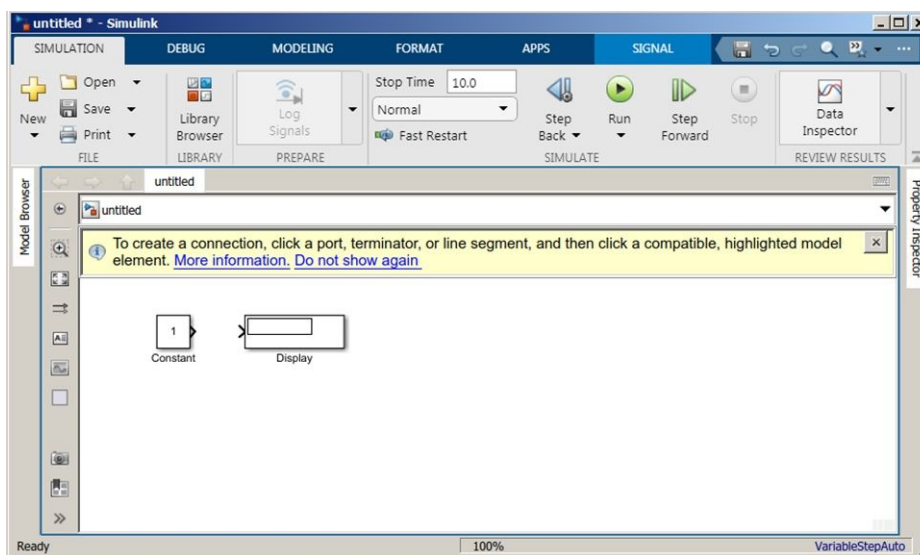


Рисунок А.3 – Вікно моделі, що містить блоки

Для видалення блоку необхідно вибрати блок (вказати курсором на його зображення та натиснути ліву клавішу миші), а потім натиснути клавішу *Delete* на клавіатурі.

Для зміни розмірів блоку потрібно вибрати блок, встановити курсор в один із кутів блоку і, натиснувши ліву клавішу “миші”, змінити розмір блоку (курсор при цьому перетвориться на двосторонню стрілку).

Змінити параметри блоку, встановлені за замовчуванням. Для цього потрібно двічі клацнути лівою кнопкою “миші”, вказавши курсором на зображення блоку. Відкриється вікно редагування параметрів блоку. При задані чисельних параметрів слід мати на увазі, що як десятковий роздільник повинна використовуватися точка, а не кома. Після внесення змін потрібно закрити кнопкою *OK*.

Після встановлення на схемі всіх блоків із потрібних бібліотек потрібно з'єднати елементи схеми. Для з'єднання блоків необхідно вказати курсором на "вихід" блоку, а потім натиснути і, не відпускаючи ліву клавішу "миші", провести лінію до входу іншого блоку. Після цього відпустити клавішу (рис.

A.4).

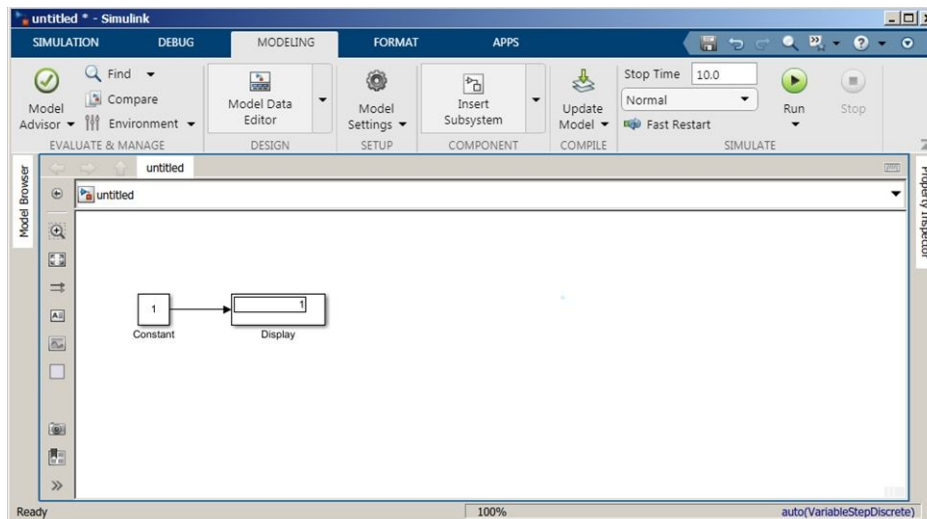


Рисунок А.4 – Схема моделі, в якій змінені параметри блоку *Constant* та виконані з'єднання між блоками.

Після складання розрахункової схеми необхідно зберегти її у вигляді файлу на диску, вибравши пункт меню *SIMULATION / Save As...* у вікні схеми та вказавши папку та ім'я файлу. Слід мати на увазі, що ім'я файлу не повинно перевищувати 32 символи, починатися з літери і не може містити символи кирилиці та спецсимволи. Ця ж вимога стосується і шляху файлу (до тих папок, в яких зберігається файл). При наступному редагуванні схеми можна скористатися пунктом меню *SIMULATION / Save*.

5. Вікно моделі

Вікно моделі містить такі елементи (рис. А.4):

Заголовок з назвою вікна. Новоствореному вікну надається ім'я *untitled** з відповідним номером.

Меню вікна містить команди для редагування моделі, її налаштування та керування процесом розрахунку:

SIMULATION (Моделювання) — використання файлів моделей, встановлення параметрів для моделювання та керування процесом розрахунку;

DEBUG (Відлагодження) – відлагодження та аналіз симуляції, встановлення точки зупинки, кроку;

MODELING (Моделювання) – встановлення параметрів моделювання;

FORMAT (Форматування) — Зміна зовнішнього вигляду блоків та моделі загалом;

APPS (Додатки) – робота з додатками **SIMULINK**.

Для роботи з моделлю можна використовувати кнопки на панелі інструментів (рис. А.5).

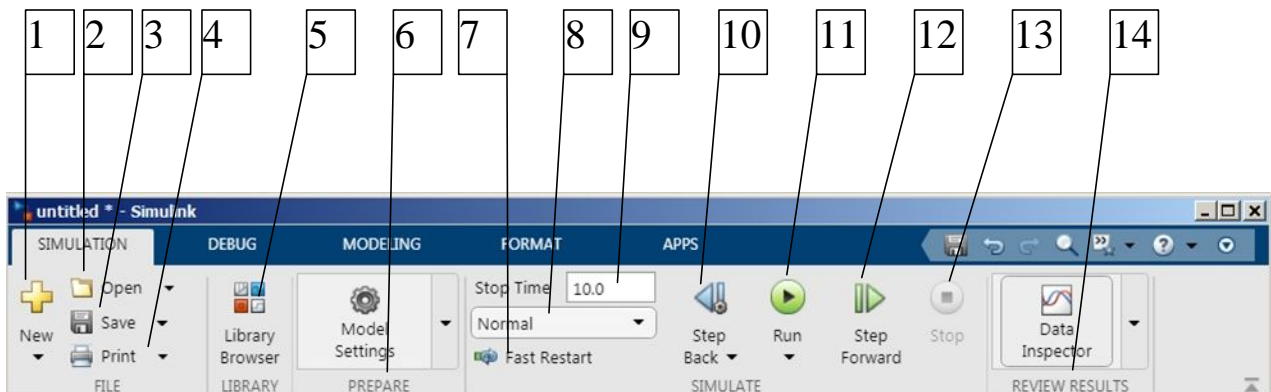


Рисунок А.5 – Панель інструментів вікна моделі

Кнопки панелі інструментів мають таке призначення:

- 1 – створення нового (порожнього) вікна моделі;
- 2 – відкриття існуючого файлу моделі;
- 3 – збереження файлу моделі на диску;
- 4 – виведення на друк моделі;
- 5 – відкриття вікна бібліотеки **Simulink**;
- 6 – вікно підготовки моделі;
- 7 – пуск симуляції з швидким перезапуском без повторної компіляції;
- 8 – вибір режиму швидкості моделювання;
- 9 – кінцева точка (час) моделювання;
- 10 – крок назад виконання моделі;;
- 11 – запуск моделі на виконання (команда **Start**); після запуску моделі на зображенні кнопки виводиться символ II, і їй відповідає команда **Pause** (Призупинити моделювання);
- 12 – крок вперед виконання моделі;
- 13 – закінчити моделювання. Кнопка стає доступною після початку моделювання та після виконання команди **Pause**.;
- 14 – перегляд результатів моделювання.

У нижній частині вікна моделі знаходиться рядок стану, в якому відображаються короткі коментарі до кнопок панелі інструментів, а також до пунктів меню, коли вказівник миші знаходиться над відповідним елементом інтерфейсу:

- індикація стану *Simulink - Ready* (Готовий), *Running* (Виконання);
- масштаб відображення блок-діаграми (у відсотках, вихідне значення дорівнює 100%);
- індикатор ступеня завершеності сеансу моделювання (з'являється після запуску моделі),
- поточне значення модельного часу (виводиться також після запуску моделі),
- використовуваний алгоритм розрахунку станів моделі (метод розв'язання).

6. Основні прийоми редагування моделі

6.1. Додавання текстових написів

Для підвищення наочності моделі зручно використовувати текстові написи. Для створення напису потрібно вказати мишею місце напису та двічі клацнути лівою кнопкою миші. Після цього з'явиться прямокутна рамка із курсором введення. Аналогічно можна змінити і підписи до блоків моделей. Слід мати на увазі, що дана версія програми не адаптована до використання кириличних шрифтів і застосування їх може мати різні наслідки: - відображення написів у нечитаному вигляді, обрізання написів, повідомлення про помилки, а також неможливість відкрити модель після її збереження.

6.2. Виділення об'єктів

Для виконання будь-якої дії з елементом моделі (блоком, сполучною лінією, написом), цей елемент необхідно спочатку виділити.

Виділення об'єктів найпростіше здійснюється мишею. Для цього необхідно встановити курсор миші на потрібному об'єкті та клацнути лівою клавішею миші. Відбудеться виділення об'єкта. Про це свідчать маркери по

кутах об'єкту. Також можна виділити кілька об'єктів. Для цього потрібно встановити курсор миші поблизу групи об'єктів, натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, почати переміщати мишу. З'явиться пунктирна рамка, розмір якої буде змінюватися при переміщенні миші. Усі охоплені рамкою об'єкти стають виділеними. Виділити всі об'єкти можна також, використовуючи команду *Select All*.

6.3. Копіювання та переміщення об'єктів у буфер проміжного зберігання

Для копіювання об'єкта в буфер необхідно попередньо виділити, а потім виконати команду *Copy* або скористатися контекстним меню правої кнопки миші.

Щоб вирізати об'єкт у буфер, його необхідно попередньо виділити, а потім виконати команду *Cut* або скористатися контекстним меню правої кнопки миші. При виконанні даних операцій слід мати на увазі, що об'єкти розміщуються у власному буфері *MATLAB* і недоступні з інших програм.

6.4. Вставка об'єктів із буфера проміжного зберігання

Для вставки об'єкта з буфера необхідно заздалегідь вказати місце вставки, клацнувши лівою клавішею миші в передбачуваному місці вставки, а потім виконати команду *Paste* або скористатися контекстним меню правої кнопки миші.

6.5. Видалення об'єктів

Для видалення об'єкта його необхідно попередньо виділити, а потім виконати команду *Clear* або скористатися кнопкою *Delete* на клавіатурі. Слід врахувати, що команда *Clear* видаляє блок без поміщення його в буфер обміну. Однак, цю операцію можна скасувати командою меню *Undo*.

6.6. З'єднання блоків

Для з'єднання блоків необхідно спочатку встановити курсор на вихідний порт одного з блоків. Курсор при цьому перетвориться на великий хрест із тонких ліній. Тримавши ліву кнопку миші, потрібно перемістити курсор до вхідного порту потрібного блоку. Курсор миші набуде вигляду хреста з тонких

здвоєних ліній. Після створення лінії потрібно відпустити ліву клавiшу миші. Свідченням того, що з'єднання створено буде жирна стрілка біля вхідного порту блоку. Виділення лінії проводиться так само як і виділення блоку - одинарним клацанням лівої клавiші миші. Чорні маркери, розташовані у вузлах сполучної лінії, будуть говорити про те, що лінія виділена.

Видалення з'єднань виконується як і будь-яких інших об'єктів (див. п. 6.5).

6.7. Зміна розмірів блоків

Для зміни розміру блоку він виділяється, після чого курсор миші треба встановити один з маркерів по кутах блоку. Після перетворення курсору на двосторонню стрілку, необхідно натиснути ліву клавiшу миші і розтягнути (або стиснути) зображення блоку.

6.8. Переміщення блоків

Будь-який блок моделі можна перемістити, виділивши його, і пересунувши, тримаючи ліву клавiшу миші. Якщо до входів та виходів блоку підведені сполучні лінії, то вони не розриваються, а лише скорочуються чи збільшуються у довжині.

Для переміщення виділеного блоку без з'єднувальних ліній необхідно тримати натиснутою клавiшу *Shift*.

У з'єднання можна вставити блок, що має один вхід і один вихід. Для цього його потрібно розташувати у потрібному місці сполучної лінії.

6.9. Використання команд *Undo* та *Redo*

При випадковому видаленні частини моделі, уведення неправильної команди і т.д. слід скористатися командою *Undo* – скасування останньої операції. Команду можна викликати за допомогою контекстного меню правої кнопки миші. Для відновлення скасованої операції слугує команда *Redo*.

6.10. Форматування об'єктів

В контекстному меню *Format* (яке викликається натисканням правої клавiші миші на об'єкті) знаходиться набір команд форматування блоків. Команди форматування поділяються на кілька груп:

Arrange Automatically – автоматичне впорядкування блоків;

Зміна відображення написів:

Show Block Name – відображення або приховування підпису блоку;

Зміна кольорів відображення блоків:

Foreground color – вибір кольору ліній для виділених блоків;

Background color – вибір кольору виділених блоків фону;

Зміна положення блоку та його виду:

Rotate Clockwise – поворот блоку на 90° за годинниковою стрілкою;

Rotate Counterclockwise – поворот блоку на 90° проти годинникової стрілки;

Flip Block – дзеркальне відображення блоку відносно вертикальної осі симетрії;

Flip Block Name – дзеркальне відображення підпису блоку.

Зміна положення блоку відносно інших елементів моделі:

Bring to Front – винесення на передній план;

Send to Back – переміщення назад.

7. Встановлення параметрів розрахунку та його виконання

Встановлення параметрів розрахунку

Перед виконанням розрахунків необхідно задати параметри розрахунку.

Завдання параметрів розрахунку виконується на панелі керування меню **SIMULATION/ Model Settings**, або **MODELING/ Model Settings**. Вигляд панелі управління наведено на рис. А.6.

Вікно налаштування параметрів розрахунку має 5 вкладок:

Simulation time – встановлення часу моделювання;

Solver selection – встановлення параметрів розрахунку моделі;

Solver details – встановлення обмежень на кроки та точність параметрів розрахунку моделі;

Zero-crossing options – встановлення параметрів виявлення переходу моделі через нуль або розрив. Залишається без змін;

Tasking and sample time options – встановлення параметрів, які контролюють інтервал часу та процес моделювання. Залишається без змін.

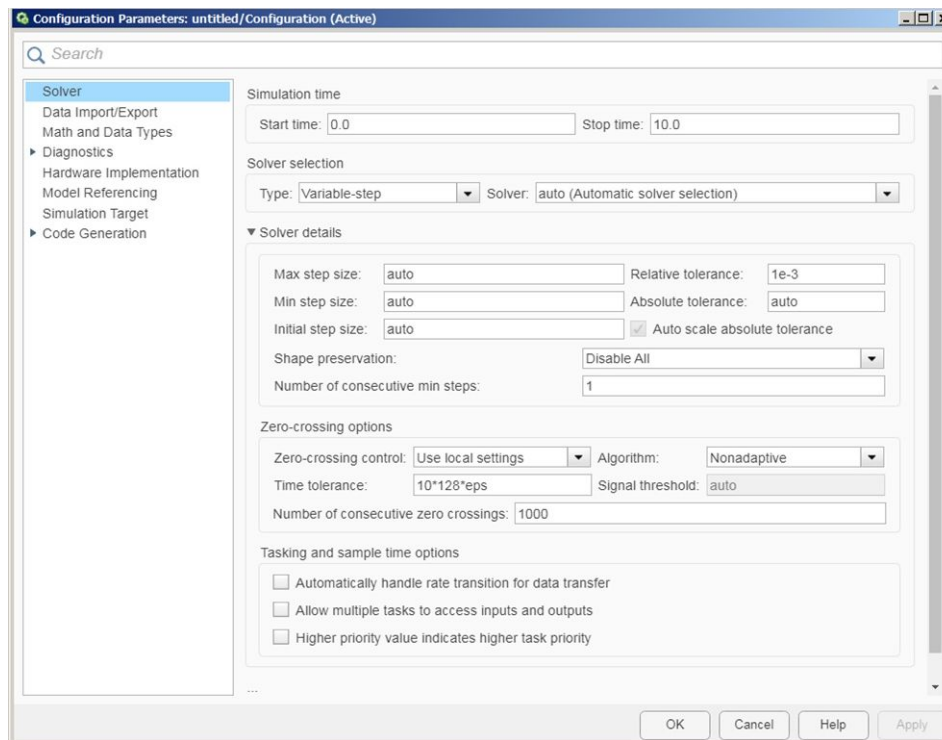


Рисунок А.6 – Панель управління

Час розрахунку задається вказівкою початкового та кінцевого значень часу розрахунку. Початковий час, зазвичай, задається рівним нулю. Величина кінцевого часу задається користувачем виходячи з умов задачі, що вирішується.

При виборі опцій розрахунку необхідно вказати спосіб моделювання (з фіксованим або змінним кроком) та метод розрахунку нового стану системи. Як правило, змінний крок використовується для моделювання безперервних систем, а фіксований крок – для дискретних.

Виконання розрахунку

Запуск розрахунку виконується за допомогою пункту меню ***SIMULATION/Start*** або інструмент ► на панелі інструментів. Процес розрахунку можна завершити достроково, вибравши пункт меню ***SIMULATION/Stop*** або інструмент ■. Розрахунок можна зупинити (***SIMULATION/Pause***) і потім продовжити (***SIMULATION/Continue***).

8. Завершення роботи

Для завершення роботи необхідно зберегти модель у файлі, закрити вікно моделі, вікно браузера бібліотек, а також основне вікно пакету ***MATLAB***.

9. Бібліотека блоків *Simulink*

9.1. *Sources* - джерела сигналів

9.1.1. Джерело постійного сигналу *Constant*

Призначення: задає постійний за рівнем сигнал (рис. А.4).

Значення константи може бути дійсним або комплексним числом, що обчислюється виразом, вектором або матрицею.

9.1.2. Генератор ступінчастого сигналу *Step*

Призначення: формує ступінчастий сигнал (рис. А.7).

Параметри: початкове значення сигналу, час кроку (с), кінцеве значення сигналу.

Перепад може бути як у більшу сторону (кінцеве значення більше ніж початкове), так і меншу (кінцеве значення менше ніж початкове). Значення початкового і кінцевого рівнів може бути як позитивними, а й негативними.

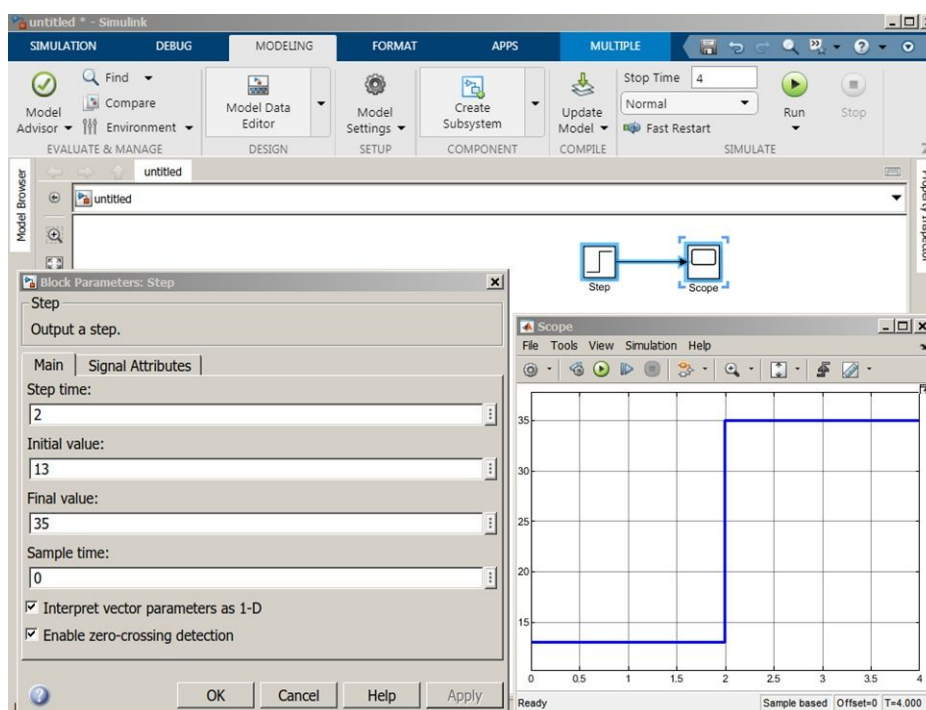


Рисунок А.7 – Використання генератора ступінчастого сигналу *Step*

9.1.3. Джерело синусоїдального сигналу *Sine Wave*

Призначення: формує синусоїдальний сигнал із заданою амплітудою, частотою, початковою фазою та зміщенням (рис. А.8).

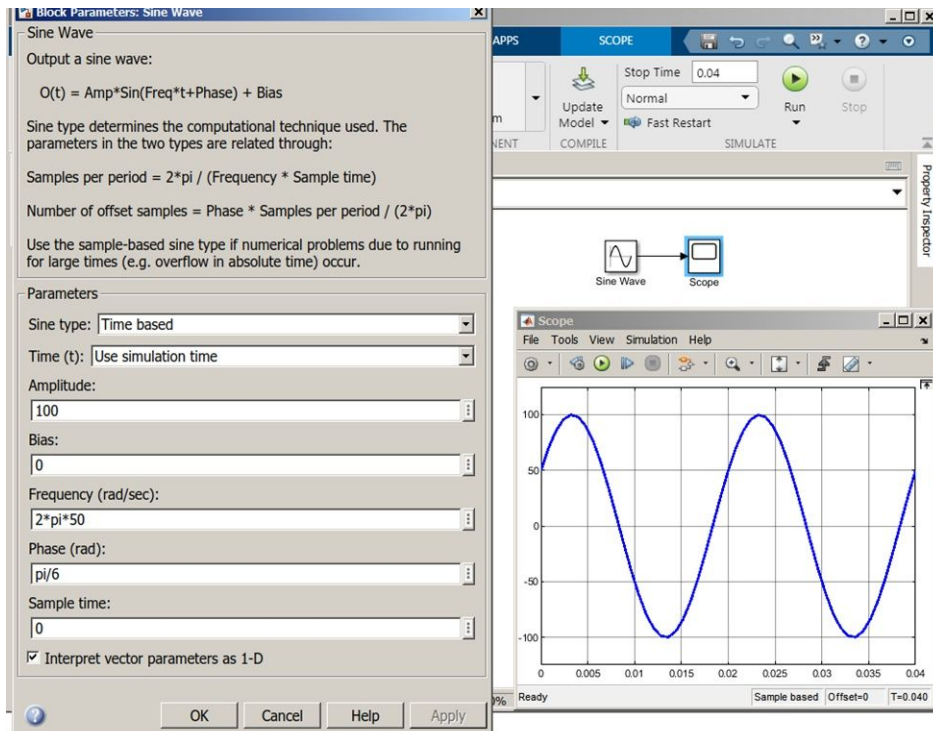


Рисунок А.8 – Блок *Sine Wave* при заданих амплітуді 100, частоті $2 \cdot \pi \cdot 50$ та початковій фазі $\pi/6$.

9.1.4. Джерело впливу, що лінійно змінюється *Ramp*

Призначення: формує сигнал, що лінійно змінюється (рис. А.9).

Параметри: початковий рівень сигналу виході блоку, час початку формування сигналу, швидкість зміни вихідного сигналу (*Slope*).

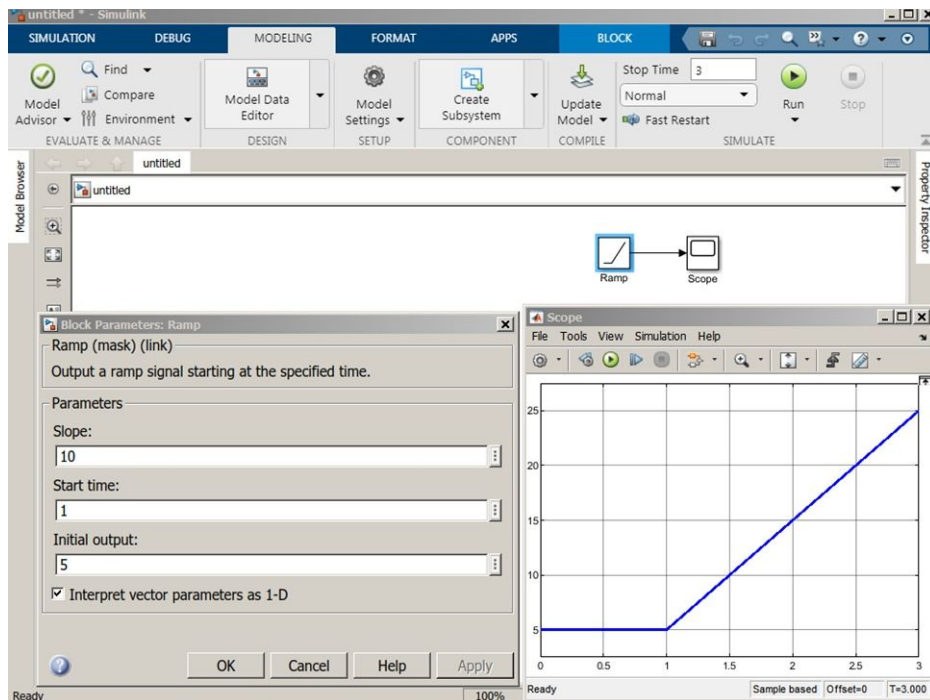


Рис. А.9. Блок *Ramp* при заданих параметрах: вихідний вихід 5, час початку 1, швидкість зміни 10.

9.2. Sinks - приймачі сигналів

9.2.1. Осцилограф *Scope*

Призначення: будує графіки досліджуваних сигналів у функції часу, що дозволяє спостерігати за змінами сигналів у процесі моделювання (рис. А.9).

Для того, щоб відкрити вікно перегляду сигналів, необхідно виконати подвійне клацання лівою клавішею “миші” на зображенні блоку. Це можна зробити будь-якому етапі розрахунку (як на початок розрахунку, і після нього, і навіть під час розрахунку). У тому випадку, якщо на вхід блоку надходить векторний сигнал, крива для кожного елемента вектора будується окремим кольором.

Панель інструментів (рис. А.10) для налаштування вікна осцилографа містить:

1 – доступ до вікон параметрів (кількість входів, колір побудови, кількість макетів, легенда);

2 – пуск моделювання;

3 – зміна масштабу по осях, переміщення по вікну;

4 – автоматичне встановлення масштабу;

5 – встановлення тригерів для синхронізації повторюваних сигналів і призупинення відображення у випадку настання події;

6 – вимірювання значення сигналу за допомогою вертикального та горизонтального курсорів.

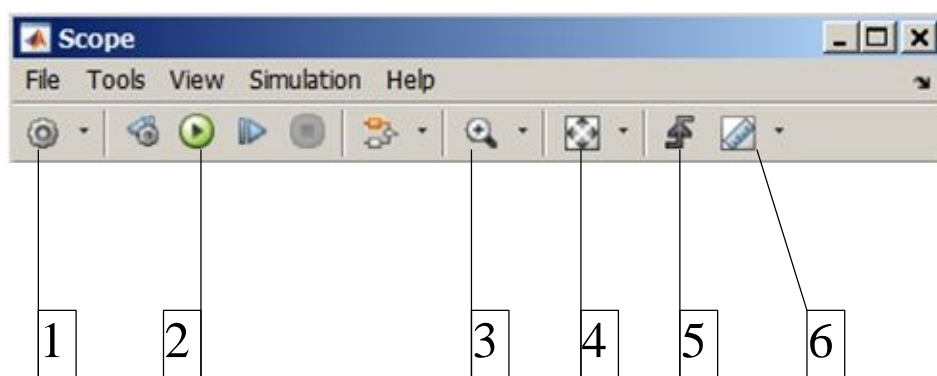


Рисунок А.10 – Панель інструментів блоку *Scope*

Зміну масштабів відображених графіків можна виконувати кількома способами:

- натиснути кнопку 3 і клацнути один раз лівою клавішею миші в потрібному місці графіка. Відбудеться 2,5-кратна зміна масштабу.
- натиснути кнопку 4 – область графіка масштабується до величини вікна блоку *Scope*.

Параметри блоку встановлюються у вікні *Configuration Properties...*, яке відкривається за допомогою кнопки 1 панелі інструментів. На вкладці *Main* (рис. А.11) задається кількість входів осцилографа *Number of input ports*. При зміні цього параметра на зображенні блоку з'являються додаткові порти.

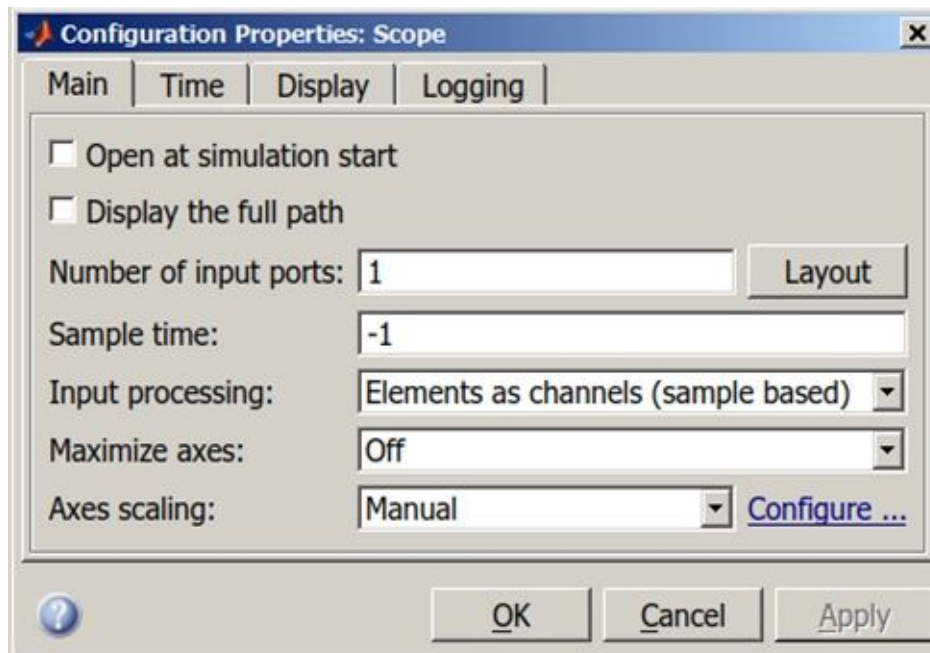


Рисунок А.11 – Завдання загальних параметрів блоку *Scope*.

Колір побудови встановлюються у вікні *Style...*, яке відкривається за допомогою кнопки 2 панелі інструментів. Тут встановлюються колір фону, осей, а також вид, товщина та колір ліній (рис. А.12) .

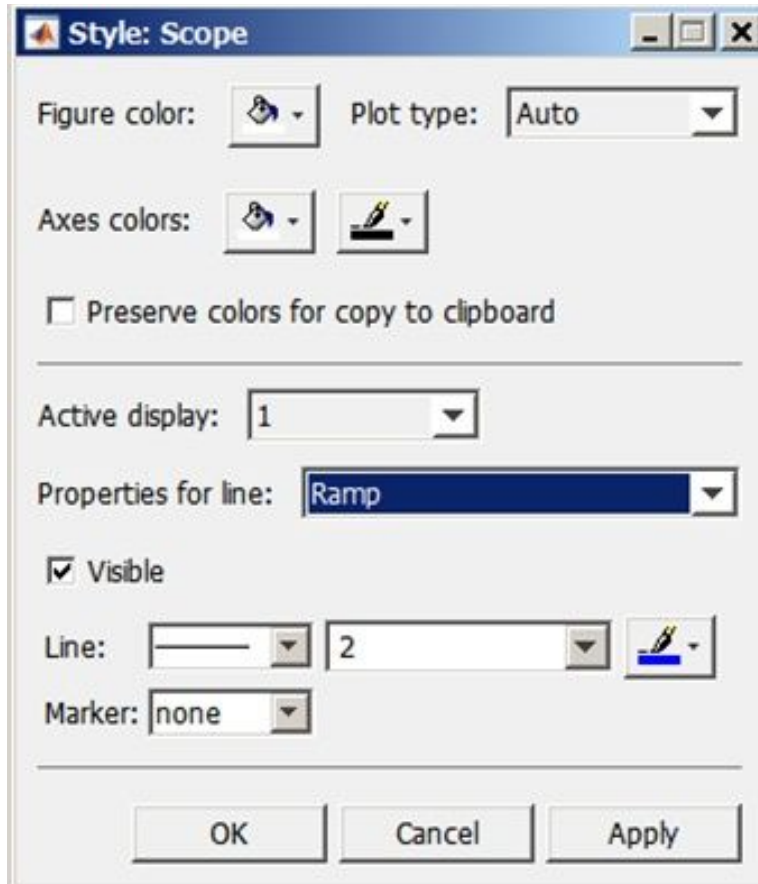


Рисунок А.12 – Завдання стилю блоку Scope.

9.2.3. Графобудівник *XY Graph*

Призначення: будує графік одного сигналу функції іншого (рис. А.13).

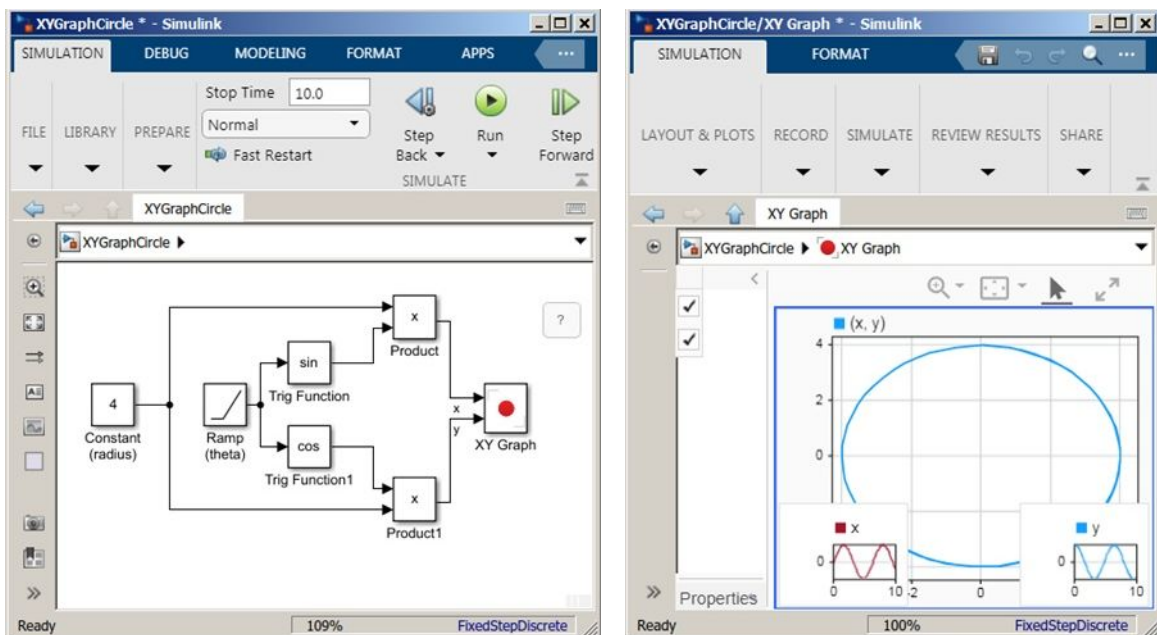


Рисунок А.13 – Використання блоку *XY Graph* для побудови кола

Блок має два входи. Верхній вхід призначений для подачі сигналу, що є аргументом (X), нижній – для подачі значень функції (Y).

9.2.4. Цифровий дисплей *Display*

Призначення: відображає значення сигналу як числа (рис. А.14).

Параметри – формат відображення даних:

short – 5 значущих десяткових цифр,

long – 15 значущих десяткових цифр,

short_e – 5 значущих десяткових цифр і 3 символи ступеня десяти,

long_e – 15 значущих десяткових цифр та 3 символи ступеня десяти,

bank – "грошовий" формат із фіксованою комою та двома десятковими цифрами в дробовій частині числа.

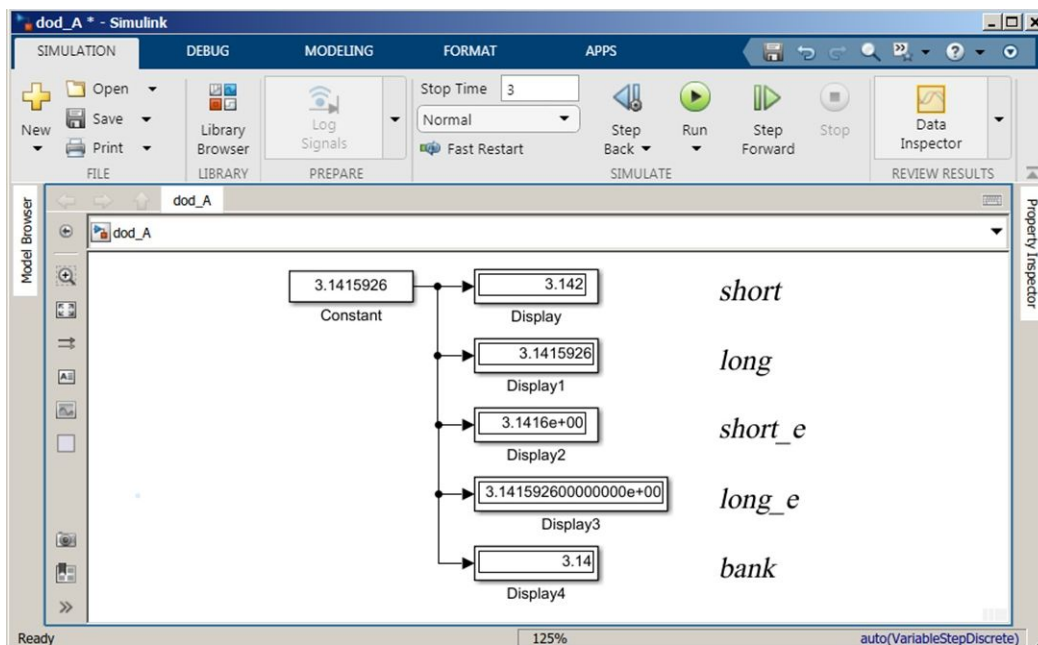


Рисунок А.14 – Застосування блоку *Display* за допомогою різних варіантів параметра *Format*

9.2.5. Змішувач *Mux*

Призначення: об'єднує вхідні сигнали одного типу (рис. А.15).

Параметри: *Number of inputs* – кількість входів;

Display option – параметр відображення:

bar – текст не відображається;

signals – відображає назви вхідних сигналів;

none – відображає тип блоку (*Mux*).

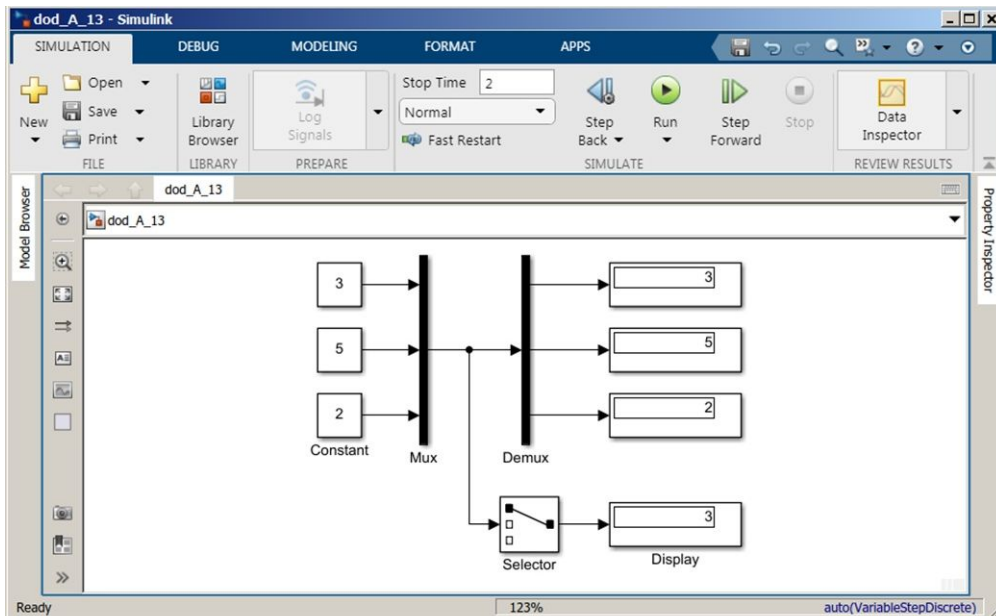


Рисунок А.15– Застосування блоків *Mux* і *Demux*

9.2.6. Розділювач *Demux*

Призначення: об'єднує вхідні сигнали одного типу (рис. А.15).

Параметри: *Number of outputs* – кількість виходів;

Display option – параметр відображення:

bar – текст не відображається;

none – відображає тип блоку (*Mux*).

9.3. *Continuous* – аналогові блоки

9.3.1. Блок обчислення похідної *Derivative*

Призначення: чисельне диференціювання вхідного аналогового сигналу.

Для обчислення похідної використовується наближена формула Ейлера

$$\frac{du}{dt} = \frac{\Delta u}{\Delta t},$$

де Δu – величина зміни вхідного сигналу за час Δt ; t – поточне значення етапу модельного часу.

Точність обчислення похідної залежить від величини встановленого кроку розрахунку. Вибір меншого кроку розрахунку покращує точність обчислення похідної.

9.3.2. Інтегруючий блок *Integrator*

Призначення: інтеграція вхідного аналогового сигналу.

9.4. Релейний блок *Relay*

Призначення: реалізує релейну нелінійність.

Вихідний сигнал блоку може набувати двох значень. Одне відповідає ввімкненому стану реле, друге – вимкненому. Перехід їхнього стану в інший відбувається стрибком при досягненні вхідним сигналом порога включення або вимкнення реле. Якщо пороги включення і вимкнення реле мають різні значення, то блок реалізує релейну характеристику з гістерезисом. При цьому значення порогу включення має бути більшим, ніж значення порогу вимкнення.

На рис. А.16 показаний приклад використання блоку *Relay*. На часових діаграмах видно, що включення реле відбувається при досягненні вхідним сигналом величини $+0.5$, а вимикання -0.5 .

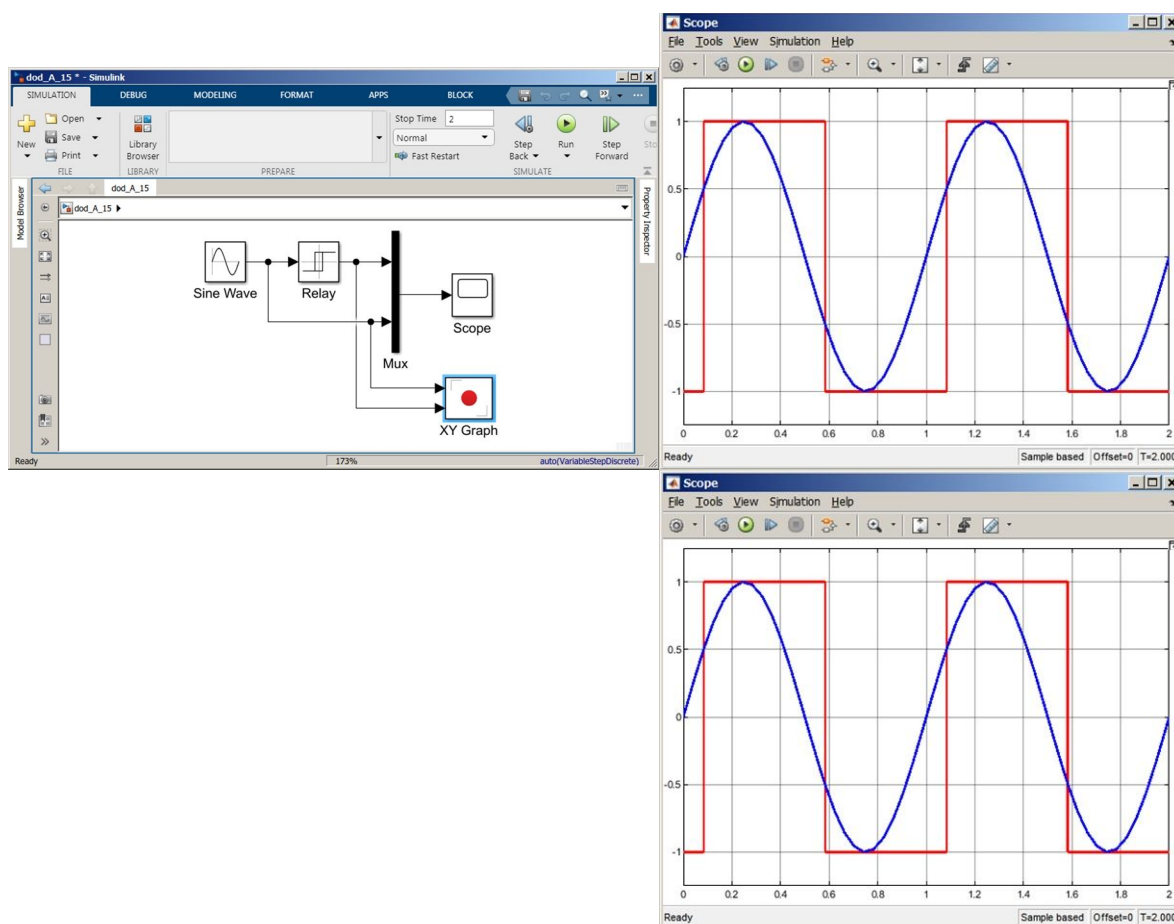


Рисунок А.16 – Приклад використання блоку *Relay*

9.6. *Math* – блоки математичних операцій

9.6.1. Блок обчислення суми *Sum*

Блок обчислення суми *Sum* призначений – обчислення суми (різниці)

поточних значень сигналів.

Параметр: *Number of inputs* – Кількість входів. Блок може бути використаний для сумування скалярних, векторних або матричних сигналів. Типи сигналів, які сумуються повинні співпадати (рис. А.17).

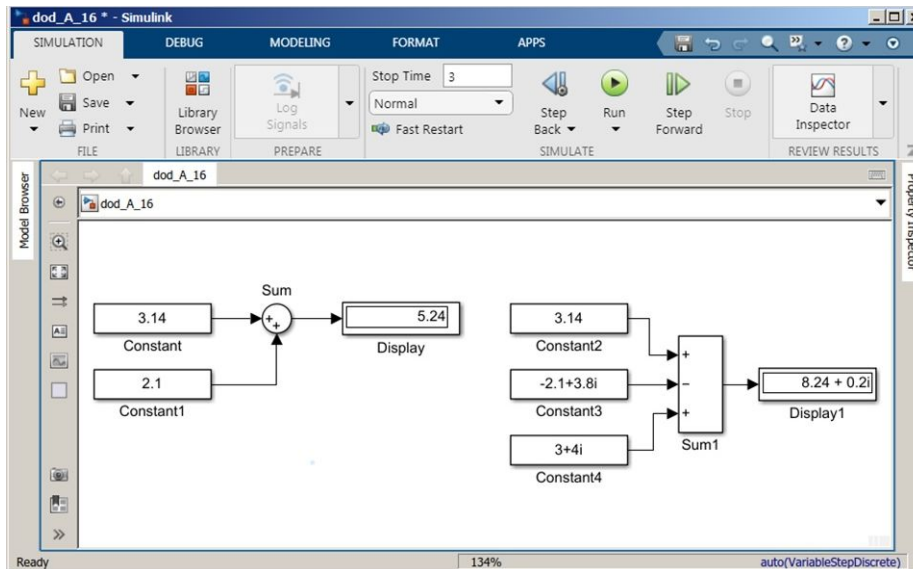


Рисунок А.17 – Приклади використання блоку *Sum*

9.6.3. Блок множення *Product*

Блок множення *Product* призначений для операцій множення чи розподілу скалярних, векторних чи матричних сигналів.

Параметр: *Number of inputs* – Кількість входів. Може задаватись як число або як список символів. У списку знаків можна використовувати знаки * (помножити) та / (поділити). Типи вхідних сигналів блоку мають співпадати (рис. А.18).

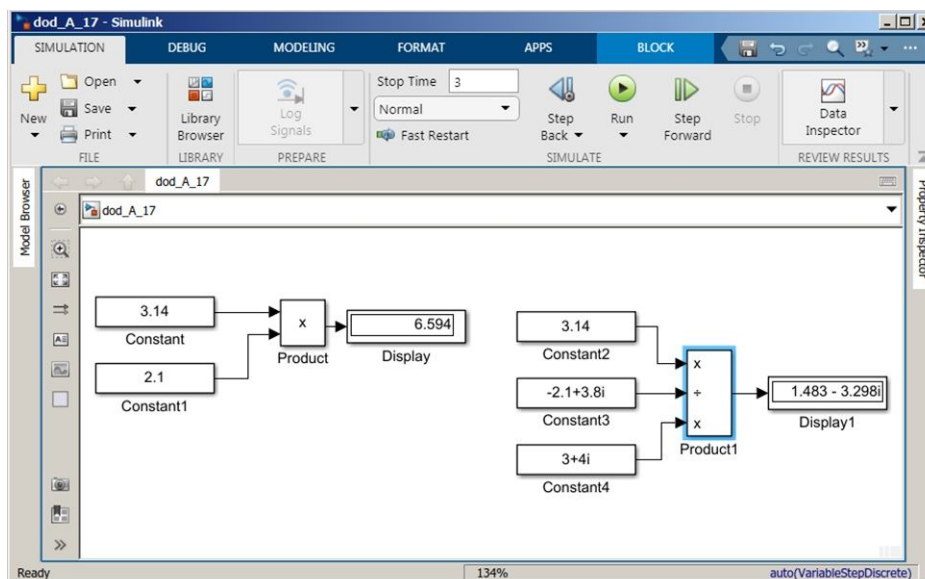


Рисунок А.18 – Приклади використання блоку *Product*

9.6.4. Підсилювачі *Gain*

Призначення – збільшення вхідного сигналу на постійний коефіцієнт (рис. А.19).

Параметри: *Gain* – коефіцієнт підсилення.

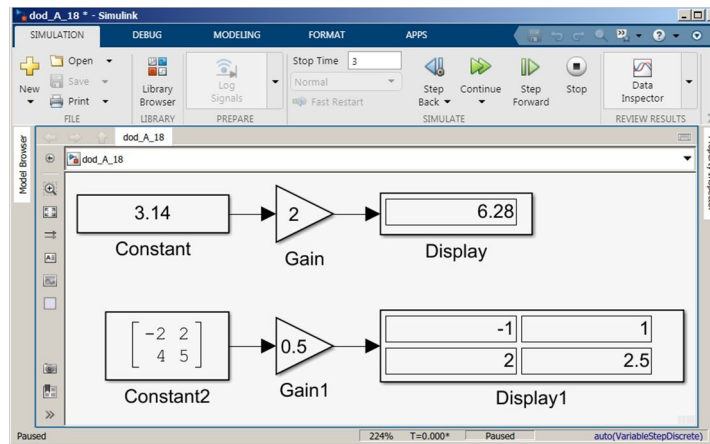


Рисунок А.19 – Приклад використання блоку *Gain*.

9.6.5. Блок обчислення математичних функцій *Math Function*

Призначення – обчислення математичної функції (рис. А.20).

Параметри - *Function* – Вигляд функції, що обчислюється (вибирається зі списку):

exp – експонентна функція;

log – функція натурального логарифму;

10^u – обчислення степеня 10;

\log_{10} – функції логарифму з основою 10;

*magnitude*² – обчислення квадрата модуля вхідного сигналу (комплексний модуль);

square – обчислення квадрата вхідного сигналу;

pow – піднесення в степінь;

conj – обчислення комплексно-спряженого числа;

reciprocal – ділення 1 на вхідний сигнал;

hypot – обчислення кореня квадратного із суми квадратів вхідних сигналів (гіпотенузи прямокутного трикутника за значеннями катетів);

rem – залишок від ділення;

mod – модуль від ділення;

transpose – транспонування матриці;

hermitian – складносполучне транспонування матриці.

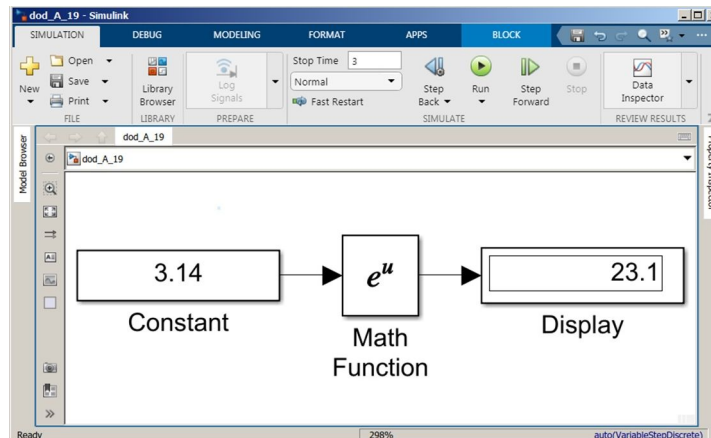


Рисунок А.20 – Приклади використання блоку *Math Function*

9.6.6. Блок обчислення тригонометричних функцій *Trigonometric Function*

Призначення – обчислення тригонометричної функції (рис. А.21).

Параметри: *Function* – Вигляд функції (*sin*, *cos*, *tan*, *asin*, *acos*, *atan*, *atan2*, *sinh*, *cos*, *tanh*, *asinh*, *acosh*, *atanh*, *sincos*, *cos + jsin*).

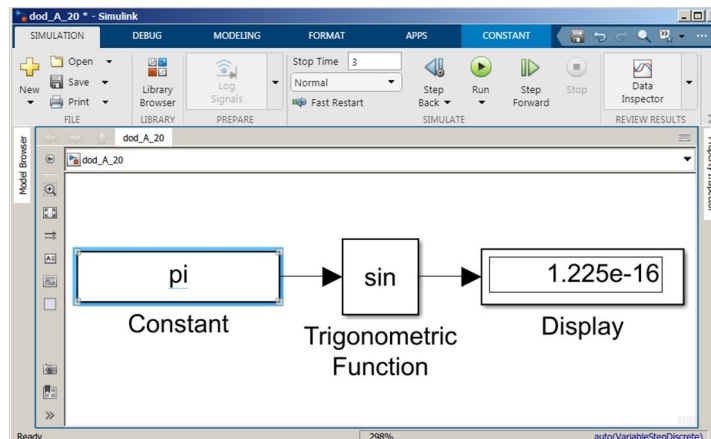


Рисунок А.21 – Приклади використання блоку *Trigonometric Function*

10. Simscape / Specialized Power Systems

10. 1. Бібліотека блоків *Specialized Power Systems*

Бібліотека *Specialized Power Systems* має вісім основних розділів:

Control – фільтри, перетворювачі сигналів;

Electrical Machines – електричні машини;

Passives – пасивні елементи;

Power Electronics – пристрої силової електроніки;

Power Grid Elements – елементи силових електричних мереж;

Sensor and Measurements – вимірювальні та контрольні пристрої;

Sources – джерела електричної енергії;

Utilities – інструменти для поєднання *Specialized Power Systems*- блоків з електричними схемами *Simscape*.

Використовуючи блоки з цих розділів, користувач може за короткий час створити повноцінну модель досить складної електротехнічної системи. Слід пам'ятати, що *Simulink*-блоки та *Specialized Power Systems* блоки не можуть бути безпосередньо з'єднані один з одним. Сигнал від *S*-блоку можна передати до *SPS*-блоку через керовані джерела струму чи напруги, а навпаки – за допомогою вимірювачів струму чи напруги.

10.2 Sources – джерела електричної енергії

10.2.1. DC Voltage Source - ідеальне джерело постійної напруги

Призначення – вироблення постійної напруги (рис. А.22)..

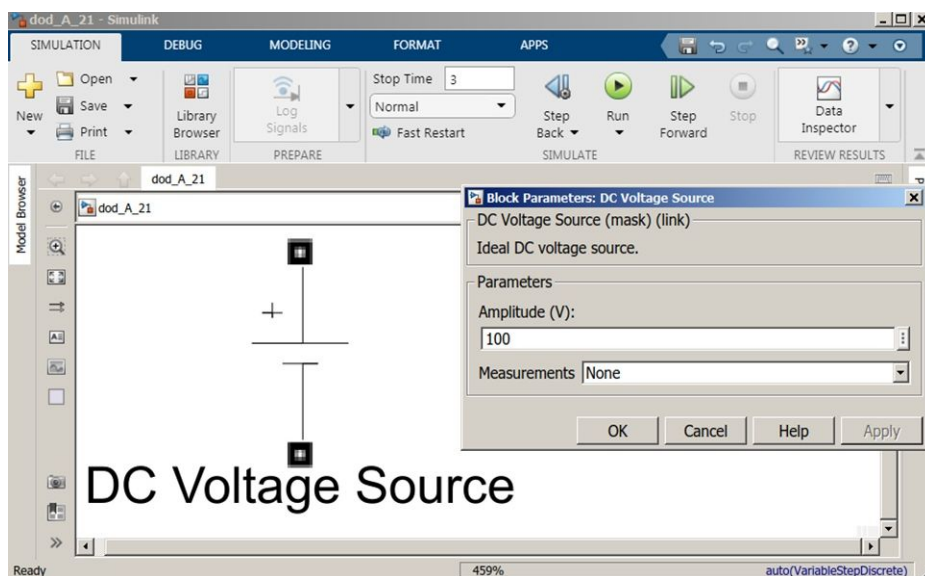


Рисунок А.22 – Піктограма та вікно завдання параметрів блоку *DC Voltage Source*

Параметри блоку:

Amplitude (V) [Амплітуда (В)] – величина вихідної напруги джерела;

Measurements [Вимірювані змінні] – вибір змінних, що передаються в

блок *Multimeter* (*None* – немає змінних для відображення, *Voltage* – вихідна напруга джерела).

10.2.2. *AC Voltage Source* – ідеальне джерело змінної напруги

Призначення – виробляє синусоїдну напругу з постійною амплітудою (рис. А.23).

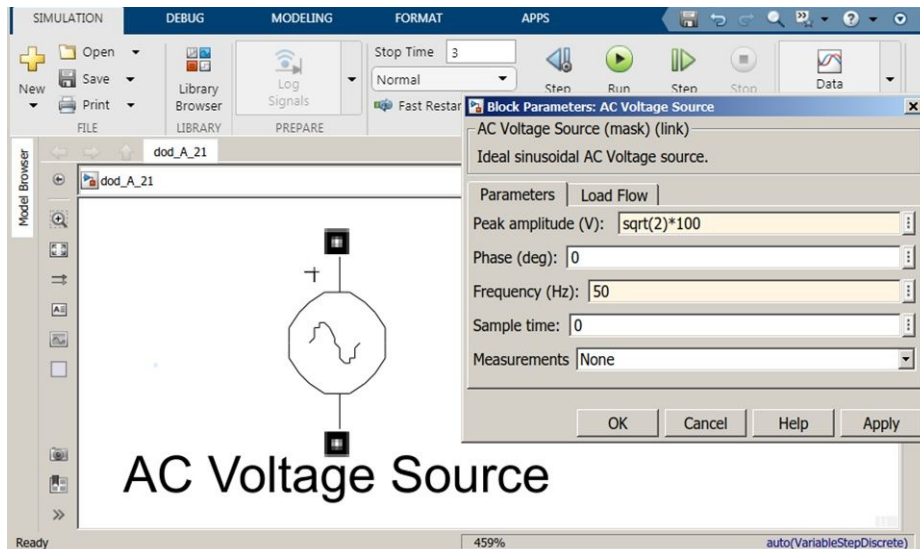


Рисунок А.23 – Піктограма та вікно завдання параметрів *AC Voltage Source*

Параметри блоку:

Peak Amplitude (V) [Амплітуда] – амплітуда вихідної напруги джерела;

Phase (deg) [Фаза (град)] – початкова фаза;

Frequency (Hz) [Частота (Гц)] – частота джерела;

Sample time – період вибірки в секундах (с). За замовчуванням 0, що відповідає неперервному джерелу;

Measurements [Вимірювані змінні] – вибір змінних, що передаються в блок *Multimeter* (*None* – немає змінних для відображення, *Voltage* – вихідна напруга джерела).

10.2.3. *Three-Phase Source* – Трифазне джерело напруги

Призначення: виробляє трифазну систему напруги.

Параметри блоку (рис А.24):

Configuration – з'єднання фаз джерела: Y – зірка, Yn – зірка з нульовим дротом, Yg – зірка із заземленою нейтраллю;

Phase-to-phase voltage (V_{rms}) – діюче значення лінійної напруги (В);

Phase angle of phase A (deg) – початкова фаза напруги у фазі А (град);

Frequency (Hz) – частота джерела (Гц);

Source Resistance (Ohms) – власний активний опір джерела (Ом);

Source inductance (H) – власна індуктивність джерела (Гн);

Base voltage ($V_{rms\ ph-ph}$) – середньоквадратична міжфазна напруга у вольтах. Цей параметр використовується для визначення рівня трифазного короткого замикання. Базовою напругою зазвичай є номінальна напруга джерела.

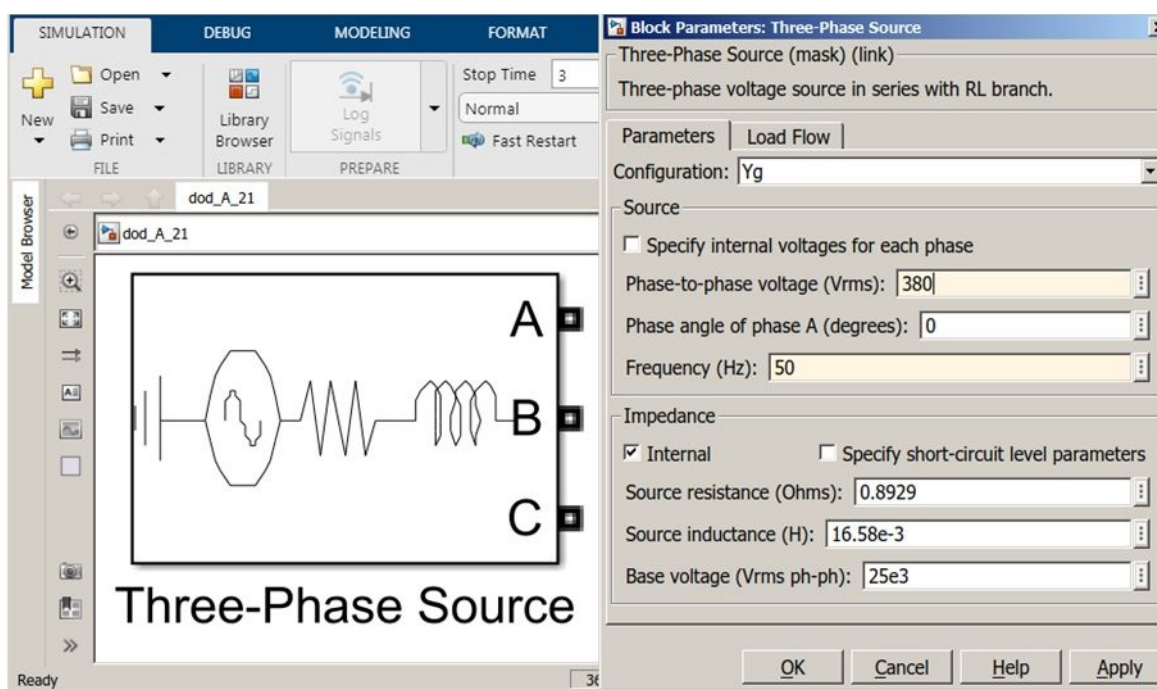


Рисунок А.24 – Піктограма та вікно завдання параметрів блоку 3-Phase Source

10.3. Ground – Заземлення

Ground – забезпечує з'єднання із землею (рис. А.25).

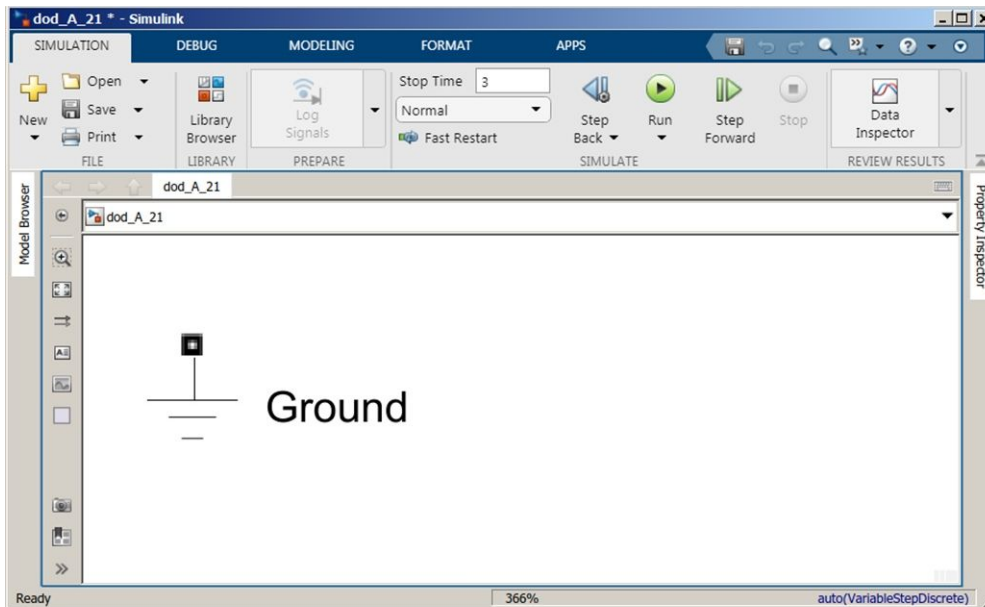


Рисунок А.25 – Заземлювач *Ground*

10.4 Measurements – вимірювальні та контрольні пристрої *Current Measurement* (вимірювач струму).

Призначення-вимірювання миттєвого значення струму, що протікає колом від входу + до виходу – (рис. А.26,а). Вихідний сигнал блоку з виходу і – сигнал *Simulink*.

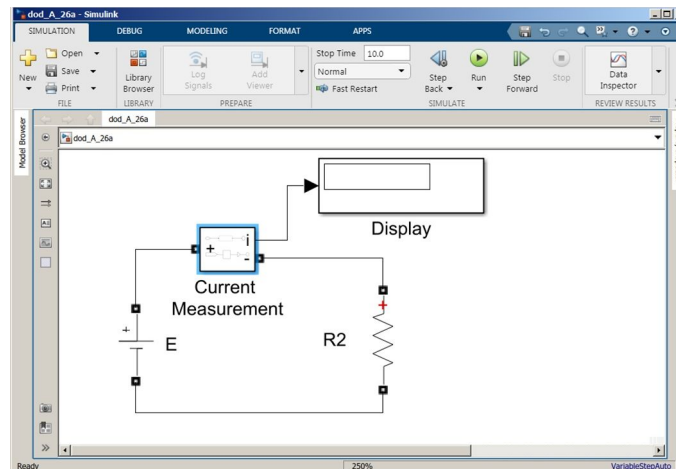


Рисунок А.26,а – Вмикання *Current Measurement* (вимірювач струму)
Voltage Measurement (вимірювач напруги).

Призначення – вимірювання миттєвого значення напруги між двома вузлами схеми (рис. А.26,б). Вихідний сигнал *v* – сигнал *Simulink*.

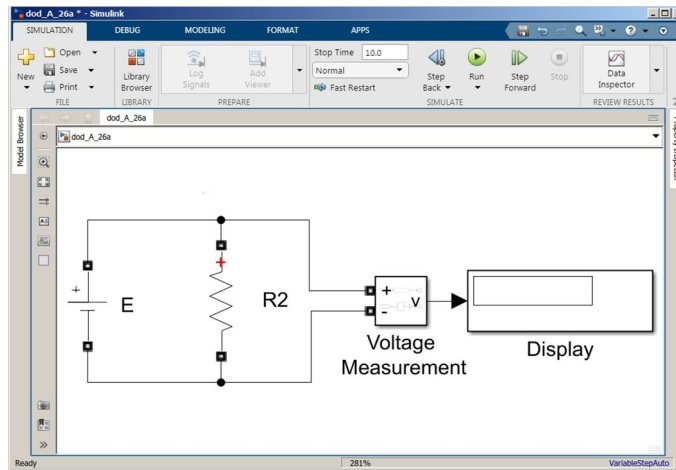


Рисунок А.26,б – Вмикання *Voltage Measurement* (вимірювач напруги) *Multimeter* (мультиметр).

Призначення – вимірювання струмів та напруг блоків бібліотеки *Specialized Power Systems* (рис. А.26,в).

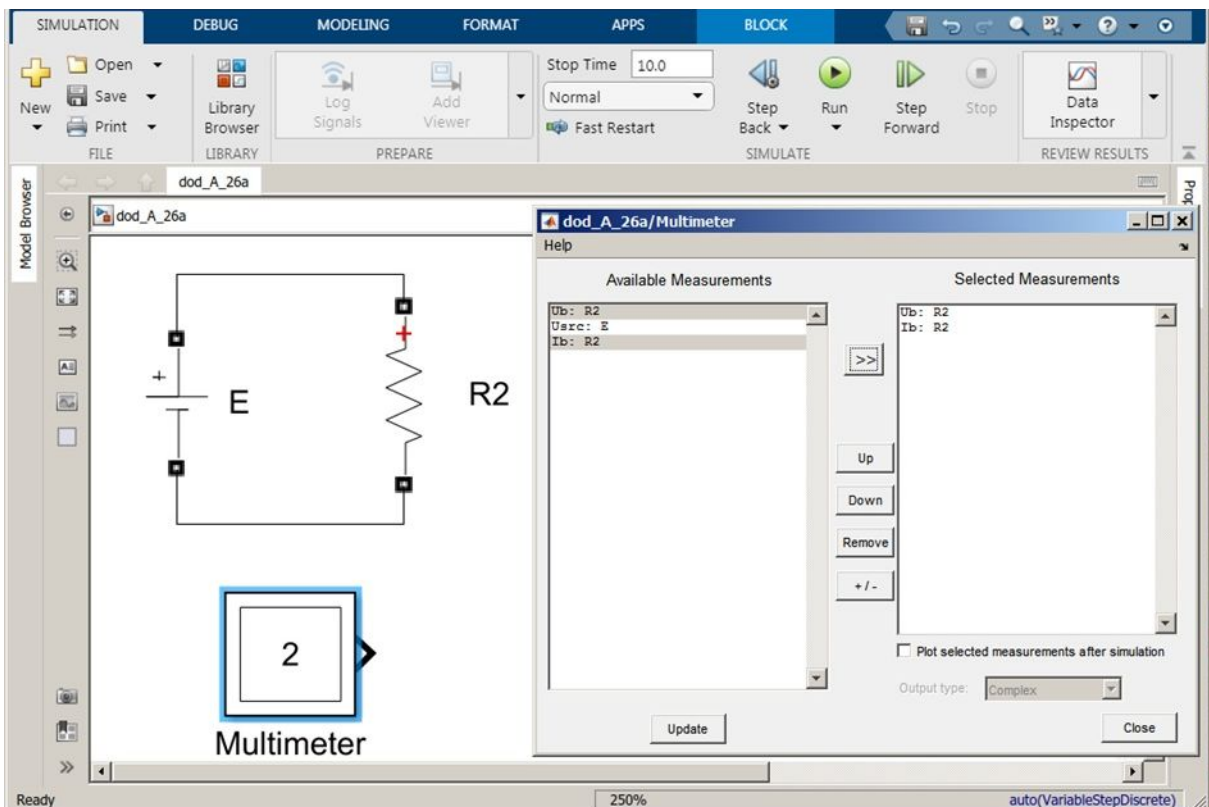


Рисунок А.26, в – *Multimeter* (мультиметр)

Available Measurements (Змінні, доступні для вимірювання). У цій графі відображаються змінні (струми та напруги) блоків схеми для яких у вікні діалогу встановлено параметр *Measurements* (вимірювані змінні);

Selected Measurements (Вибрані змінні). У цій графі вказуються змінні, які передаватимуться на вихід блоку *Multimeter*.

Для керування списком змінних можна використовувати такі клавіші:

>> – додати виділену змінну до списку вимірюваних;

Up – пересунути виділену змінну до списку вимірюваних;

Down – пересунути виділену змінну до списку вимірюваних;

Remove – видалити виділену змінну зі списку вимірюваних;

+/- – змінити символ виділеної змінної.

Output signal (Вихідний сигнал) – сигнал *Simulink*.

10.5. *Passives* – пасивні електротехнічні елементи

10.5.1. *Series RLC Branch* (послідовне RLC-коло).

Призначення: визначає послідовне включення резистора, індуктивності та ємності (рис. А.27).

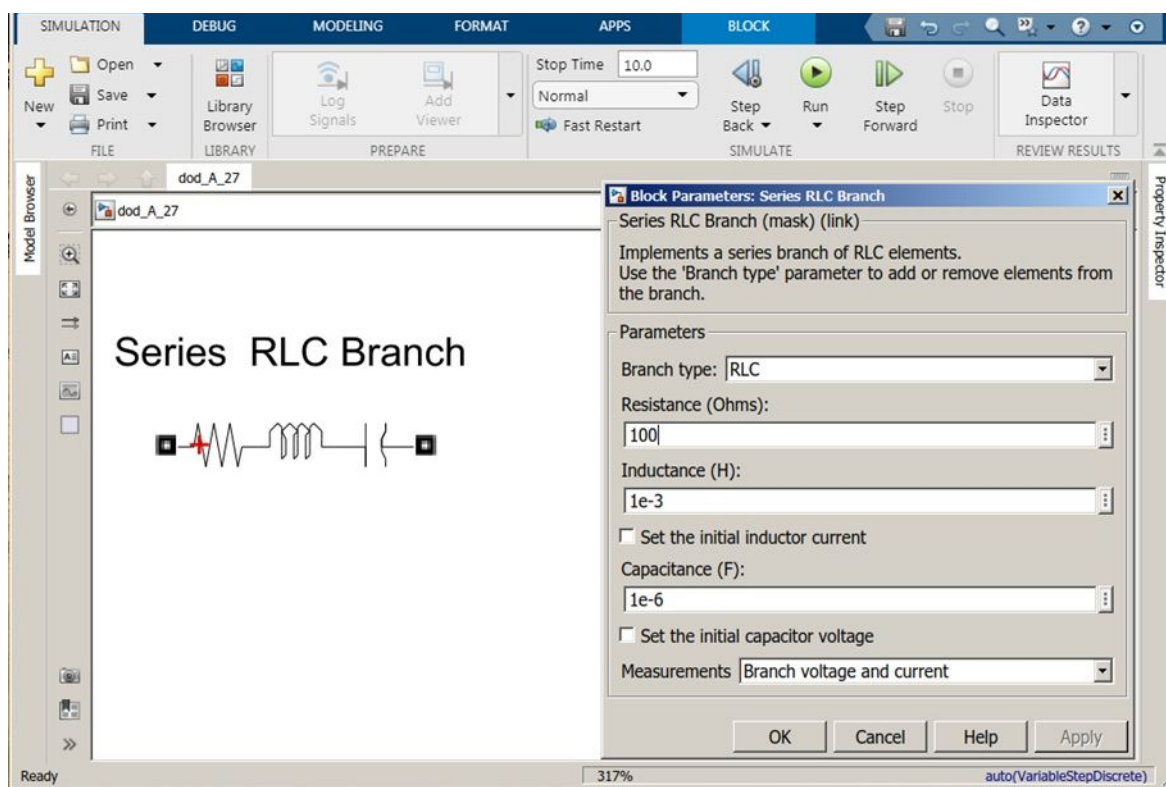


Рисунок А.27 – Піктограма та вікно завдання параметрів блоку *Series RLC Branch*

Параметри блоку:

Branch type (тип вітки) – елементи, які входять до вітки. Буква *R* визначає резистор, *L* – котушку індуктивності, а *C* – конденсатор. Встановлений параметра *Open circuit* визначити розімкнуте коло ($R=0$, $L=0$, $C=\infty$). Значок блоку відображає лише вибрані елементи;

Resistance (Ohms) [Опір (Ом)] – величина активного опору;

Inductance (H) [Індуктивність (Гн)] – величина індуктивності;

Set the initial inductor current (Установити початковий струм індуктивності) – параметр для відмічення початкового струму індуктивності. Якщо очистити цей параметр, програмне забезпечення розраховує початковий струм індуктивності, щоб почати моделювання в усталеному стані;

Capacitance (F) [Ємність (Ф)] – величина ємності;

Set the initial capacitor voltage (Установити початкову напругу конденсатора) – параметр для відмічення початкової напруги конденсатора. Якщо очистити цей параметр, програмне забезпечення розраховує початкову напругу конденсатора, щоб почати моделювання в усталеному стані;

Measurements [Вимірювані змінні] – параметр дозволяє вибрати, що передаються в блок Multimeter, змінні, які є доступними. Значення параметра вибираються зі списку:

None – немає змінних для відображення;

Branch voltage – напруга на затискачах кола;

Branch Current – струм кола;

Branch voltage and Current – напруга та струм кола.

10.5.2. **Parallel RLC Branch** (паралельне RLC-коло)

Призначення: визначає паралельне включення резистора, індуктивності та ємності (рис. А.28).

Параметри блоку:

Branch type (тип вітки) – елементи, які входять до вітки. Буква **R** визначає резистор, **L** – котушку індуктивності, а **C** – конденсатор. Встановлений параметр **Open circuit** визначити розімкнуте коло ($R=0$, $L=0$, $C=\text{inf}$). Значок блоку відображає лише вибрані елементи;

Resistance (Ohms) [Опір (Ом)] – величина активного опору;

Inductance (H) [Індуктивність (Гн)] – величина індуктивності;

Set the initial inductor current (Установити початковий струм індуктивності) – параметр для відмічення початкового струму індуктивності.

Якщо очистити цей параметр, програмне забезпечення розраховує початковий струм індуктивності, щоб почати моделювання в усталеному стані;

Capacitance (F) [Ємність (Ф)] – величина ємності;

Set the initial capacitor voltage (Установити початкову напругу конденсатора) – параметр для відсічення початкової напруги конденсатора. Якщо очистити цей параметр, програмне забезпечення розраховує початкову напругу конденсатора, щоб почати моделювання в усталеному стані;

Measurements [Вимірювані змінні] – параметр дозволяє вибрати, що передаються в блок Multimeter, змінні, які є доступними. Значення параметра вибираються зі списку:

None – немає змінних для відображення;

Branch voltage – напруга на затискачах кола;

Branch Current – струм кола;

Branch voltage and Current – напруга та струм кола.

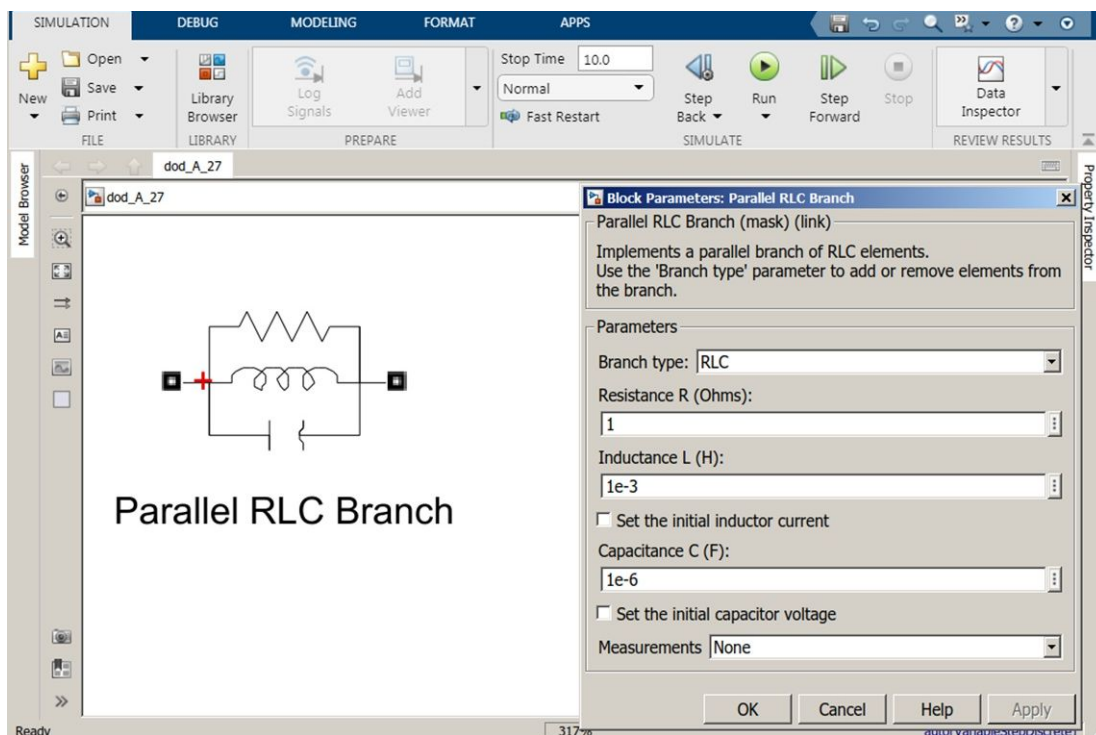


Рисунок А..28 – Піктограма та вікно завдання параметрів *Parallel RLC Branch*

Рекомендована література

1. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Львів : Львівська політехніка, 2018. 416 с.

2. Хілов В.С. Теоретичні основи електротехніки: підручник. Д.: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, 2021 р. 433 с.

3. Попова І.О., Курашкін С.Ф., Вовк О.Ю., Попрядухін В.С. Теоретичні основи електротехніки: навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти. Мелітополь: Видавничо–поліграфічний центр «Люкс», 2020. 221 с.

4. Теоретичні основи електротехніки: Частина 1. Електричні кола постійного та змінного струму. Чотиріполюсники [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю. В. Перетятко, А. А. Щерба. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 115 с.

5. Теоретичні основи електротехніки: Нелінійні системи. Перехідні процеси. [Електронний ресурс]: практикум. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю. В. Перетятко. А. А. Щерба. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 140 с.

6. Теоретичні основи електротехніки. Нелінійні електричні і магнітні кола: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л.Ю. Спінул, М.П.Бурик. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 59 с.

7. Воробкевич А.Ю., Маляр В.С., Совин Р.Я., Соколовський М.О., Стахів П.Г., Шегедин О.І. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки : Навч. посібник для студентів електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Львів: “Новий Світ–2000”, 2020. 224 с.

8. Карпов Ю.О., Кацив С.Ш., Кухарчук В.В. Теоретичні основи

електротехніки. Комп'ютерні розрахунки та моделювання лінійних електричних кіл. Одеса : Гельветика, 2019. 210 с.

9. Каців С.Ш., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В. Теоретичні основи електротехніки. Комп'ютерні розрахунки та моделювання нелінійних електричних кіл та кіл з розподіленими параметрами. Одеса : Гельветика, 2019. 148 с.

10. Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В. Теоретичні основи електротехніки. Задачі та приклади розрахунку лінійних електричних кіл. Одеса : Гельветика, 2019. 346 с.

E50

Електротехніка в електроенергетиці [Текст] : методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності 63 Електрична інженерія денної та заочної форм навчання / уклад. А.В. Гадай. – Луцьк : ЛНТУ. 2025. 254 с.

Комп'ютерний набір та верстка: А. Гадай

Підп. до друку __.____. 2025р.
Формат 60×84/16. Папір офс. Гарн. Таймс.
Ум. друк.арк. 14,4. Обл.-вид.арк. 14,8.
Наклад 50 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – Відділ іміджу та промоції ЛНТУ