

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

“Моделі та методи оптимізації системи електропостачання”
для студентів спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка (усіх форм навчання),
спеціалізація: Електротехнічні системи електроспоживання

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Моделі та методи оптимізації системи електропостачання” для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (усіх форм навчання), спеціалізація: Електротехнічні системи електроспоживання / Укл.: А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 42 с.

Укладачі:

А. П. Заболотний, доцент, к.т.н.
Д. В. Федоша, доцент, к.т.н.

Рецензент:

В.В.Попов, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск:

О. А. Шрам, зав.кафедрою, доцент,
к.т.н.

Затвердженона засіданні кафедри
електропостачання промислових
підприємств
протокол № 6 від 17.03.2021р.

Рекомендовано до видання на
засіданні НМК
електротехнічного факультету
протокол № 8 від 20.05.2021

ЗМІСТ

Тема 1 – Вступ до теорії моделювання	4
Тема 2 – Аналітичне моделювання	8
Тема 3 – Джерела електричної енергії	17
Тема 4 – Вимірювальні та контрольні пристрої	27
Тема 5 – Моделювання елементів електроенергетичної системи.	38
ЛІТЕРАТУРА	42

ТЕМА 1 – ВСТУП ДО ТЕОРІЇ МОДЕЛЮВАННЯ

Мета роботи: Поняття математичної моделі, як основного апарату системного підходу до електротехнічних проблем. Застосування пакета розширення Simulink, який входить в систему MATLAB.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

У навчальному процесі дослідження реальних електротехнічних пристроїв найчастіше неможливо. Це пояснюється багатьма причинами. Відсутністю лабораторної та приладової бази, великою вартістю і габаритами досліджуваного електрообладнання, а іноді і небезпекою роботи з ним.

При наукових дослідженнях, перш ніж конструювати якусь експериментальну установку, необхідно спочатку розрахувати її параметри, проаналізувати процеси, що протікають всередині неї, перевірити роботу окремих елементів схеми як в номінальних так і в аварійних режимах роботи і т.д.

Всі ці завдання можна вирішити за допомогою імітаційного моделювання, що є різновидом математичного моделювання.

Математичне моделювання - це методологія наукової та практичної діяльності, заснована на побудові та використанні математичних моделей об'єктів і процесів [1, 2].

Зазвичай, під математичною моделлю розуміють сукупність математичних об'єктів і відносин, що відображають предмет дослідження. Функціонування моделі - це процес, що розгортається в часі [3, 4].

Проте використання моделі у вигляді розрізаних формул або графічних залежностей не раціонально. Для отримання повноцінної моделі, необхідно об'єднати отримані співвідношення в якусь закінчену структуру [5].

До недавнього часу всі лабораторні дослідження і роботи, перевірка правильності виконання електротехнічних розрахунків могли бути виконані тільки при експериментальному дослідженні реальних схем і пристроїв. Даний спосіб має ряд істотних недоліків:

- для експериментального дослідження схеми необхідно розташовувати відповідним вимірювальним обладнанням і

натурними, що працюють зразками електричних машин і апаратів управління;

- похибки реальних вимірювальних приладів можуть бути досить великі;
- для дослідження схем потрібно збирати їх макети з реальних елементів, що призводить до істотних матеріальних і тимчасових витратах.

Моделювання електричних схем на комп'ютерах позбавлене цих недоліків:

- не потрібні вимірювальні прилади та макети досліджуваних схем;
- похибка дослідження схем шляхом моделювання на комп'ютері можна зробити досить малою;
- час, що витрачається на комп'ютерне моделювання, незрівнянно менше часу, що витрачається на виготовлення макета та виконання його експериментального дослідження.

До недоліків моделювання реальних електротехнічних машин і схем на комп'ютерах можна віднести:

- труднощі обліку в моделях деяких реально існуючих паразитних параметрів елементів схем: внутрішні опору і провідність джерел; власні індуктивності і ємності реальних резисторів; втрати в котушках індуктивності і обмотках електричних машин; нелінійності викликані наявністю феромагнітних осердь;
- іноді важко оцінити точність моделювання.

Тим не менш, можна сказати, що моделювання електричних і електронних схем на комп'ютерах – це суттєвий прогрес в техніці експериментальних досліджень. Таким чином при підготовці сучасних інженерів в області електротехніки особливого значення набувають навички роботи з комп'ютером та знання ними новітніх засобів експериментальних досліджень.

В даний час існує досить багато комп'ютерних програм для моделювання електричних схем. Для вирішення різних завдань слід використовувати різні пакети програм.

У даних методичних вказівках розглянуті питання моделювання систем електропостачання для яких найбільш застосуємо пакет розширення Simulink, що входить в систему MATLAB і призначений для імітаційного моделювання.

До складу моделей можуть включатися джерела сигналів

різного виду, віртуальні реєструють прилади, графічні засоби анімації. Запуск імітації забезпечує математичне моделювання побудованої моделі з наочним візуальним представленням результатів. Пакет заснований на побудові блокових схем шляхом перенесення блоків з бібліотеки компонентів, у вікно редагування створюваної користувачем моделі. При цьому можливі різні варіанти моделювання: в тимчасовій області, в частотній області, з подвійним управлінням, і т.д.

Крім того, Simulink автоматизує найбільш трудомісткий етап моделювання - він складає і вирішує складні системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують задану функціональну схему (S-модель), забезпечуючи зручний і наочний візуальний контроль за поведінкою створеного користувачем віртуального пристрою.

Більш того, Simulink практично миттєво змінює математичний опис моделі у міру введення в неї нових блоків, навіть в тому випадку, коли цей процес супроводжується зміною порядку системи рівнянь і веде до істотного якісної зміни поведінки системи.

Засоби візуалізації результатів моделювання в пакеті Simulink досить наочні.

Особлива цінність Simulink полягає у великій, відкритій для вивчення і модифікації бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела сигналів з практично будь-якими тимчасовими залежностями, масштабованими, лінійні і нелінійні.

Таким чином, додаток Simulink є свого роду «віртуальної лабораторією» дозволяє збирати і досліджувати роботу багатьох видів електричних ланцюгів і пристроїв.

Отримана «віртуальна схема» дозволяє проводити всі етапи дослідження властиві експериментальному або досвідченому зразку, а саме [1, 2, 3].

- проводити планування модельних експериментів;
- реалізувати план експерименту;
- проводити аналіз та інтерпретація результатів моделювання.
- крім того, перевагами такого моделювання є:
- автоматичний облік всіх зв'язків і співвідношень між елементами схеми;
- отримання результатів моделювання у формі аналогічної результатами при випробуваннях реальних схем (у вигляді осцилограм, тимчасових процесів і т.д.), що спрощує аналіз і прив'язку

результатів моделювання до реальних електротехнічних пристроїв;

- можливість дослідження роботи окремих елементів електричної машини або схеми, які недоступні в реальному конструкції, наприклад, можливо відслідковувати величину електромагнітного моменту машини і т.д.;

- можливість дослідження поведінки схеми в умовах важкодоступних на експериментальних стендах, наприклад, при підвищених температурах або в аварійних режимах;

- можливість досліджувати електротехнічні пристрої та схеми в динаміці, наприклад, досліджуючи реакцію електродвигуна на швидкій зміні навантаження, що на реальних установках виконати досить складно;

- можливість дослідження роботи схем в умовах дії різних спотворюють факторів, перешкод;

- можливість оптимізації елементів схем з використанням вбудованих в програму matlab засобів.

Додаткові відомості про роботу в системі MATLAB можна отримати в монографії «Застосування системи MATLAB при вивченні курсу електротехніки» [4].

ТЕМА 2 – АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Мета роботи. Навчитися реалізовувати аналітичні моделі в пакеті MATLAB.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розглянемо одномасову коливальну систему:

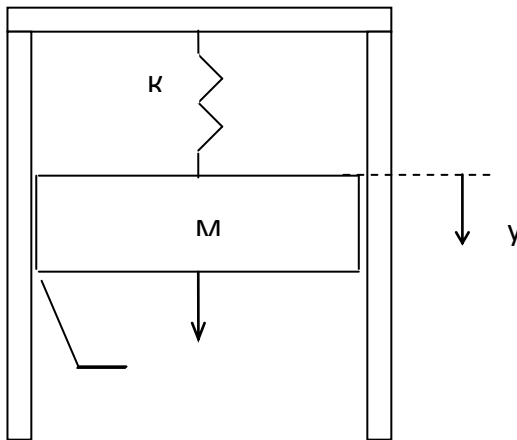


Рисунок 2.1 – Одномасова коливальна система.

Рівняння, що описує цю систему:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + \gamma \frac{dy}{dt} + Ky = F \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Тут сила тертя об стінки вважається в'язким, а значить сила тертя пропорційна швидкості вантажу.

Для здійснення аналізу такої системи спочатку потрібно знайти передавальну функцію при одиничному входньому імпульсі, для чого зробимо перетворення Лапласа цього диференціального рівняння.

$$M \cdot s^2 \cdot y + \gamma \cdot s \cdot y + K \cdot y = F \quad (2.2)$$

Для знаходження передаточної функції необхідно знайти

відношення вихідної величини до вхідної.

$$W(s) = \frac{r}{y} \quad (2.3)$$

Тоді з виразу (2) з урахуванням того, що вхідний вплив одиничний отримаємо:

$$W(s) = \frac{1}{M \cdot s^2 + \gamma \cdot s + \beta} \quad (2.4)$$

Для аналізу коливальної системи можна побудувати графіки вагової функції і перехідної характеристики. Першу можна знайти зворотним перетворенням Лапласа передаточної функції. Перехідна характеристика шукається також зворотним перетворенням Лапласа, але від величини $W(s) / s$.

Слід також зазначити, що поведінка одномасової коливальної системи можна досліджувати за допомогою її електричної моделі.

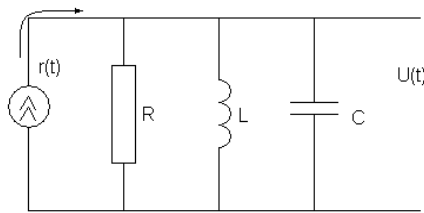


Рисунок 2.2 – Електрична модель одномасової коливальної системи.

За допомогою законів Кірхгофа опишемо RLC коло. Визначимо струми в ємності, опорі і індуктивності:

$$I_1 = \frac{r}{R} - \text{струм в опорі};$$

$$I_2 = C \frac{dU}{dt} - \text{струм в ємності};$$

$$I_3 = \frac{1}{L} \int_0^t U(\tau) d\tau - \text{струм в індуктивності}.$$

$$\text{Сума струмів } I_1 + I_2 + I_3 = r(t).$$

В інтегрально-диференційній формі рівняння прийме вигляд:

$$\frac{U}{R} + \frac{dU}{dt} + \frac{1}{L} \int_0^t U(\tau) d\tau = i(t) \quad (2.5)$$

Відзначимо, що якщо диференціальне рівняння для одномасової системи переписати щодо швидкості $V = \frac{dy}{dt}$, то можливо отримати таку саму форму інтегрально-диференційного рівняння.

Зробимо перетворення Лапласа:

$$\frac{U}{R} + \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s} U + \frac{1}{L} U = i(s) \quad (2.6)$$

Запишемо передатну функцію, враховуючи, що вхідний вплив $i(t)$ одиничний:

$$W(s) = \frac{s}{C \cdot s^2 + \frac{1}{R} \cdot s + \frac{1}{L}} \quad (2.7)$$

Для знаходження імпульсної перехідної функції прийемо, що $C = 0.5$ Ф, $R = 10$ Ом, $L = 10$ Гн. і проведемо зворотне перетворення Лапласа передаточної функції, а також побудуємо її графік.

Для здійснення операції зворотного перетворення Лапласа використовується команда:

```
>> ilaplace (W)
а для побудови графіка – команда:
>> ezplot (ans, 0,20).
```

Тут ans - результат зворотного перетворення Лапласа, а числа 0, 20 задають часовий інтервал, на якому повинен бути побудований графік.

Вводимо команди:

```
>> ilaplace (s / (s * s * 0.5 + s * (1/10) +
(1/10)))
ans =
-2/19 * Exp (-1/10 * t) * 19 ^ (1/2) * sin
(1/10 * 19 ^ (1/2) * t) + 2 * exp (-1/10 * t ) *
cos (1/10 * 19 ^ (1/2) * t)
>> Ezplot (ans, 0,10)
```

і отримуюємо графік, як на рис. 2.3.

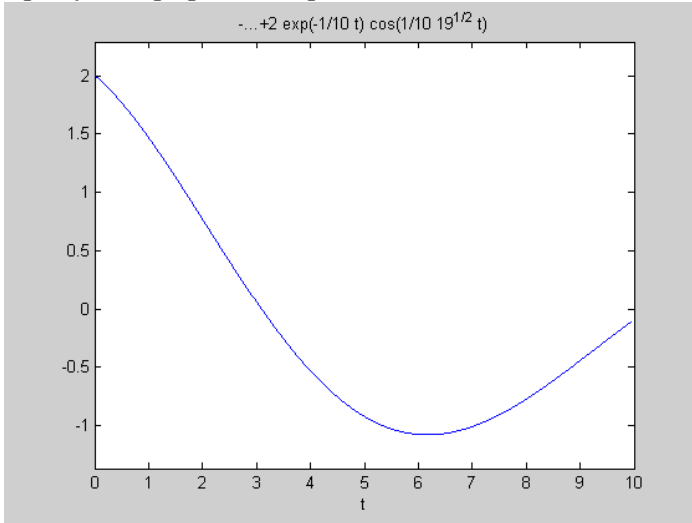


Рисунок 2.3 – Імпульсна перехідна функція коливальної системи

В залежності від величини R графік буде мати різний вигляд. Для наочної демонстрації цього можна побудувати тривимірний графік, що відображає залежність характеру перехідного процесу від величини R :

```
>> syms s R
>> ilaplace(s/(s*s*0.5+s/R+1/10))
ans =
2*exp(-1/R*t)*R^2/(R^2-
5)*cos(1/5*5^(1/2)*((R^2-5)/R^2)^(1/2)*t)-10*exp(-
1/R*t)/(R^2-5)*cos(1/5*5^(1/2)*((R^2-
5)/R^2)^(1/2)*t)-2*R*exp(-1/R*t)/(R^2-
5)*5^(1/2)*((R^2-
5)/R^2)^(1/2)*sin(1/5*5^(1/2)*((R^2-
5)/R^2)^(1/2)*t)
>> ezsurf(ans,'t','R',[0 40])
```

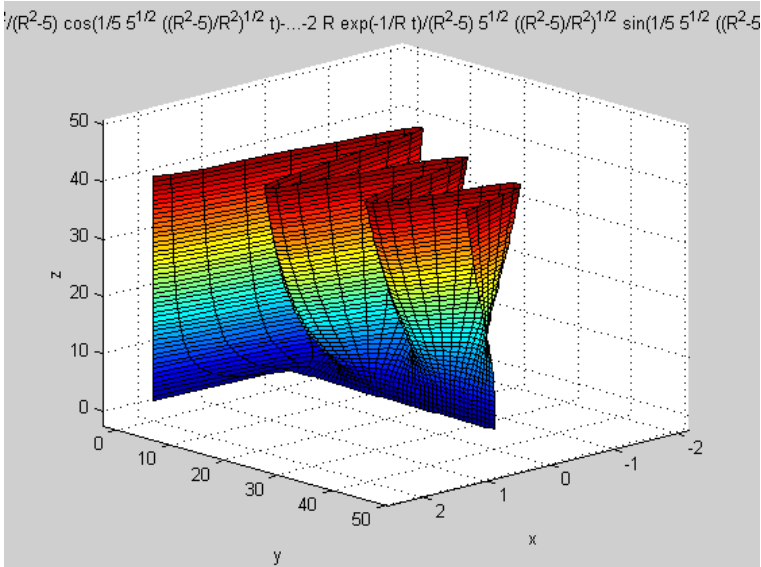


Рисунок 2.4 – Імпульсна перехідна функція коливальної системи.

Для знаходження перехідною характеристики процесу необхідно знайти зворотне перетворення Лапласа від W/s .

```
>> ilaplace (1/(s*s*0.5+s*(1/10)+(1/10)))
ans =
    20/19*exp(-
1/10*t)*19^(1/2)*sin(1/10*19^(1/2)*t)
>> ezplot(ans,0,40)
```

Слід зазначити, що цього ж результату можливо добитися і іншими способами: рішенням диференціального рівняння чисельним і аналітичним способом, а також використовуючи такий інструмент, як Control System Toolbox.

Вирішимо диференціальне рівняння чисельним методом:

```
>> syms
y;dsolve('0.5*D2y+0.1*Dy+0.1*y=1','y(0)=0','Dy(0)=
0')
ans =
    20/19*exp(-
```

$$1/10*t)*19^{(1/2)}*\sin(1/10*19^{(1/2)}*t)$$

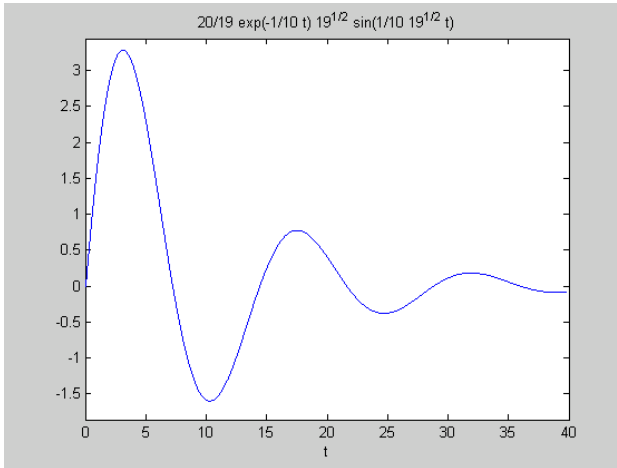


Рисунок 2.5 – Перехідна функція коливальної системи.

Створимо m-файл і вирішимо диференціальне рівняння чисельним методом.

Перший рядок задає ім'я, кількість і порядок проходження вхідних та вихідних аргументів. Тіло функції – програмний код, який реалізує обчислення і привласнює значення вихідним аргументам.

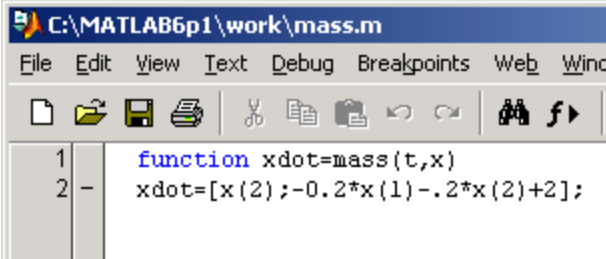


Рисунок 2.6 – Створення m-файлу mass.m.

```
>> t0=0;tf=20;x0=[0;
0];[t,x]=ode23('mass',t0,tf,x0); plot(t,x)
```

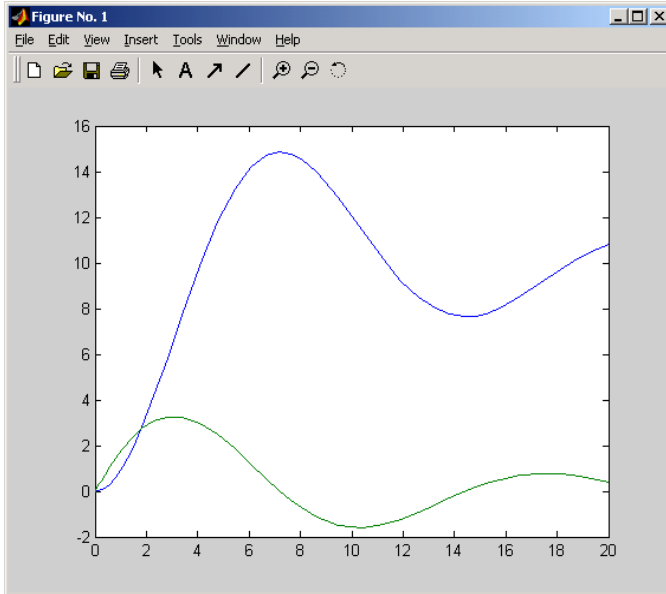


Рисунок 2.7 – Графіки чисельного рішення диференціального рівняння.

Вирішимо ту ж задачу ще одним способом - за допомогою пакета Control System Toolbox. Для формування ЛТІ-об'єкту в Control System Toolbox використовується команда (яка формує передавальну функцію):

```
>> h=tf ([1], [0.5 0.1 0.1]).
```

Отримуємо:

Transfer function:

1

0.5 s^2 + 0.1 s + 0.1.

Для побудови імпульсної перехідної характеристики необхідно подати команду:

```
>> impulse(h,20)
```

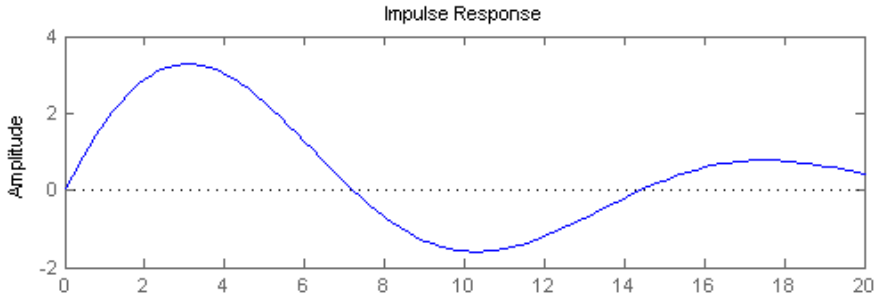


Рисунок 2.8 – Імпульсна перехідна характеристика системи.

Для побудови перехідної характеристики необхідно подати команду:

```
>> step(h, 20)
```

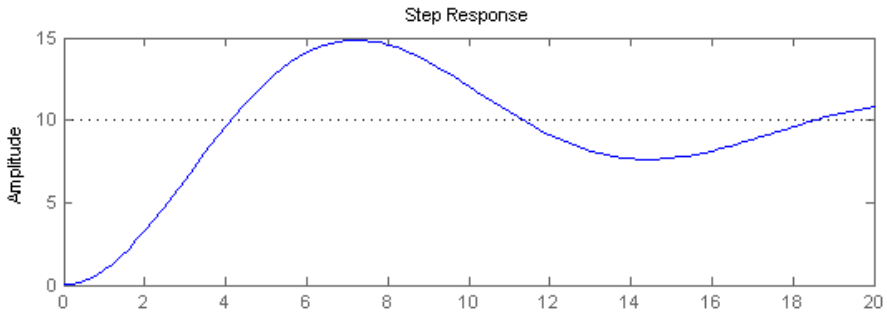


Рисунок 2.9 – Перехідна характеристика системи.

Очевидно, що результати аналогічні тим, що отримані за допомогою інших методів.

Вирішимо це завдання ще одним способом - за допомогою вхідного до складу системи MATLAB пакета моделювання динамічних систем Simulink.

Для вирішення задачі за допомогою Simulink у вікні браузера бібліотек програми Simulink вибираємо розділ Control System Toolbox

Далі у вікно створення нової моделі «перетягуємо» блок LTI-system і задаємо йому необхідні параметри (рис 2.10).

Побудувавши графік перехідного процесу в системі, можна бачити, що він такий же, як і при інших способах вирішення задачі (Рис. 2.11).

Таким чином можна зробити висновок, що використовуючи різні (в нашому випадку чотири) способи вирішення був отриманий один і той же результат, при цьому MATLAB надає користувачеві цілий ряд зручних засобів для обчислень.

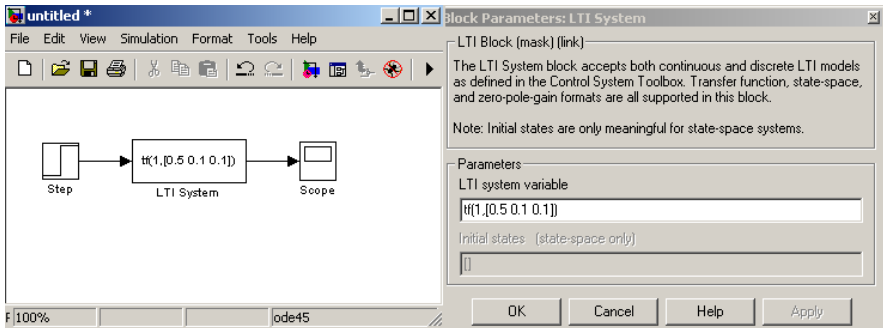


Рисунок 2.10 – Simulink-модель одно масової коливальної механічної системи.

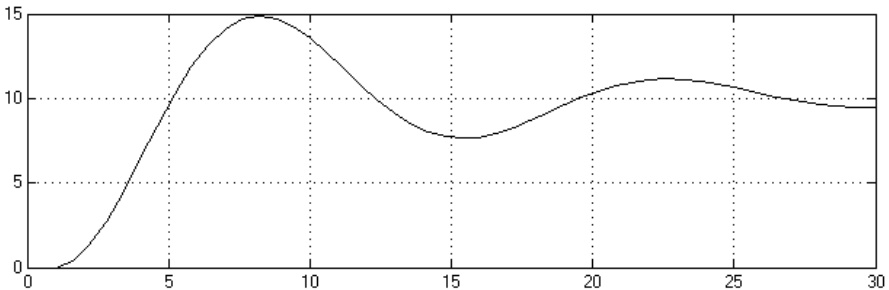


Рисунок 2.11 – Вихідний сигнал моделі одномасової коливальної механічної системи.

Завдання. Проаналізувати одно- і двухмасової системи. Зробити висновки.

Маси M_1 і M_2 , а також жорсткість пружини k взяти з для свого варіанта, а значення коефіцієнта опору обрати самостійно і, змінюючи його, проаналізувати зміну характеру процесу.

Таблиця 2.1 – Параметри коливального контуру

№ вар.	M1	M2	K
1	100	64	8
2	100	81	7
3	81	64	9
4	64	25	8
5	64	16	10
6	100	25	12
7	16	9	7
8	25	9	9
9	25	25	11
10	16	4	8

ТЕМА 3 – ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Ідеальне джерело постійної напруги / DC Voltage Source

Призначення. Виробляє постійну за рівнем напругу. Вхід і вихід блоку DC Voltage Source відповідають позитивному і негативному виводу джерела.

Параметри блоку.

Amplitude (V) [Амплітуда (В)]. Визначає величину вихідної напруги джерела.

Measurements [Вимірювані змінні]. Параметр дозволяє вибрати передаються в блок Multimeter змінні, які потім можна візуалізувати за допомогою блоку Scope. Значення параметра вибираються зі списку:

None - немає змінних для відображення;

Voltage - вихідна напруга джерела.

Блок є ідеальним джерелом напруги, тобто його власний опір дорівнює нулю.

Приклад.

На рис 3.1 показаний приклад включення активно-індуктивного навантаження на постійну напругу. Підключення джерела до навантаження забезпечується блоком Ideal Switch, який замикає електричний ланцюг по сигналу, що виробляється генератором ступеневої сигналу Step. Вимірювання струму в ланцюзі виконується

за допомогою блоку Current Measurement. Отриманий вимірником сигнал відображається за допомогою блоку Scope.

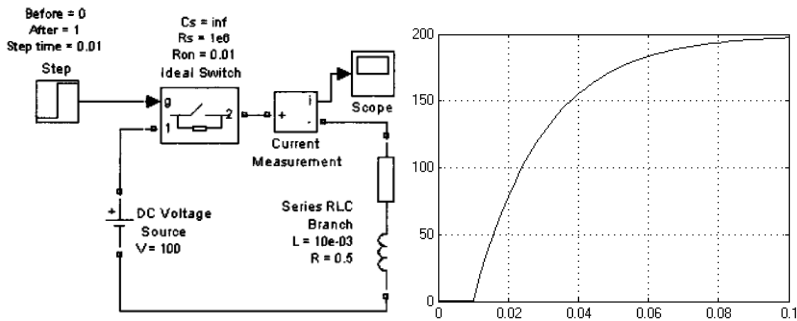


Рисунок 3.1 – Підключення джерела постійної напруги до навантаження.

Ідеальне джерело змінної напруги / AC Voltage Source

Призначення. Виробляє синусоїдальну напругу з постійною амплітудою. Напруга джерела AC Voltage Source описується наступним виразом: $U = A \sin(2\pi ft + \phi)$, де A - амплітуда напруги джерела; f - частота; ϕ - початкова фаза напруги.

Знак «+» на піктограмі блоку показує позитивний напрямок напруги джерела.

Параметри блоку.

Peak Amplitude (V) [Амплітуда (В)]. Амплітуда вихідного напруги джерела.

Phase (deg) [Фаза (град)]. Початкова фаза.

Frequency (Hz) [Частота (Гц)]. Частота джерела.

Sample time [Крок дискретизації]. Параметр задає крок дискретизації за часом вихідної напруги джерела при створенні дискретних моделей.

Measurements [Вимірювані змінні]. Параметр дозволяє вибрати передаються в блок Multimeter змінні, які потім можна побачити за допомогою блоку Scope. Значення параметра вибираються зі списку:

None - немає змінних для відображення;

Voltage - вихідна напруга джерела.

Блок є ідеальним джерелом напруги, тобто його власний опір

дорівнює нулю.

Приклад.

На рис. 3.2 показана схема, що моделює підключення активно-індуктивного навантаження до джерела змінної напруги. Там же наведено графік струму в навантаженні.

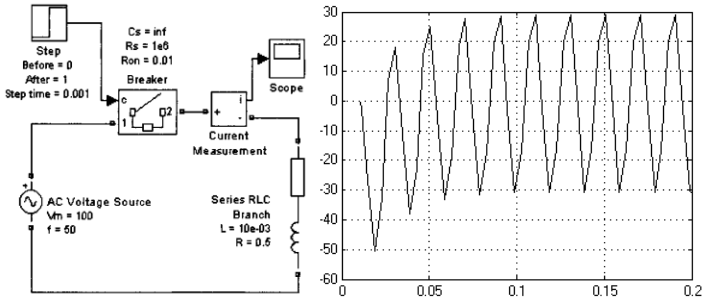


Рисунок 3.2 – Підключення джерела змінної напруги.

Ідеальне джерело змінного струму / AC Current Source

Призначення. Виробляє синусоїдальний струм з постійною амплітудою. Ток джерела AC Current Source описується наступним виразом: $I = A \sin(2\pi f t + \phi)$, де A - амплітуда струму джерела; f - частота; ϕ - початкова фаза струму.

Знак «+» на піктограмі блоку показує позитивне на правління струму джерела.

Параметри блоку.

Peak Amplitude (A) [Амплітуда (A)]. Амплітуда вихідного струму джерела.

Phase (cdeg) [Фаза (град)]. Початкова фаза.

Frequency (Hz) [Частота (Гц)]. Частота джерела.

Sample time [Крок дискретизації]. Параметр задає крок дискретизації за часом вихідного струму джерела при створенні дискретних моделей.

Measurements: [Вимірювані змінні]. Параметр дозволяє вибрати передаються в блок Multimeter змінні, які потім можна побачити за допомогою блоку Scope. Значення параметра вибираються зі списку:

None - немає змінних для відображення;

Current - вихідний струм джерела.

Блок є ідеальним джерелом струму, тобто його власний опір одно нескінченності. Для амплітуди і фази припустимі негативні значення. Нульова частота визначає джерело постійного струму. Завдання негативної частоти неприпустимо.

Приклад.

На рис. 3.3 показана схема, що моделює роботу двох джерел струму на активне навантаження. Джерела мають однакову амплітуду струму (3 А), але різну частоту (50 і 60 Гц). Струм в навантаженні є сумою струмів цих двох джерел.

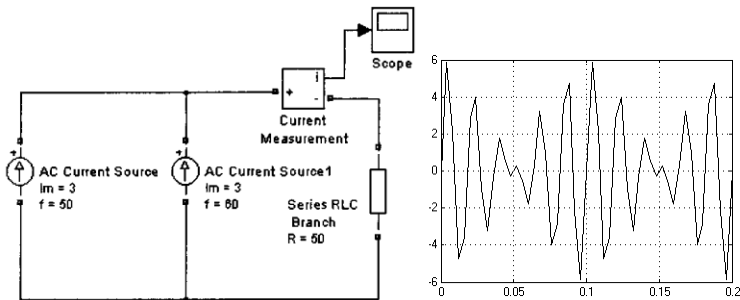


Рисунок 3.3 – Робота джерел струму на загальне навантаження.

Кероване джерело напруги / Controlled Voltage Source

Призначення.

Виробляє напругу відповідно до сигналом управління. Сигнал управління є безрозмірним Simulink-сигналом. Джерело Controlled Voltage Source може бути ініціалізований як джерело постійного або змінного напруги. При моделюванні усталеного режиму початкове значення керуючого сигналу має відповідати початковим значенням параметрів джерела.

Параметри блоку.

Initialize [Ініціалізація]. При установці прапорця виконується ініціалізація джерела з заданими початковими параметрами - амплітудою, фазою і частотою.

Source type [Тип джерела]. Тип джерела вказується, якщо потрібно ініціалізація джерела. Якщо ініціалізація джерела не задана, то параметр недоступний. Значення параметра вибирається зі списку:

АС - джерело змінної напруги;

DC - джерело постійної напруги.

Initial amplitude (V) [Початкова амплітуда (В)]. Початкове значення вихідної напруги джерела. Параметр доступний, якщо задана ініціалізація джерела.

Initial phase (deg) [Початкова фаза (град)]. Початкова фаза. Параметр доступний, якщо джерело ініціалізується як джерело змінної напруги.

Initial frequency (Hz) [Initial частота (Гц)]. Початкова частота джерела. Параметр доступний, якщо джерело ініціалізується як джерело змінної напруги.

Measurements: [Вимірювані змінні]. Параметр дозволяє вибрати передаються в блок Multimeter змінні, які потім можна побачити за допомогою блоку Scope. Значення параметра вибираються зі списку:

None - немає змінних для відображення;

Voltage - вихідна напруга джерела.

Блок є ідеальним джерелом напруги, тобто його власний опір дорівнює нулю.

Приклад.

На рис. 3.4 показана схема з використанням керованого джерела напруги, що формує по сигналу управління прямокутне напругу на навантаженні.

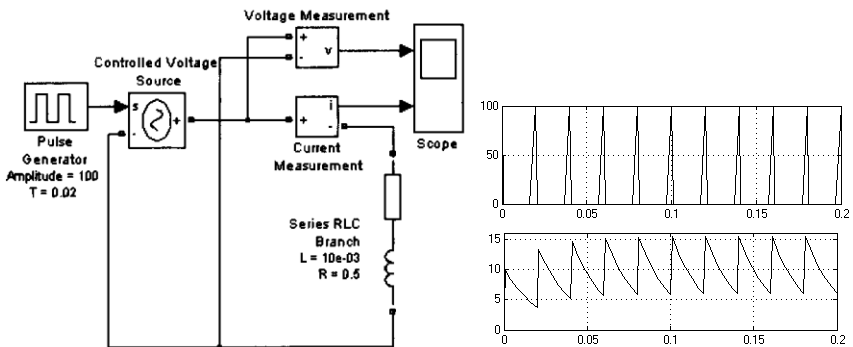


Рисунок. 3.4 – Формування пульсуючого напруги за допомогою керованого джерела напруги.

Кероване джерело струму / Controlled Current Source

Призначення.

Виробляє струм значення якого керується сигналом управління. Сигнал управління є безрозмірним Simulink-сигналом. Джерело Controlled Current Source може бути ініціалізований як джерело постійного або змінного струму. При моделюванні усталеного режиму початкове значення керуючого сигналу має відповідати початковим значенням параметрів джерела.

Параметри блоку.

Initialize [Ініціалізація]. При установці прапорця виконується ініціалізація джерела з заданими початковими параметрами - амплітудою, фазою і частотою.

Source type [Тип джерела]. Тип джерела вказується, якщо потрібно ініціалізація джерела. Якщо ініціалізація джерела не задана, то параметр недоступний. Значення параметра вибирається зі списку:

AC - джерело змінного струму;

DC - джерело постійного струму.

Initial amplitude (A) [Початкова амплітуда (A)]. Початкове значення вихідного струму джерела. Параметр доступний, якщо задана ініціалізація джерела.

Initial phase (deg) [Початкова фаза (град)]. Початкова фаза. Параметр доступний, джерело ініціалізується як джерело змінного струму.

Initial frequency (Hz): [Initial частота (Гц)]. Початкова частота джерела. Параметр доступний, джерело ініціалізується як джерело змінного струму.

Measurements: [Вимірювані змінні]. Параметр дозволяє вибрати передаються в блок Multimeter змінні, які потім можна побачити за допомогою блоку Scope. Значення параметра вибираються зі списку:

None - немає змінних для відображення;

Current - вихідний струм джерела.

Блок є ідеальним джерелом струму, тобто його власне опір ня одно нескінченності.

Приклад.

На рис. 3.5 показана схема з використанням керованого джерела струму, що формує в навантаженні серії синусоїдальних імпульсів струму.

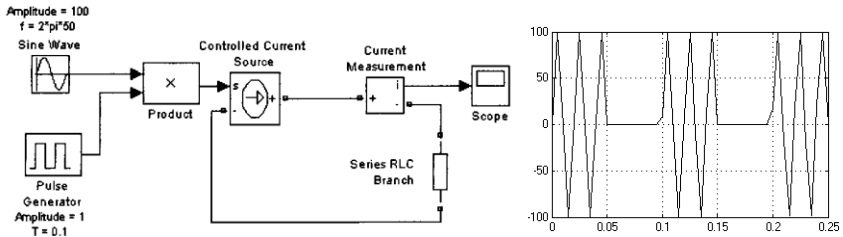


Рисунок 3.5 – Застосування керованого джерела струму.

Трифазне джерело напруги / 3-Phase Source

Призначення.

Моделює трифазне джерело напруги. Блок 3-Phase Source включає в себе три джерела змінної напруги, з'єднаних в зірку з нульовим проводом або без нього. Кожна фаза джерела володіє внутрішнім активно-індуктивним опором. Внутрішні опору всіх фаз джерела однакові. Внутрішній опір джерела може бути задано безпосередньо за допомогою значень опору й індуктивності фази або побічно, за допомогою параметрів короткого замикання.

Параметри блоку.

Phase-to-phase rms voltage (V) [Дійсне значення лінійної напруги].

Phase angle of phase A (cdeg) [Початкова фаза напруги у фазі A (град)].

Frequency (Hz) [Частота (Гц)]. Частота джерела.

Internal connection [З'єднання фаз джерела]. Значення параметра вибирається зі списку:

Y - зірка;

Yn - зірка з нульовим проводом;

Yg - зірка з заземленою нейтраллю.

Specify impedance using short-circuit level [Поставити власне повний опір джерела, використовуючи параметри короткого замикання]. При установці прапорця у вікні діалогу з'являються допов. вальні графи для введення параметрів короткого замикання джерела.

Source resistance (Ohms) [Власне опір джерела (Ом)].

Source inductance (H) [Власна індуктивність джерела (Гн)].

3-Phase short-circuit level at base voltage (VA) [Потужність короткого замикання при базовому значенні напруги].

Base voltage (Vrms ph-ph): [Дійсне значення лінійного базового напруги]. Величина напруги фаза-фаза джерела, при якому визначена потужність короткого замикання.

X/R ratio [Відношення індуктивного та активного опорів]. при заданні імпедансу джерела через потужність короткого замикання реактивне опір джерела визначається за виразом: $X = U_{K3}^2 / Q_{K3}$, де Q_{K3} - потужність короткого замикання; U_{K3} - напруга джерела, при котро ром визначена потужність короткого замикання.

Активний опір джерела знаходиться у відповідності з виразом: $R = X/k$, де k - відношення X до R (параметр X / R ratio).

Приклад.

На рис. 3.6 показана схема з використанням трифазного джерела напруги, що підключається до несиметричної трифазної навантаженні. Токи в навантаженні виміряні за допомогою блоку Multimetr.

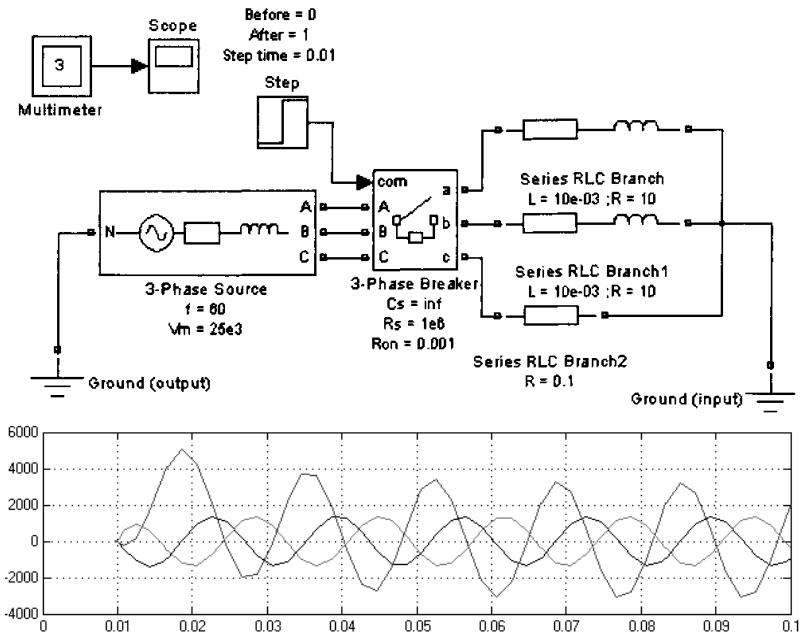


Рисунок 3.6 – Робота трифазного джерела напруги на несиметричне навантаження.

Трифазне програмоване джерело напруги / 3-Phase Programmable Voltage Source

Призначення.

Блок 3-Phase Programmable Voltage Source виробляє трифазну систему напруг з програмованими в часі змінами амплітуди, фази та частоти, а також гармонійного складу.

Параметри блоку.

Positive-sequence [Amplitude (Vrms Ph-Ph) Phase (degrees) Freq. (Hz)] [Пряма послідовність: [Діюче значення (В) Фаза (градуси) Частота (Гц)]]. Параметр задається у вигляді вектора з трьох елементів.

Time variation of [Зміна в часі]. Список, що розкривається дозволяє вибрати параметр джерела, який буде змінюватися з часом. Значення параметра вибирається зі списку:

None - немає змінюються в часі параметрів джерела;

Amplitude - амплітуда;

Phase - фаза;

Frequency - частота.

Type of variation [Спосіб зміни]. Параметр задає вид зміни обраного параметра джерела. Вид зміни вибирається зі списку:

Step - поетапне зміна;

Ramp - лінійне зміна;

Modulation - модуляція;

Table of time-amplitude pairs - таблиця «час-значення».

Step magnitude [pu, Hz or deg]. [Рівень ступеневої сигналу [в.о., Гц або град.]. Визначає величину, на яку ступінчасто змінюється вибраний параметр. Зміна величини напруги ня задається у відносних одиницях (в.о.), фази - в ел. градусах, і частоти - в Гц. Наприклад, якщо вибрано ступеневу зміна амплітуди сигналу, рівне 0,5, то це означає, що величина вихідної напруги джерела буде повели чена на 0,5 щодо зазначеного в першій графі значення. Час, протягом якого величина вихідної напруги буде змінена, задається в графі Variation timing.

Rate of change (value / s): [Швидкість зміни (величина / с)]. Визначає швидкість зміни параметра джерела. Зміна величини напруги задається в о.е. / с, фази - в ел.гра дусах / с, і частоти - в Гц /

с.

Amplitude of the modulation: [Амплітуда модуляції]. У цій графі задається амплітуда модуляції пари параметрів джерела. Амплітуда модуляції напруги задається у відносних одиницях (в.о.), фази - в ел. градусах, і частоти - в Гц.

Frequency of the modulation (Hz) [Частота модуляції (Гц)].

Variation timing (s) [Start End] [Час дії зміни [Початок Кінець]]. Параметр визначає час початку і час закінчення дії зміни обраного параметра джерела. Пара метр задається у вигляді вектора з двох значень (початковий і кінцевий час).

Fundamental and / or Harmonic generation: [Накладення прямої, зворотної, або нульової послідовності та/або вищих гармонік].

A: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq (0,1 or 2)] [A: [Гармоніка (n) Амплітуда Фаза (град) Послідовність (0,1 або 2)]]. У графі задається вектор параметрів генерується гармоніки напруги: номер гармоніки, амплітуда (у відносних одиницях), початкова фаза, послідовність (0 - нульова, 1 - пряма, 2 - зворотня). Результируюча вихідна напруга буде сумою напруг, заданих в графі Positive-sequence і в даній графі.

B: [Order (n) Amplitude Phase (degrees) Seq (0,1 or 2)] [B: [Гармоніка (n) Амплітуда Фаза (град) Послідовність (0,1 або 2)]]. Параметр задається аналогічно попередньому.

Harmonic timing (s): [Start End] [Час дії гармоніки (с) [Початок Кінець]]. У графі задається вектор на початкового і кінцевого значень часу для генерації гармонік.

Джерело є ідеальним джерелом напруги (його внутрішній опір дорівнює нулю).

Приклад.

На рис. 3.7 показана схема з використанням трифазного програмованого джерела напруги, підключеного до симетричної активної навантаженні.

В інтервалі часу від 0,02 до 0,06 с джерело додатково генерує третю гармоніку напруги прямої послідовності з амплітудою 0,5 в.о.

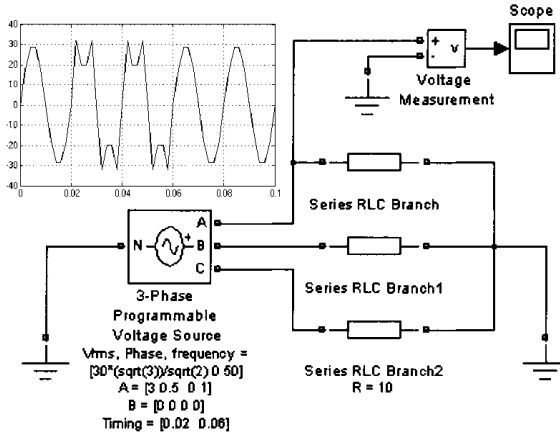


Рисунок 3.7 – Застосування трифазного програмованого джерела напруги

ТЕМА 4 – ВИМІРЮВАЛЬНІ ТА КОНТРОЛЬНІ ПРИСТРОЇ

Вимірювач струму / Current Measurement

Призначення.

Виконує вимірювання миттєвого значення струму, що протікає через сполучну лінію (провід). Вихідним сигналом блоку Current Measurement є звичайний сигнал Simulink, який може використовуватися будь-яким Simulink-блоком.

Параметри блоку.

Output type [Вид вихідного сигналу]. Вибір значення параметра можливий, тільки якщо з допомогою блоку Powergui встановлений режим розрахунку схеми комплексним методом (Phasor simulation). В цьому випадку значення параметра вибирається зі списку:

Magnitude - амплітуда (скалярний сигнал);

Complex - комплексной сигнал;

Real-Imag - вектор, що складається з двох елементів - дійсна і мні травня складали сигналу;

Magnitude-Angle - вектор, що складається з двох елементів - амплітуда і аргумент сигналу.

Позитивне напрямком струму задається знаками «+» і «-» на

пиктограмі блоку. При протіканні струму від клем «+» до клем «-» знак струму вважається позитивним.

Приклад.

На рис.4.1 показана схема, в якій блок Current Measurement використовується для вимірювання струму в послідовному коливальному контурі Simulink-сигнал, що формується даними блоком, використовується потім для відображення струму на осцилографі. Нульові початкові умови для розрахунку схеми задаються у вікні параметрів блоку Series RLC Branch.

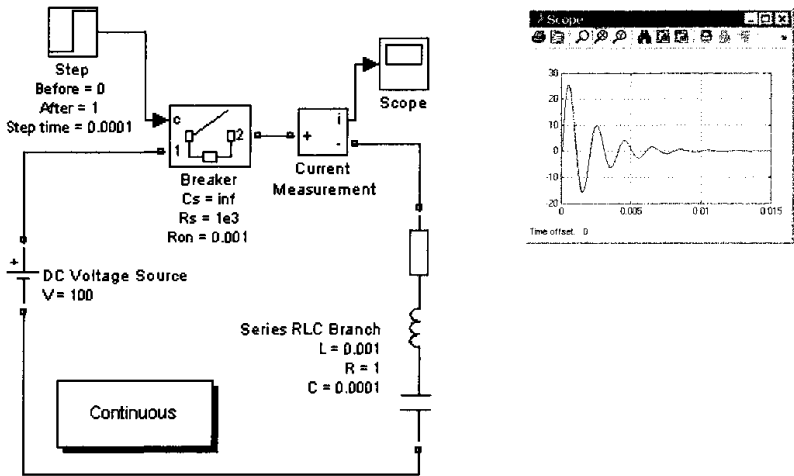


Рисунок 4.1 – Електрична схема, в якій блок Current Measurement використовується для вимірювання струму.

Вимірювач напруги / Voltage Measurement

Призначення.

Виконує вимірювання миттєвого значення напруги між двома вузлами схеми. Вихідним сигналом блоку Voltage Measurement є звичайний сигнал Simulink, який може використовуватися будь-яким Simulink-блоком.

Параметри блоку.

Output signal: [Вихідний сигнал]. Вид вихідного сигналу

блоку. Вибір значення параметра можливий, тільки якщо з допомогою блоку Powergui встановлений режим розрахунку схеми комплексним методом (Phasor simulation). В цьому випадку значення параметра вибирається зі списку:

Magnitude - амплітуда (скалярний сигнал);

Complex - комплексной сигнал;

Real-Imag - вектор, що складається з двох елементів: дійсна і уявна складові сигналу;

Magnitude-Angle - вектор, що складається з двох елементів - амплітуда і аргумент сигналу.

Позитивне напрямок напруги задається знаками «+» і «-» на піктограмі блоку. Знак напруги вважається позитивним, якщо напруга направлено від клем «+» до клем «-».

Приклад.

На рис. 4.2 показана схема, в якій блок Voltage Measurement використовується для вимірювання напруги на конденсаторі послідовного коливального контуру. Simulink-сигнал, що формується даними блоком, використовується потім для відображення напруги на осцилографі. Нульові початкові умови для розрахунку схеми задаються у вікні параметрів блоку Series RLC Branch.

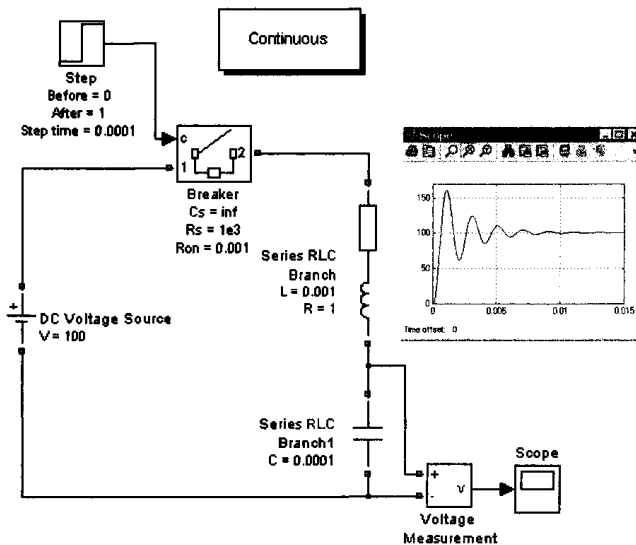
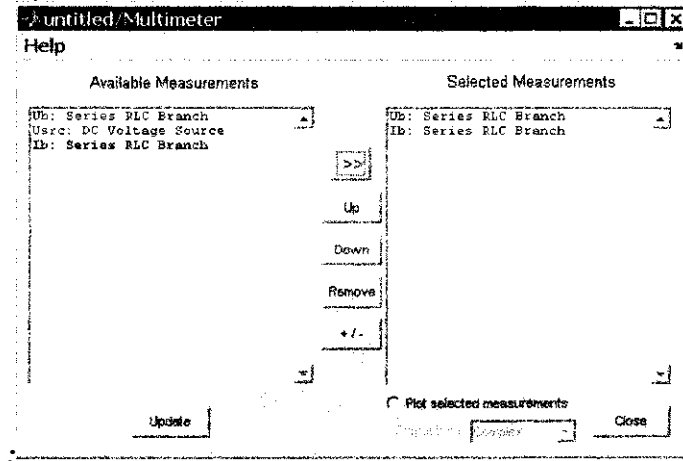


Рисунок 4.2 – Вимірювання напруги ділянки кола

Мультиметр / Multimeter

Призначення.

Блок Multimeter виконує вимір струмів і напруг блоків бібліотеки SimPowerSystems, для яких в їх вікні діалогу встановлений параметр Measurements (вимірювані змінні). Вікно завдання параметрів:



Параметри блоку.

Available Measurements [Змінні, доступні для вимірювання].

У цій графі відображаються змінні (струми і напруги) блоків схеми, для яких в їх вікні діалогу встановлено параметр Measurements (вимірювані змінні). Оновлення списку змінних можна виконати за допомогою клавіші Update.

Selected Measurements [Вимірювані змінні]. У цій графі вказуються змінні, які будуть передаватися на вихід блоку Multimeter. Для управління списком вимірюваних змінних можна використовувати наступні клавіші:

»- Додати виділену змінну в список вимірюваних;

Up - пересунути вгору виділену змінну в списку вимірюваних;

Down - пересунути вниз виділену змінну в списку вимірюваних;

Remove-видалити виділену змінну зі списку вимірюваних;

+/- - Змінити знак виділеної змінної.

Output type: [Вихідний сигнал]. Вид вихідного сигналу блоку. Вибір значення параметра можливий, тільки якщо з допомогою блоку Powergui встановлений режим розрахунку схеми комплексним методом (Phasor simulation). В цьому випадку значення параметра вибирається зі списку:

Magnitude - амплітуда (скалярний сигнал);

Complex - комплексной сигнал;

Real-Imag - вектор, що складається з двох елементів - дійсна і уявна складові сигналу;

Magnitude-Angle - вектор, що складається з двох елементів - амплітуда і аргумент сигналу.

Блок може використовуватися для вимірювання напруг і струмів замість звичайних вимірників - Current Measurement і Voltage Measurement.

Список блоків, у вікні параметрів яких є параметр Measurements, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Блоки, які мають параметр Measurements

Назва блоку	Назва блоку
AC Current Source	PI Section Line
AC Voltage Source	Saturable Transformer
Breaker	Series RLC Branch
Controlled Current Source	Series RLC Load
Controlled Voltage Source	Surge Arrester
DC Voltage Source	Three-Level Bridge
Distributed Parameter Line	Three-Phase Harmonic Filter
Linear Transformer	Three-Phase Load (Series and Parallel)
Multi-Winding Transformer	Three-Phase Branch (Series and Parallel)
Mutual Inductance	Three-Phase Transformer (Two and Three Windings)
Parallel RLC Branch	Universal Bridge
Parallel RLC Load	Zigzag Phase-Shifting Transformer

Вихідним сигналом блоку є вектор сигналів вимірюваних змінних.

Знаки вимірюваних змінних (струмів і напруг) не є настільки очевидними, як при вимірах за допомогою Current Measurement або Voltage Measurement, оскільки блоки, для яких виконуються вимірювання, можуть бути повернені. При цьому жодних символів для вказівки позитивних напрямків струмів або напруг на самих блоках немає. На відміну від Simulink-блоків порти SPS-блоків є ненаправленими, і по ним можна судити про позитивні напрямки струмів і напруг. В SPS-блоках позитивні напрями визначаються їх орієнтацією. Для знаходження орієнтації блоку необхідно виділити необхідний блок і виконати команду вигляду: `get_param (gcb, 'Orientation')`.

У табл. 4.2 наведені полярності струмів і напруг для різної орієнтації блоків.

Природна орієнтація блоків, тобто їх орієнтація в бібліотеці, - right для горизонтально орієнтованих блоків і down - для блоків, орієнтованих вертикально.

Таблиця 4.2 – Полярність струмів і напруг блоків в залежності від їх орієнтації.

Орієнтація блоку	Позитивний напрямок струму	Позитивний напрямок напруги
right	зліва направо	Від лівої клеми до правої
left	справо наліво	Від правої до лівої
down	зверху вниз	Від верхньої до нижньої
up	знизу вверх	Від нижньої до верхньої

Для однофазних трансформаторів, клеми обмоток яких розташовані як з лівого, так і з правого боку, напруга обмотки є напруга верхньої клеми щодо нижньої незалежно від орієнтації блоку (right або left). Токи обмоток - це струми, що впадає у верхню клему. Для трифазних трансформаторів позитивні напрямки струмів і напруг будуть показані за допомогою міток сигналів в самому блоці мультиметра. Наприклад, мітка сигналу `Ubn_w2` означає, що вимірюється напруга другої обмотки трансформатора між нейтральною точкою і клемою B, а мітка сигналу `Iab_w1` означає, що

вимірюється струм, що протікає від клемі А до клемі У першої обмотки трансформатора.

Приклад.

На рис. 4.3 показана схема однофазного мостового випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження. За допомогою блоку Multimeter вимірюються напруга і струм одного з вентилів, вихідна напруга моста і струм навантаження.

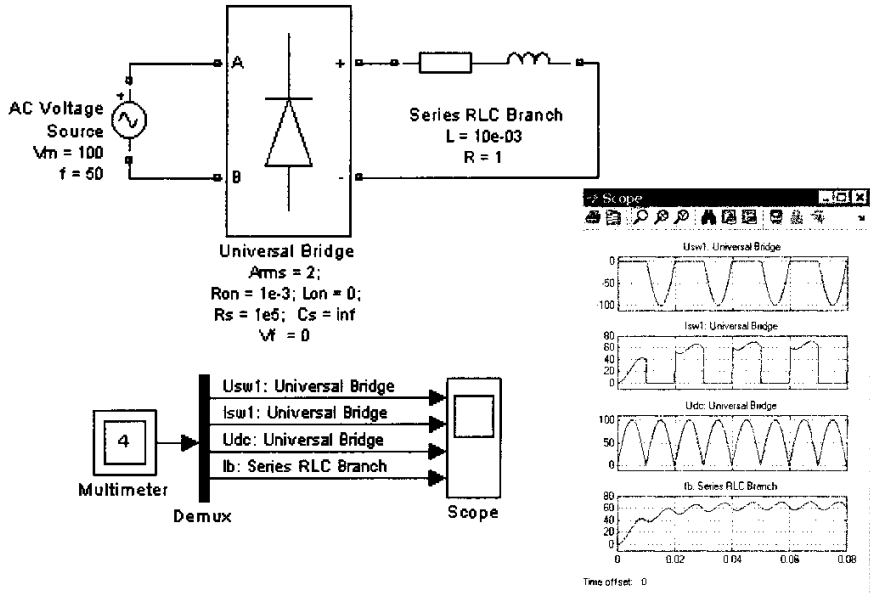


Рисунок 4.3 – Схема однофазного мостового випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження.

Трифазний вимірювач / Three-Phase V-I Measurement

Призначення.

Блок Three-Phase VI Measurement виконує вимір струмів і напруг в трифазних колах.

Параметри блоку.

Voltage Measurement [Вимірювання напруг]. У цій графі проводиться вибір вимірюваного напруги:

no - напруги не вимірюються;

phase-to-ground - вимірювання фазної напруги;

phase-to-phase - вимірювання лінійного (мжфазної) напруги.

Use a label [Використовувати мітку]. При установці прапорця сигнал буде передаватися до блоку From. Параметр Goto tag блоку From повинен відповідати імені мітки, заданої в графі Signal label.

Voltages in pu [Вимірювання напруг у відносних одиницях]. При установці прапорця виміряні напруги будуть перетворені у відповідності з наступним виразом:

$$U_* = \frac{U}{U_6 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}},$$

де U_6 - базисне напруга, що задається в графі Base voltage.

Base voltage (Vrms phase-phase): [Базисне напруга (діюче значення лінійної напруги)].

Current measurement [Вимірювання струмів]. У цій графі проводиться вибір вимірювання струмів:

no - струми не вимірюються;

yes - струми вимірюються.

Use a label: [Використовувати мітку]. При установці прапорця сигнал буде передаватися до блоку From. Параметр Goto tag блоку From повинен відповідати імені метки, заданої в графі Signal label.

Currents in pu: [Вимірювання струмів у відносних одиницях]. При установці прапорця изме- рення струми будуть перетворені у відповідності з наступним виразом:

$$I_* = \frac{I}{S_6 \cdot \sqrt{2} / (U_6 \cdot \sqrt{3})},$$

де S_6 - базисна потужність, що задається в графі Base power.

Output signal [Вихідний сигнал]. Вид вихідного сигналу блоку. Вибір значення параметра можливий, тільки якщо з допомогою блоку Powergui встановлений режим розрахунку схеми комплексним методом (Phasor simulation). В цьому випадку значення параметра вибирається зі списку:

Magnitude - амплітуда (скалярний сигнал);

Complex - комплексной сигнал;

Real-Imag - вектор, що складається з двох елементів - дійсна і уявна складові сигналу;

Magnitude-Angle - вектор, що складається з двох елементів - амплітуда і аргумент сигналу.

Вихідними сигналами блоку є вектори сигналів вимірюваних змінних.

Приклад.

На рис. 4.4 показана схема включення трифазного джерела напруги на активно-індуктивне навантаження. За допомогою блоку Three-Phase VI Measurement вимірюються фазні струми і напруги навантаження.

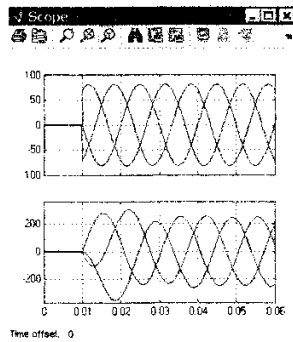
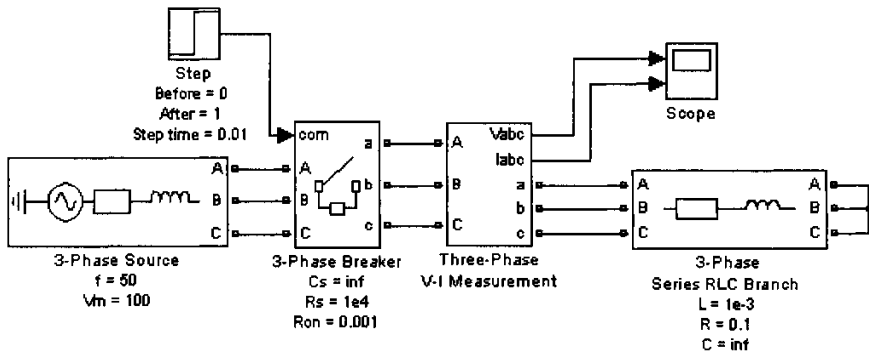


Рисунок 4.4 – Вимірювання струмів і напруг у трифазній ланцюга

Вимірювач повного опору / Impedance Measurement

Призначення.

Блок Impedance Measurement виконує вимір залежності повного опору (імпедансу) ділянки електричного кола від частоти.

Параметри блоку.

Multiplication factor [Масштабний коефіцієнт]. Значення параметра, яке відрізняється від 1, може використовуватися для відповідного збільшення або зменшення вимірюваного значення. Наприклад, при вимірюванні повного опору між двома фазами симетричної трифазної ланцюга значення параметра можна встановити рівним 0,5. В результаті буде отримано значення повного опору тільки для однієї фази.

Для відображення залежності імпедансу від частоти необхідно встановити на схему блок Powergui. Відкривши вікно діалогу блоку, слід натиснути кнопку Impedance vs Frequency Measurements і в новому вікні натиснути кнопку Display. В результаті у вікні будуть відображені залежності модуля і аргументу повного опору від частоти.

При розрахунку повного опору схеми враховуються тільки три нелінійних блоку: Breaker (вимикач), Ideal Switch (ідеальний ключ) і Distributed Parameter Line (лінія з розподіленими параметрами). Всі інші нелінійні блоки (електричні машини, силові напівпровідникові прилади та т. п.) будуть відключені.

При використанні вимірювача повного опору слід мати на увазі, що цей блок виконаний на основі джерела струму і не може бути включений послідовно з індуктивними елементами. Для усунення цього обмеження слід шунтувати блок резистором з досить великим опором. Величину опору слід вибирати такий, щоб властивості схеми значно не змінювалися.

Приклад.

На рис. 4.5 показана схема підключення блоку Impedance vs Frequency Measurements до послідовного коливального контуру для вимірювання його повного опору. Там же показано вікно блоку Powergui з графіками.

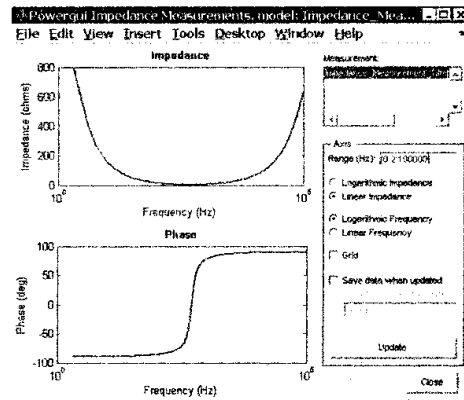
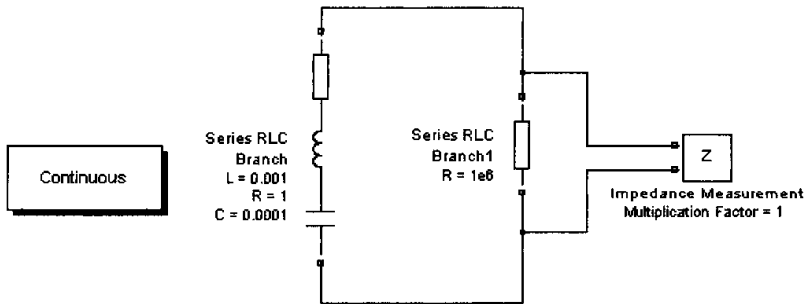


Рисунок 4.5 – Вимірювання повного опору кола.

ТЕМА 5 – МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ.

Режим Steady-State дозволяє виконати розрахунок ustalених значень змінних. Розрахунок проводиться для стану схеми в момент часу $t = 0$. В цьому режимі розрахунку у вікні блоку Powergui відображаються значення змінних стану моделі, а також вимірюваних змінних джерел і нелінійних елементів. Розрахунок проводиться для однієї фіксованої частоти, що дорівнює частоті джерел схеми, або для нульової частоти, якщо в схемі присутні тільки джерела постійної напруги. Результати можуть бути представлені як у вигляді діючих, так і у вигляді амплітудних значень. При розрахунку на змінній напрузі будуть показані також фазові зрушення відповідних змінних. При наявності в схемі ключових елементів слід мати на увазі, що розрахунок буде виконаний для початкового стану ключів.

Для відображення результатів можливе використання наступних установок:

Units [Система вимірювання]. Вибір системи виміру:

Peak values - амплітудні значення;

RMS values- діючі значення.

Frequency [Частота]. Частота джерел (Гц).

Display [Відображувані змінні]. При установці прапорців відображаються слідуєчі розрахункові змінні:

States - змінні стану (струми в індуктивностях і напруги на конденсаторах);

Measurements - вимірювані змінні, тобто змінні, для вимірювання яких в моделі встановлені датчики струму або напруги;

Sources - напруги і струми джерел;

Nonlinear - струми та напруги нелінійних елементів.

Приклад.

На рис. 5.1 показані приклад схеми і результати її розрахунку для сталого режиму.

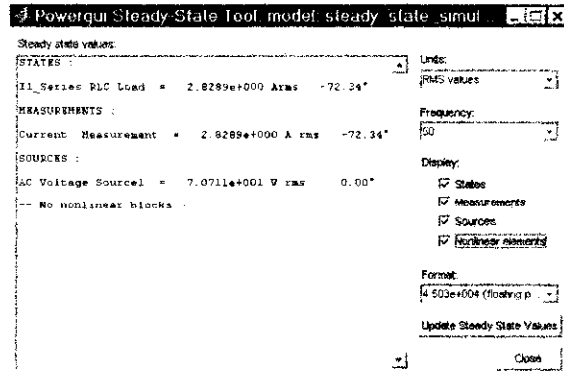
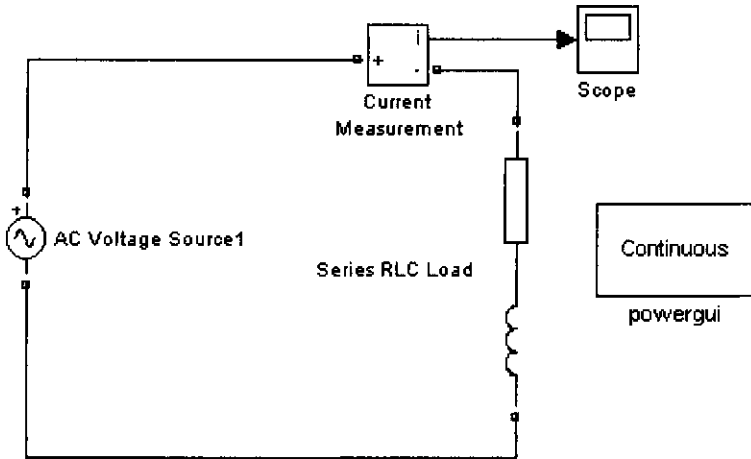


Рисунок 5.1 – Розрахунок усталеного режиму.

Розрахунок схеми векторним методом (Phasor simulation) проводиться для електричної схеми, що має ключові елементи в тих випадках, коли користувача цікавлять тільки усталені значення змінних схеми. Вид розрахунку усталеного режиму Steady-State в цьому випадку не дуже зручний, оскільки він виконується лише для початкового стану ключів схеми. Якщо в лінійній ланцюга потрібно визначити лише значення амплітуди і фази всіх напруг і струмів, то немає необхідності вирішувати повну систему рівнянь моделі (система рівнянь в просторі станів), одержуваних при описі сукупності елементів моделі. Замість цього достатньо вирішити

набагато більш простий набір алгебраїчних рівнянь, що зв'язують вектори напруги і струму елементів моделі. Саме це робить векторний метод рішення. Метод обчислює напруги і струми як вектори (комплексні числа, що відображають синусоїдальні напруги і струми певної частоти). Вектори можуть бути представлені декартовій (дійсна і уявна частина числа) або в полярній системі координат (амплітуда і фаза). Оскільки перехідні процеси при такому способі розрахунку не враховуються, то моделювання відбувається набагато швидше. Однак необхідно завжди пам'ятати, що ця більш швидка методика рішення дає результат лише для однієї певної частоти.

Для проведення розрахунку векторним методом необхідно у вікні Powergui вибрати режим розрахунку Phasor simulation і задати частоту джерел в графі Frequency. В режимі Phasor simulation користувач може простежити, як змінюються усталені значення змінних при різних комутаціях в схемі.

На рис. 5.2 показані приклад схеми і результати розрахунку схеми векторним методом. Представлена схема є спрощеною моделлю трифазної схеми з частотою мережі 60 Гц і напругою мережі 230 кВ, в якій зображена тільки одна фаза. Еквівалентний джерело моделюється джерелом напруги (230 кВ RMS / $\sqrt{3}$) або 132.8 кВ, 60 Гц, сполученим послідовно з повним внутрішнім опором (R_s і L_s). Джерело підключений до RL-навантаженні лінією з розподіленими параметрами довжиною 150 км, яка моделюється блоком PI section 1-го порядку (ланцюг RL1 і 2 шунтуючих конденсатора, C1 і C2). У ланцюзі встановлений вимикач, який використовується для підключення навантаження (75 МВт, 20 МВАр) до приймального кінця лінії передачі. Як відображаються змінних обрані амплітудні значення струму і напруги, які розраховуються на основі комплексних значень за допомогою блоків Complex to Magnitude-Angle (в даному випадку ці блоки обчислюють модуль комплексного числа). На графіки, для порівняння, накладені графіки розрахунку перехідних процесів схеми. З графіків видно, що розрахунок векторним методом дає, по суті, огинають графіків перехідних процесів. Слід зазначити, що в режимі Continuous закривання вимикача Breaker відбувається при переході струму через нульове значення, наступне після надходження сигналу на відмикання, в разі ж використання методу векторного моделювання вимкнення настає негайно. Це відбувається тому, що при векторному моделюванні немає поняття переходу через

нуль.

Розрахунок схеми векторним методом дозволяє використовувати математику комплексних чисел для проведення додаткових обчислень в моделі. Наприклад, для обчислення потужності може бути використано вираз:

$$\dot{S} = P + jQ = \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{U} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{I} = \frac{1}{2} \dot{U} \cdot \dot{I},$$

де $\dot{U}$ - вектор напруги; $\dot{I}$ - комплексно-пов'язаний вектор струму.

У нижній частині схеми рис. показана реалізація даного вислову з допомогою блоків Simulink. Значення активної і реактивної потужностей в навантаженні виводяться на блоки Display.

Даний вид розрахунку може бути використаний і для дуже складних схем, коли розрахунок перехідних процесів не дає стійкого рішення.

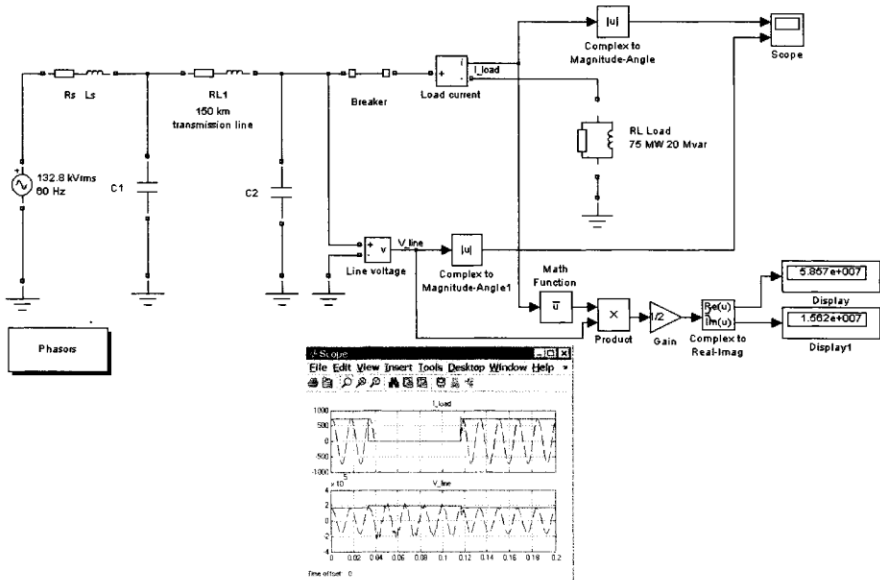


Рисунок 5.2 – Результати розрахунку схеми векторним методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэбни Дж., Хартман Т. Simulink 4.0. Секреты мастерства/Пер. с англ. М.Л.Симонова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 233 с.
2. Потемкин В.Г. Инструментальные средства MatLab 5.x. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 448 с.
3. SIMULINK. Simulink Reference. Version 5.0 The MathWorks, Inc., July 2002.578 p.
4. Лурье М.С., Лурье О.М. Применение системы Matlab при изучении курса электротехники. Монография. СибГТУ, Красноярск, 2005, 200 с.
5. Вешеневский С.Н. Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей. М.: Госэнергоиздат, 1954, 327 с.
6. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. М.: Госэнергоиздат, 1960, 472 с.
7. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. — М.: ДИАЛОГ - МИФИ, 2004. — 496 с.
8. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операций /Авакумов В.Г. — Киев: Вища школа, 1983. — 240 с.
9. Щукин Б.Д., Лыков Ю.Ф. Применение ЭВМ для проектирования систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1982. -164 с.
10. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. — М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1980. — 208 с.
11. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: Учеб. пособие. — СПб.: СЗТУ, 2003. — 120 с.
12. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
13. Капустин В.Ф. Практические занятия по курсу математического програм-мирования. — Л.: Изд. Ленинград. ун-та, 1976. — 192 с.
14. Дьяконов В. SIMULINK 4. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2002. — 528 с.