

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

з дисципліни

«МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ»

Частина III

*(для здобувачів вищої освіти спеціальностей 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка», 184 «Гірництво»
та для здобувачів спеціальності 263 «Цивільна безпека»
третього наукового рівня вищої освіти)
(Електронне видання)*

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електричної інженерії
Протокол № 8 від 14.02.2024 р.

Київ – 2023

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» Частина II (для здобувачів вищої освіти спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 184 «Гірництво» та для здобувачів спеціальності 263 «Цивільна безпека» третього наукового рівня вищої освіти) // Укладачі: Є.С. Руднєв, Ю.А. Романченко – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2023. – 43с.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 184 «Гірництво» та для здобувачів спеціальності 263 «Цивільна безпека» третього наукового рівня вищої освіти та можуть бути корисними для здобувачів вищої освіти інших інженерних спеціальностей.

Методичні вказівки містять рекомендації для виконання лабораторних робіт з дисципліни Моделювання електромеханічних систем з використанням пакету MATLAB (Simulink, Control System Toolbox, SimPowerSystem) за наступними темами: «Зв'язок Simulink із пакетом Control System ToolBox. Дослідження S-моделі в Control System ToolBox», «Створення блоків і бібліотек блоків користувача», «Моделювання динаміки механічної системи з реактивними силами (моментами) опору», «Дослідження перехідних процесів у лінійних динамічних ланцюгах з використанням додатка SimPowerSystems».

Укладачі

Є. С. Руднєв, к.т.н., доц.

Ю. А. Романченко, к.т.н., доц.

Рецензент

М.О. Морнева, к.т.н., доц.

ЗМІСТ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8.	
Зв'язок Simulink із пакетом Control System ToolBox. Дослідження S-моделі в Control System ToolBox.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9.	
Створення блоків і бібліотек блоків користувача.....	9
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10.	
Моделювання динаміки механічної системи з реактивними силами (моментами) опору.....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11.	
Дослідження перехідних процесів у лінійних динамічних ланцюгах з використанням додатка SimPowerSystems.....	28
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	38
ДОДАТОК А.....	39

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ЗВ'ЯЗОК SIMULINK ІЗ ПАКЕТОМ CONTROL SYSTEM TOOLBOX.

ДОСЛІДЖЕННЯ S-МОДЕЛІ В CONTROL SYSTEM TOOLBOX

Мета роботи: навчання основним прийомам роботи з пакетом програм Simulink (введення структури і параметрів моделі, завдання режимів інтегрування моделі) під час моделювання силової частини електропривода постійного струму. Дослідження моделі в часовій і частотній області.

8.1 Дослідження S-моделі в Control System ToolBox

Щоб провести дослідження S-моделі в Control System ToolBox необхідно виконати такі кроки:

- 1) позначити входи і виходи системи за допомогою блоків **In** і **Out**;
- 2) зберегти модель на диску;
- 3) за допомогою команди $[A,B,C,D]=\text{linmod}(\text{'ТАК_КР'})$ отримати в Control System ToolBox матриці, що описують лінеаризовану модель системи в просторі станів;
- 4) створити в *Control System ToolBox* модель простору станів ss-модель;
- 5) далі отримана модель може бути перетворена в *tf* і *zpk* формати.

Після отримання опису моделі в Control System ToolBox можна провести її дослідження в часовому і частотному діапазонах за методикою, представленою в ЛР №7 (Частина II).

Методичний приклад

Створюємо модель системи *sistem.mdl* (рис. 8.1)

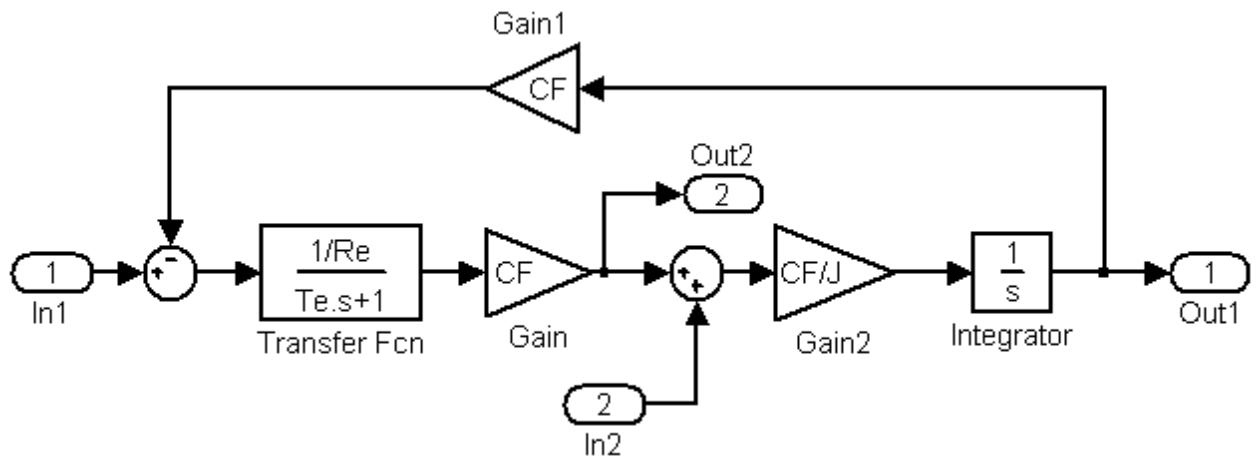


Рисунок 8.1 – Модель досліджуваної системи sistem.mdl

% присвоюємо змінним, які використовуються в моделі, чисельні значення

Re=0.1; Te=0.2; CF=5; J=0.5;

% визначаємо математичний опис системи, заданої S-моделлю sistem.mdl

[A,B,C,D]=linmod('sistem.mdl');

SYS1=ss(A,B,C,D);

% визначаємо передавальну функцію системи

Wsys=tf(SYS1);

Якщо система має кілька входів і (або) виходів, то Wsys буде матрицею, що містить передавальні функції від кожного входу до кожного виходу. Так у нашому випадку Wsys буде такою

Transfer function from input 1 to output...

2500

#1: -----

$s^2 + 5 s + 1.25e004$

250 s

#2: -----

$s^2 + 5 s + 1.25e004$

Transfer function from input 2 to output...

$$10 s + 50$$

#1: -----

$$s^2 + 5 s + 1.25e004$$

$$-1.25e004$$

#2: -----

$$s^2 + 5 s + 1.25e004$$

Щоб вилучити окремі передавальні функції з Wsys (наприклад, за завданням і обуренням) необхідно скористатися командами вилучення окремих елементів матриць. В індексах перше число – номер виходу, друге – номер входу.

Наприклад, для Wsys

$$W11=Wsys(1,1)$$

Transfer function:

$$2500$$

$$s^2 + 5 s + 1.25e004$$

У результаті W11 це передавальна функція від першого входу до першого виходу

Задав

$$W12=Wsys(1,2)$$

отримаємо передавальну функцію від другого входу до першого виходу:

Transfer function:

$$10 s + 50$$

$$s^2 + 5 s + 1.25e004$$

8.2 Завдання до лабораторної роботи

Необхідно провести дослідження системи автоматизованого електроприводу, структурну схему якого наведено на рисунку 8.2. Параметри системи керування згідно з варіантом наведено в таблиці 8.1. Для всіх варіантів $K_{ar}=1$

Потрібно:

1) скласти схему моделі, заданої системи керування, з використанням засобів пакета Simulink;

2) задати параметри моделі, відповідно до заданого варіанта;

3) провести моделювання процесу пуску, реверсу і гальмування системи за умови завдання $U_3=100$;

4) використовуючи засоби пакета Control System Toolbox, визначити передавальні функції координат E_G, I, ω за керуючим (U_3) та збурювальним (I_C) впливами. Визначити передавальну функцію розімкнутої системи;

5) використовуючи графічні засоби системи MATLAB і пакету Control System Toolbox на базі передавальних функцій W_{ω, U_3} та W_{ω, I_C} , виконати розрахунок і побудову таких характеристик системи управління:

а) амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) замкнутої системи за керуючим впливом U_3 ;

б) перехідну та імпульсну перехідну характеристики замкнутої системи за керуючим впливом U_3 ;

в) перехідну характеристику замкнутої системи за збурювальним впливом I_C ;

г) логарифмічні амплітудно-частотну і фазо-частотну характеристики (ЛАЧХ і ЛФЧХ) розімкнутої системи;

д) амплітудно-фазову характеристику (діаграму Найквіста) розімкнутої системи.

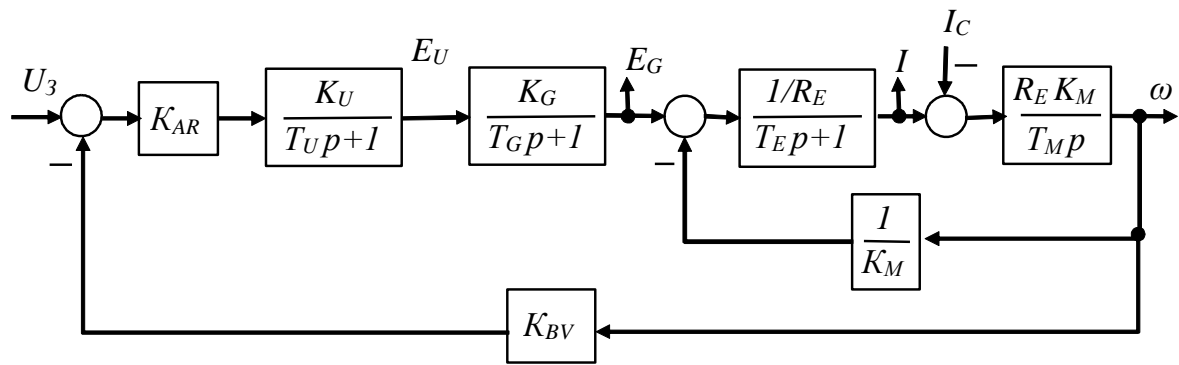


Рисунок 8.2 – Структурна схема системи електроприводу

Таблиця 8.1 – Параметри системи управління

Варіант	K_U	T_U	K_G	T_G	R_E	T_E	K_M	T_M	K_{BV}
1	40	0,003	2,13	0,76	0,028	0,032	0,1585	0,1163	1
2	30	0,004	2,44	1,226	0,015	0,022	0,21	0,125	1
3	40	0,005	4,2	0,763	0,021	0,024	0,078	0,1	1
4	30	0,006	2,23	0,92	0,025	0,036	0,15	0,115	1
5	35	0,007	4,58	1,16	0,017	0,027	0,1	0,089	1
6	30	0,008	4,08	0,865	0,018	0,035	0,126	0,14	1
7	25	0,009	4,5	0,91	0,024	0,033	0,079	0,096	1
8	20	0,01	2,1	0,76	0,021	0,028	0,2	0,118	1
9	25	0,003	4,26	0,78	0,022	0,027	0,128	0,112	1
10	30	0,004	5,3	0,73	0,0198	0,028	0,078	0,128	1
11	35	0,005	4,0	0,848	0,022	0,033	0,103	0,108	1
12	40	0,006	2,18	0,92	0,021	0,032	0,158	0,099	1
13	25	0,007	4,42	0,8	0,0195	0,027	0,128	0,126	1
14	30	0,008	4,68	0,837	0,0188	0,038	0,078	0,11	1
15	25	0,009	2,265	0,8	0,0175	0,027	0,258	0,123	1
16	30	0,01	4,55	0,739	0,021	0,0354	0,08	0,0864	1
17	35	0,003	4,8	1,2	0,0214	0,034	0,126	0,104	1
18	40	0,004	3,5	0,82	0,0189	0,032	0,13	0,1	1
19	20	0,005	4,3	0,855	0,0179	0,025	0,09	0,09	1
20	20	0,006	3,65	0,765	0,0205	0,0275	0,098	0,113	1
21	40	0,0033	3,95	0,93	0,021	0,033	0,096	0,115	1
22	23	0,004	5,1	1,1	0,018	0,032	0,085	0,123	1

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

СТВОРЕННЯ БЛОКІВ І БІБЛІОТЕК БЛОКІВ КОРИСТУВАЧА

Мета роботи: Освоєння основних прийомів роботи з пакетом програм Simulink при створенні маскованих блоків і бібліотек користувача, на прикладі створення блоку, що моделює двигун постійного струму незалежного збудження.

9.1 Послідовність створення маскованих блоків

Для створення маскованого блоку двигуна постійного струму незалежного збудження скористаємося його лінеаризованою моделлю (рис. 9.1)

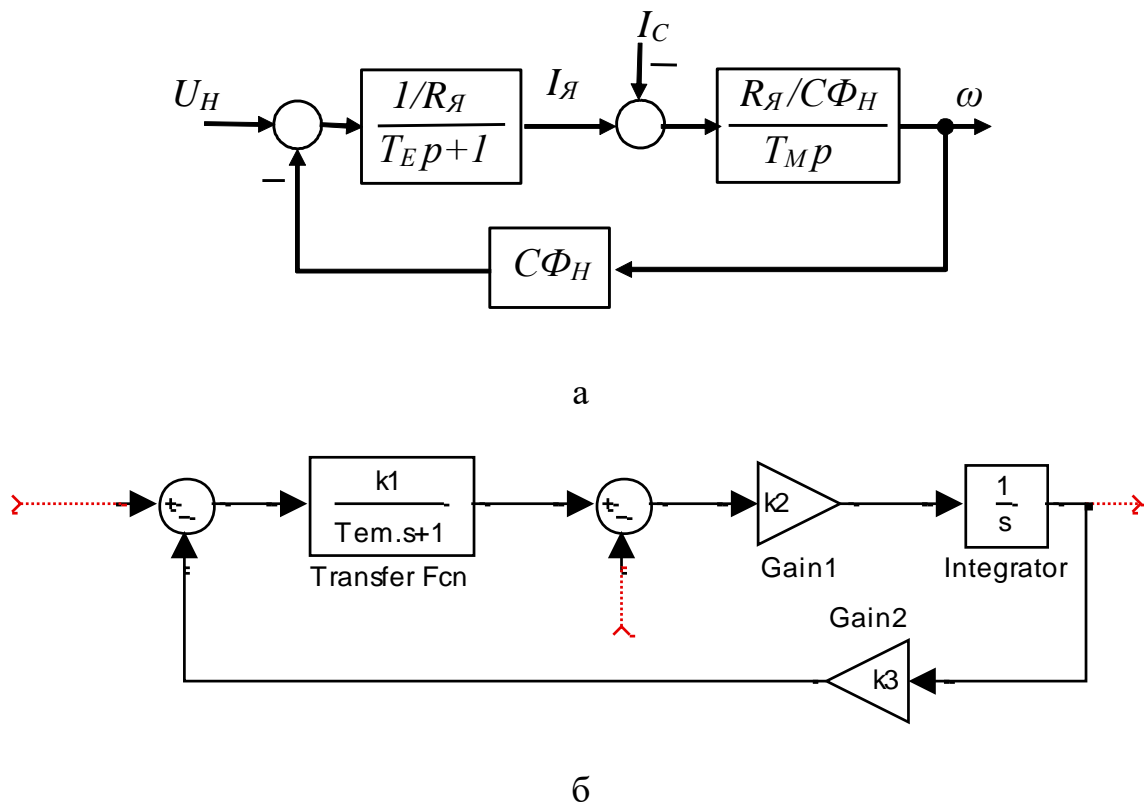


Рисунок 9.1 – Структура (а) та структура моделі (б) блоку

У цій моделі параметри блоків визначаються такими співвідношеннями:

$$k_1 = 1/R_a; T_{em} = T_E; k_2 = R_a/C\Phi T_m; k_3 = C\Phi, \quad (9.1)$$

де R_a – активний опір якірного ланцюга;

T_E – електромагнітна постійна часу якірного ланцюга;

T_m – електромеханічна постійна часу машини;

C – конструктивна постійна двигуна;

Φ – магнітний потік.

Для того, щоб на основі моделі (рис. 9.1,б) створити маскований блок, необхідно виконати такі дії:

1) замінити всі числові значення параметрів вихідної моделі їхніми символічними позначеннями;

2) збережіть модель під іншим ім'ям, оскільки подальші дії багато в чому складно скасувати;

3) виділити всі блоки, що належать до машини постійного струму, і виконати створення підсистеми (Edit → Create SubSystem). Результат останньої дії наведено на малюнку 9.2,а. Подвійне клацання мишею на отриманому блоці дає змогу переглянути внутрішню структуру створеної підсистеми (рис. 9.2,б);

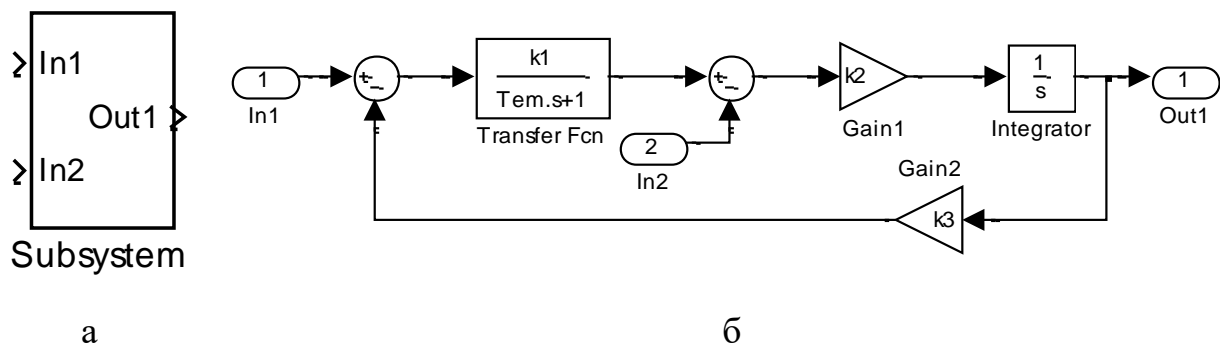


Рисунок 9.2 – Створена підсистема та її внутрішня структура

4) підготуйте створену підсистему до маскування, для чого перейменуйте її на DPT_NV, додайте вихід для вимірювання струму машини, дайте осмислені підписи входів і виходів блоку (рис. 9.3, а та рис. 9.3, б);

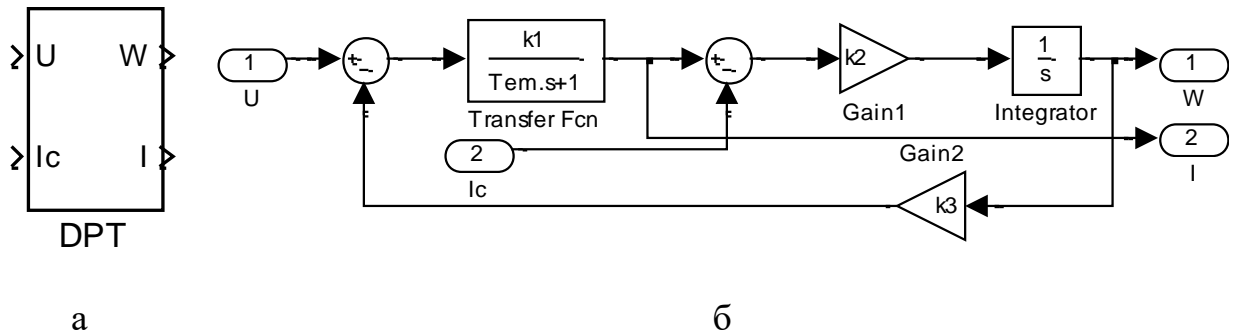


Рисунок 9.3 – Підсистема з додатковим виходом (струм якоря)

5) виконайте маскування підсистеми (Edit → Mask SubSystem...), у відповідь на що система Matlab запустить редактор маски з чотирма вкладками (рис. 9.4);

б) вкладка Parameters дає змогу визначити вікно параметрів блоку, що маскується. Оскільки визначальними для цього блоку є такі параметри $R_{я}$, T_E , $C\Phi$, T_m , то вкладку Parameters заповнимо так, як показано на рисунку 9.5;

Увага!!! Хоча в подальших прикладах присутня літера Я, не використовуйте її при створенні блоку в жодних застосуваннях. Після збереження такого блоку відбувається збій у MATLAB і блок більше не відкривається. Літеру Я краще замінити, наприклад, на поєднання букв ЙА.

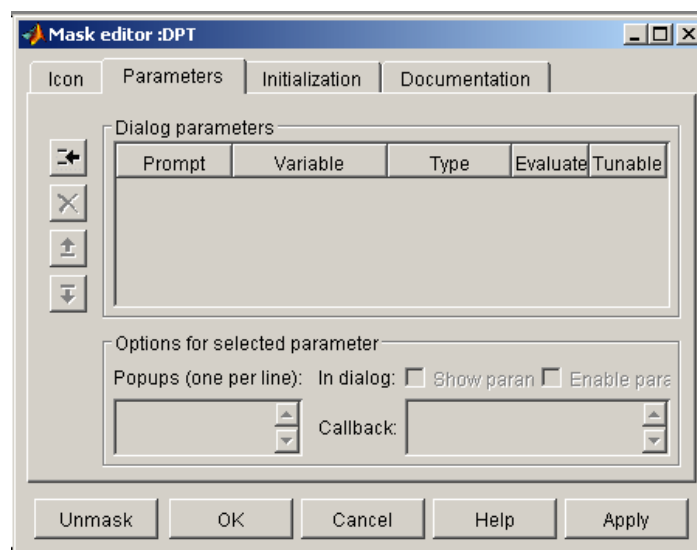


Рисунок 9.4 – Діалогове вікно редактора маски

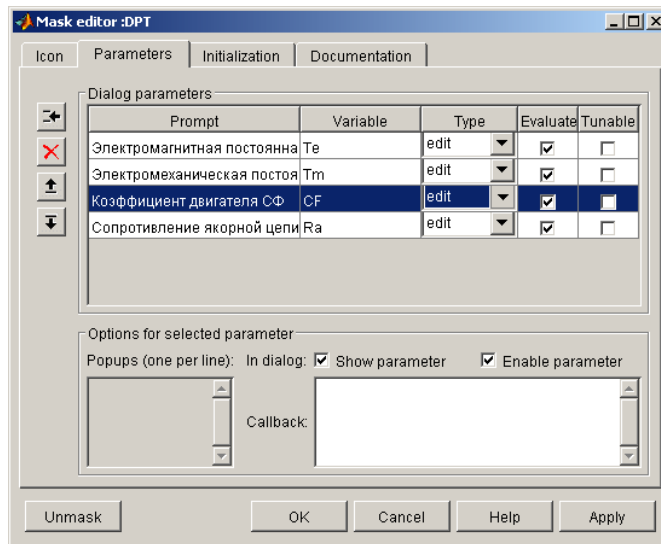


Рисунок 9.5 – Вкладка Parameters редактора маски

Після натискання кнопки Apply можна переконатися, що вікно параметрів блоку набуло вигляду, який відповідає рисунку 9.6.

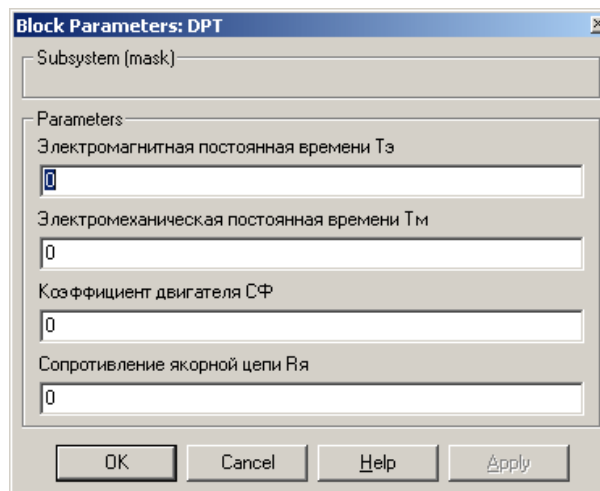


Рисунок 9.6 – Вікно параметрів маскованого блоку

7) далі слід заповнити вікно Initialization, яке пов'язує параметри блоків системи, що маскується, з параметрами з вікна Parameters, тобто відповідно до формули (9.1). У цій процедурі використовуються стандартні команди присвоєння Matlab (рис. 9.7)

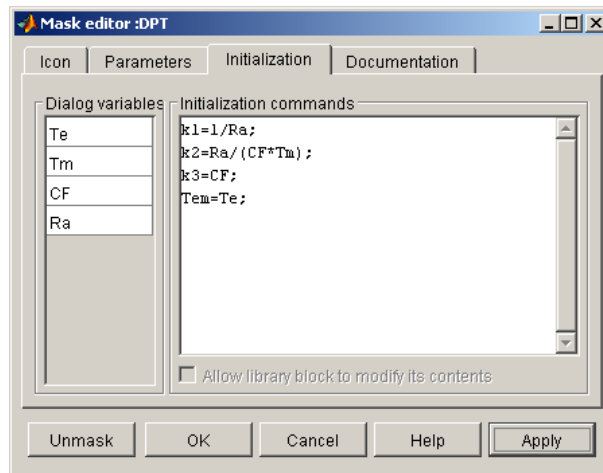


Рисунок 9.7 - Вкладка Initialization редактора маски

8) вкладка Documentation дає змогу задати два типи опису блока:

- опис блоку, розміщений у верхній частині вікна встановлення параметрів;
- довідковий опис блоку, що розміщується в довідковій системі Matlab.

Після заповнення вкладки Documentation вікно параметрів блоку набуває вигляду, представленого на рис. 9.8. Якщо в меню Help вікна моделі з виділеним блоком, що маскується, вибрати пункт Blocks, то система Matlab виведе довідкову інформацію з вкладки Documentation (рис. 9.9);

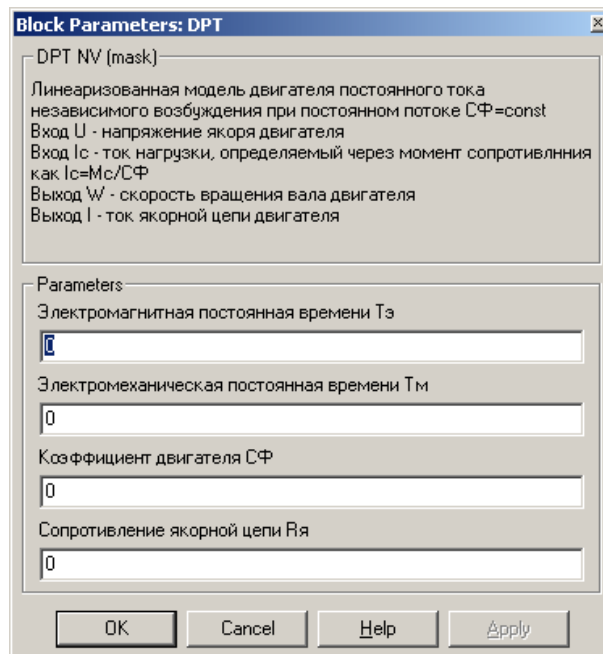


Рисунок 9.8 – Вікно параметрів маскованого блоку після заповнення поля Documentation

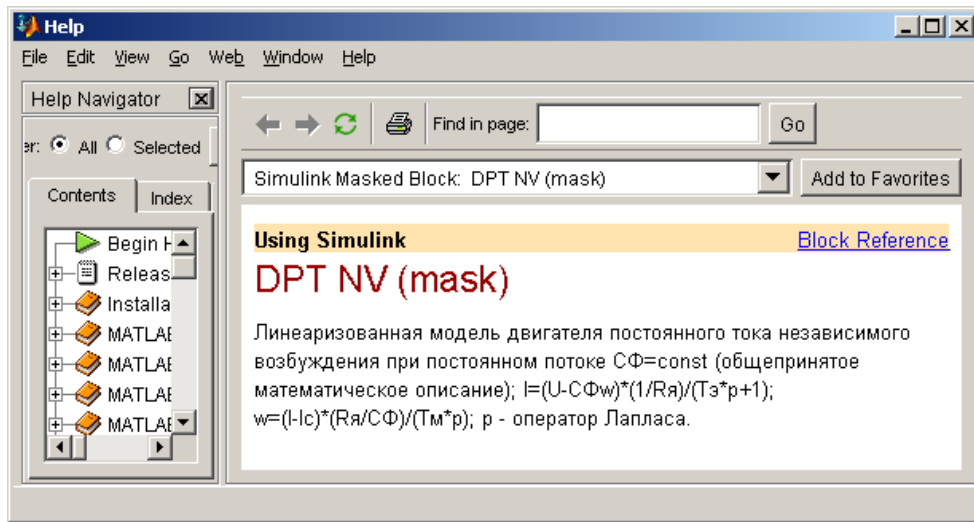


Рисунок 9.9 – Вікно довідкової інформації після заповнення поля Help під час маскування блоку

9) вкладка Icon дає змогу створити піктограму блоку, поле Drawing commands дає змогу вводити як текстові, так і графічні команди створення піктограми. Відзначимо найважливіші команди завдання текстових написів у піктограмах блоків:

`disp ('Текст')` – завдання напису Текст у середині значка;

`text (x, y, 'Текст')` - завдання напису Текст із початком у точці з координатами (x, y);

`fprint ('Текст')` – виведення форматowanego тексту по центру піктограми.

Для створення графічної піктограми блока можуть використовуватися графічні команди Matlab, наприклад, команда `plot`. Послідовність наведених далі команд задає малювання піктограми блока в такому вигляді (рис. 9.10).

Послідовність команд:

```
plot(-80,-80,80,80);
plot([0,9,18,24,29,30,29,24,18,9,0,...
-9,-18,-24,-29,-30,-29,-24,-18,-9,0],...
[30,29,24,18,9,0,-9,-18,-24,-29,-30,...
-29,-24,-18,-9,0,9,18,24,29,30]);
plot([-29,-35,-35,-29],[-8,-8,8,8])
plot([29,35,35,29],[-8,-8,8,8])
```

```
plot([-35,-55],[0,0],[35,55],[0,0]);
```

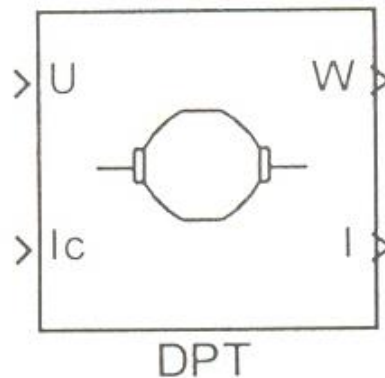


Рисунок 9.10 – Вигляд блоку з піктограмою

Тут перший оператор `plot` задає відносні розміри пікто-грами (в інших операторах координати точок мають бути меншими і розташовуватися всередині заданого поля). Другий оператор `plot` малює якір двигуна у вигляді кола, два наступних – прилеглі до якоря щітки, а останній – відводи від щіток.

З командного вікна Matlab командою `iconedit` можна запустити також найпростіший редактор піктограм. При цьому запитується ім'я моделі та ім'я маскованого блоку, для якого створюється піктограма. Робота з редактором здійснюється за допомогою мишки і трьох команд, що вводяться з клавіатури: `d` – видалення останньої точки, `p` – створення початкової точки для побудови лінії, `q` – вихід з редактора з оновленням піктограми блоку. За допомогою мишки можна переміщати хрестоподібний графічний курсор, а натисканням лівої кнопки миші будувати чергову точку і з'єднувати її з попередньою.

Команда

```
image (imread (ім'я.розширення_файлу, розширення_файлу))
```

дає змогу використовувати готові графічні зображення для створення піктограм блоків. Підтримуються файли таких форматів: PCX, JPG, TIF, BMP;

9) створіть бібліотеку користувача (File→New→Library) і перенесіть у вікно, що відкрилося, створений блок. Дайте найменування новій бібліотеці та збережіть її на диску. Зберігається бібліотека на диску у вигляді файлу з

розширенням mdl (таким самим, як і в моделях Simulink). Після закриття файлу бібліотеки блок у ній блокується і його редагування неможливе без застосування команди Edit→Unlocked.

9.4 Порядок виконання роботи

1. Створіть блок DPT_NV як показано вище. Створіть бібліотеку блоків користувача зі створеним блоком. Створіть модель для дослідження працездатності даного блоку.

2. Введіть параметри блоку відповідно до варіанта (див. таблицю 9.1)

3. Спочатку визначте час розгону двигуна до сталої швидкості при стрибку завдання на напругу живлення в 240В, момент навантаження при цьому задайте нульовим.

4. Сформуйте завдання на напругу живлення машини U_H за допомогою блоку Step, витримку часу задайте рівною 0.1 с.

Тривалість проміжку моделювання підберіть таким чином, щоб тривалість проміжку сталого руху в три-чотири рази перевищувала тривалість перехідних процесів.

5. Сформуйте на вході I_c струм навантаження, що дорівнює I_H , який подається після розгону двигуна до сталої швидкості.

6. Збережіть графіки у файлі звіту перехідних процесів напруги, що подається на якір, ЕРС двигуна, струму якоря, струму статичного, швидкості.

Звіт про виконання роботи повинен містити:

- 1) тему і мету лабораторної роботи;
- 2) порядок виконання лабораторної роботи;
- 3) вихідні дані (значення параметрів машини, значення напруг живлення тощо);
- 4) графіки перехідних процесів;
- 5) схеми моделі на різних етапах виконання роботи.

Таблиця 9.1 – Дані двигунів

Варіант	$U_H, В$	$I_H, А$	$R_{я}, Ом$	$T_E, с$	$T_M, с$	$C\Phi, В\cdot с$
1	440	100	0.062	0.033	0.108	9.70
2	220	120	0.021	0.032	0.099	6.33
3	220	90	0.065	0.027	0.126	7.81
4	440	86	0.057	0.038	0.11	12.8
5	220	135	0.0245	0.027	0.123	3.87
6	440	120	0.0645	0.0354	0.0864	12.5
7	220	100	0.0234	0.034	0.0101	7.93
8	440	136	0.1	0.03	0.099	9.61
9	220	96	0.0132	0.029	0.116	3.92
10	400	110	0.01	0.027	0.22	3.84

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З РЕАКТИВНИМИ СИЛАМИ (МОМЕНТАМИ) ОПОРУ

Мета роботи: Навчання основним прийомам роботи з пакетом програм Simulink при моделюванні систем із розривними характеристиками.

10.1 Теоретичні відомості

Сила (момент) сухого тертя при русі тіл, що труться, одне відносно одного не залежить від швидкості цього руху і завжди спрямована зустрічно руху. Зазначені властивості досить добре описуються математично з використанням сигнум-функції:

$$\begin{aligned} F_{CT} &= F_{TD} \cdot \text{sign}(v), \quad \text{при } v \neq 0, \\ M_{CT} &= M_{TD} \cdot \text{sign}(\omega), \quad \text{при } \omega \neq 0, \end{aligned} \tag{10.1}$$

де F_{TD}, M_{TD} – деякі позитивні величини, що дорівнюють відповідно величині сили і моменту сухого тертя в русі, а v, ω – відповідно швидкості відносного поступального і обертального рухів.

На рисунку 10.1, а представлено механічні характеристики сил (моментів) сухого тертя, створювані, наприклад, механізмами горизонтального переміщення матеріалів, механізмами різання тощо. У загальному випадку механічна характеристика сил (моментів) сухого тертя може мати несиметричний щодо вертикальної осі характер, що характерно, наприклад, для механізму головного руху металорізального верстата.

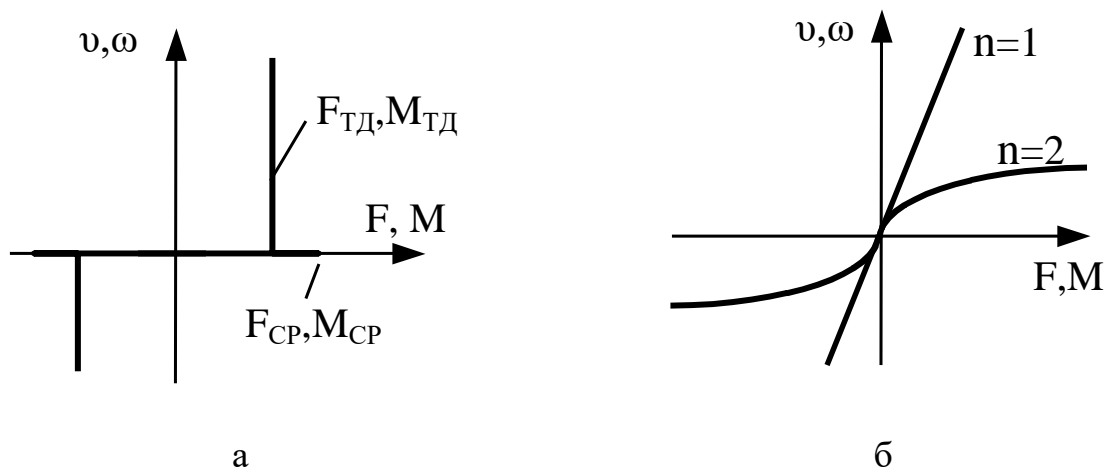


Рисунок 10.1 – Механічна характеристика:

а – сил і моментів сухого тертя; б – сил і моментів в'язкого тертя

Сила (момент) в'язкого внутрішнього тертя виникає в елементі, що деформується, і є прямопропорційною швидкості деформації:

$$\begin{aligned} F_{BT} &= \alpha \cdot (v_1 - v_2), \\ M_{BT} &= \beta \cdot (\omega_1 - \omega_2), \end{aligned} \quad (10.3)$$

де $v_1, \omega_1, v_2, \omega_2$ – швидкості відповідно на вході та виході елемента, що деформується.

Сила (момент) в'язкого зовнішнього тертя виникають у разі руху системи у в'язкому середовищі (гази та рідини) і в загальному випадку може перебувати у складній залежності від швидкості руху:

$$\begin{aligned} F_{BH} &= \alpha \cdot v^n, \\ M_{BH} &= \beta \cdot \omega^n, \quad n > 0. \end{aligned} \quad (10.4)$$

На рис. 10.1, б подано механічні характеристики сил (моментів) в'язкого тертя.

У загальному випадку силу (момент) опору можна уявити як суму сил (моментів) сухого і в'язкого (внутрішнього і зовнішнього) тертя. Таким чином, реактивна сила (момент)

$$\begin{aligned} F_R &= F_{CT} + F_B; \\ M_R &= M_{CT} + M_B. \end{aligned}$$

Відомо, що якщо тіла, що труться, нерухомі одне відносно одного, то застосування зовнішньої рушійної сили $F_{ДВ}$ (рушійного моменту $M_{ДВ}$) до одного з них не викличе відносного руху тіл доти, доки ця рушійна сила (момент) не перевищить за величиною так звану "силу зриву" $F_{СР}$ («момент зриву» $M_{СР}$). У цьому разі сила (момент) сухого тертя вже визначається не величиною і напрямком швидкості, а величиною прикладеної рушійної сили, набуваючи такого значення і напрямку, що повністю компенсується дія цієї зовнішньої сили (моменту):

$$\begin{aligned} F_{СТ} &= F_{ДВ}, \quad \text{если } v = 0 \text{ и } |F_{ДВ}| \leq F_{СР}, \\ M_{СТ} &= M_{ДВ}, \quad \text{если } \omega = 0 \text{ и } |M_{ДВ}| \leq M_{СР}. \end{aligned} \quad (10.2)$$

Основне рівняння руху для випадку поступального та обертального руху записуються таким чином:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{m} \cdot (F_{ДВ} - F_R(v)), \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{j} \cdot (M_{ДВ} - M_R(\omega)) \end{aligned} \quad (10.5)$$

Різниця рушійної сили і сили опору називається динамічною силою. Це саме стосується і моментів. Тобто швидкість змінюється під дією динамічної сили (моменту):

$$\begin{aligned} F_J &= F_{ДВ} - F_R(v); \\ M_J &= M_{ДВ} - M_R(\omega). \end{aligned}$$

Як бачимо, якщо за нерухомої маси, якщо прикладена сила менша за силу "зриву" (виконується умова (10.2)), то динамічна сила дорівнюватиме нулю, і швидкість тіла не змінюватиметься.

10.2 Simulink моделі реактивних моментів і сил опору

До складу бібліотеки Discontinuities пакета SIMULINK входить блок Coulomb & Viscous Friction (Сухе і в'язке тертя), піктограму якого наведено на рис. 10.2. Цей блок є "маскованим". Його внутрішню будову також представлено на рис. 10.2.

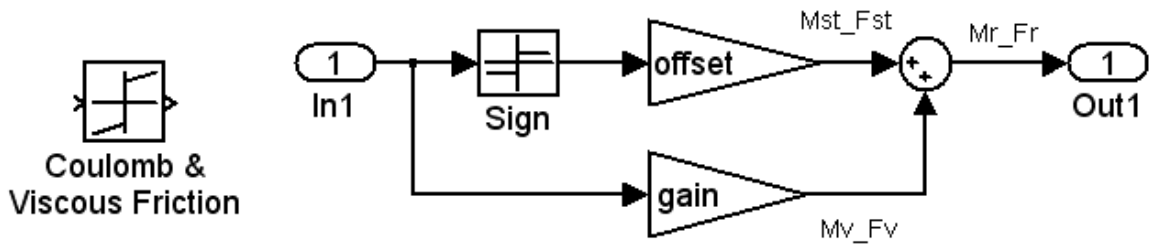


Рисунок 10.2 – Піктограма блоку Coulomb & Viscous Friction і його внутрішня організація

Верхня гілка маскованої моделі блоку Coulomb & Viscous Friction слугує для моделювання сил (моментів) сухого тертя та відповідає рівнянням (10.1), а нижня для моделювання сил (моментів) в'язкого зовнішнього тертя та відповідає рівнянням (10.4) за лінійного характеру залежностей, тобто за умови $n=1$. Коефіцієнт посилення блоку "offset" задається рівним силі (моменту) тертя руху ($F_{ТД}$ або $M_{ТД}$), а коефіцієнт блоку "Gain" задає нахил характеристики в'язкого тертя (α або β).

Як видно з рисунку 10.2, блок Coulomb & Viscous Friction представляє явище сухого тертя в спрощеному вигляді, а саме:

– «сила зриву» F_{CP} або «момент зриву» M_{CP} приймаються рівними силі $F_{ТД}$ або моменту $M_{ТД}$ тертя руху, тобто приймається, що $F_{CP} = F_{ТД}$, $M_{CP} = M_{ТД}$;

– не враховується залежність сили (моменту) сухого тертя за нульової швидкості від рушійної сили або моменту, тобто не враховуються рівняння (10.2).

Якщо перше спрощення є загальноприйнятим і суттєво не впливає на інтегрування рівнянь динаміки механічної системи, то друге обмеження викликає низку складнощів у процесі моделювання. З урахуванням рівнянь руху (10.5) і використовуючи блок Coulomb & Viscous Friction можна отримати модель динаміки механічної системи, що зображена на рис. 10.3.

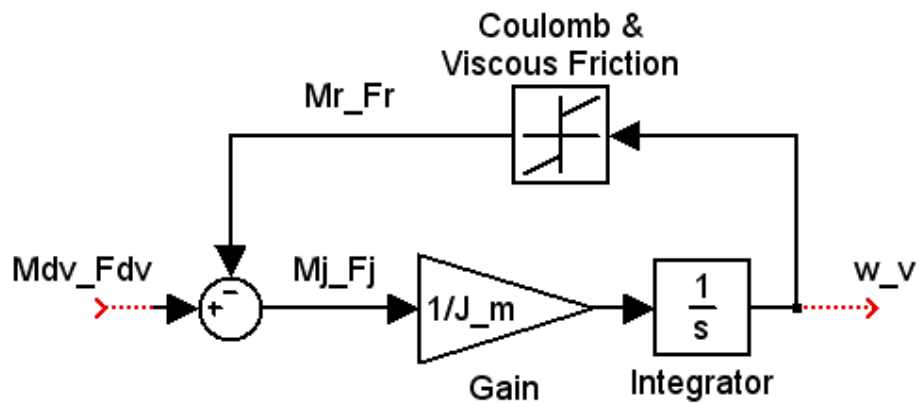


Рисунок 10.3 – Модель динаміки механічної системи з використанням блоку Coulomb & Viscous Friction

Така модель, наприклад, використовується в маскованому блоці машини постійного струму (DC Machine), що входить до бібліотеки Machines пакета SimPowerSystem ToolBox. Можна легко переконатися, що при ненульовому значенні моменту або сили сухого тертя, моделювання можна провести тільки з постійним кроком інтегрування. При виборі змінного кроку інтегрування на ділянках, де рушійна сила виявляється меншою за силу зриву ($F_{ДВ} < F_{СР}$), перетин швидкістю нульового значення призводить ніби до "застигання" процесу моделювання, що зумовлено "нескінченним" дробленням кроку інтегрування. За постійного кроку моделювання здійснити вдається, хоча і з істотними похибками. Модель у цій ситуації перебуває у квазістаціонарному режимі "гойдання" швидкості відносно нульового значення на інтервалі кроку інтегрування, що зумовлено "стрибками" сили сухого тертя між двома крайніми значеннями ($-F_{СР}$ и $F_{СР}$).

Уточнена модель динаміки механічної системи, що працює на подолання реактивних сил опору, представлена на рисунку 10.4.

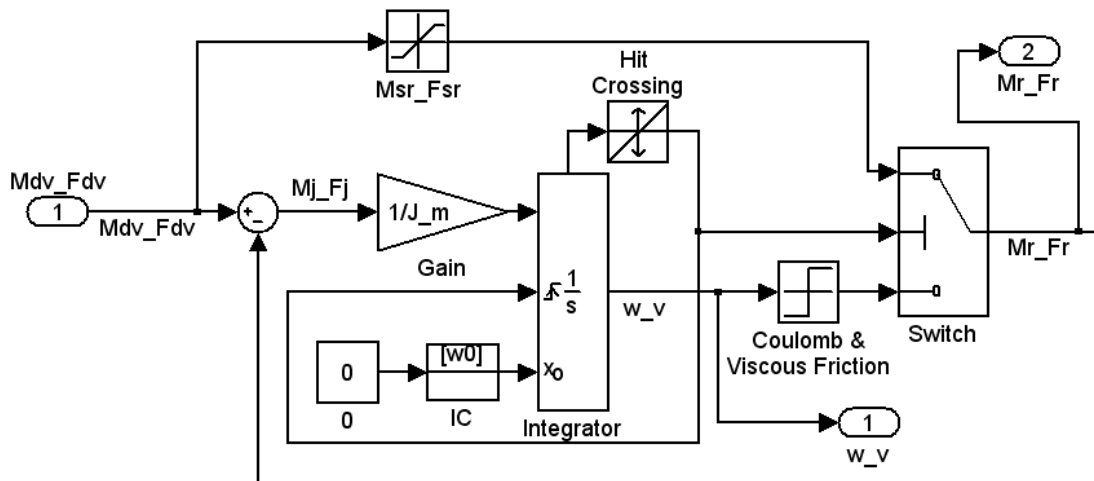


Рисунок 10.4 – Модель руху механічної системи, що перебуває під впливом реактивних сил опору

Схема, представлена на рисунку 10.4, здійснює одноразове інтегрування рівняння (10.5). На вхід схеми подається поточне значення рушійного моменту (сили) M_{dv_Fdv} , а на виході W_V формуються значення швидкості, а на виході M_R_FR реактивний момент (сила) опору.

Основним блоком моделі є Integrator, який здійснює інтегрування сигналу відносного прискорення, що подається на нього, видаючи сигнал, що дорівнює поточному значенню швидкості W_V . Початкові значення швидкості на момент початку моделювання задають у параметрах блоку IC (Initial Conditions), а початкові умови продовження моделювання після переходу через розрив характеристики сухого тертя передають через цей блок із виходу блоку Constant з позначенням 0.

Сигнал узагальненого прискорення формується таким чином. Спочатку на суматорі рушійний момент (сила) M_{dv_Fdv} підсумовується з реактивним моментом (силою) M_R_FR , результат подають на блок Gain, який здійснює ділення сумарного сигналу (динамічного узагальненого моменту або сили) на узагальнений момент інерції J або масу.

Формування реактивного моменту (сили) сухого і в'язкого тертя здійснюється блоками Saturation (M_{SR_FSR}) і Coulomb & Viscous Friction. Якщо

швидкість W_V не дорівнює нулю, то перемикач у блоці Switch перебуває в нижньому положенні, і сигнал узагальненої швидкості W_V проходить через блок Coulomb & Viscous Friction і передається на суматор як реактивний момент (сила) M_{R_FR} . Таким чином, реалізуються рівняння (10.1) і (10.4).

Значно складніше здійснити моделювання рівнянь (10.2). Для цього потрібно якомога точніше визначити момент часу, коли відносна узагальнена швидкість W_V проходить через нуль. Для цього необхідно зробити таке:

1) у блоці інтегратора треба відкрити порт стану (**show state port**) і під'єднати зовнішнє скидання до інтегратора, встановивши **External rising** у положення rising;

2) до порту стану треба під'єднати вхід блоку **Hit Crossing**, який здійснює фіксацію точного моменту часу переходу швидкості через нуль і видає в цей момент часу керівний одиничний сигнал;

3) до виходу блоку **Hit Crossing** слід під'єднати керуючий вхід блоку **Switch** і як поріг перемикання останнього (параметр **Threshold**) потрібно встановити значення 0.5. Крім того, вихід блоку **Hit Crossing** необхідно з'єднати з портом скидання інтегратора.

Сукупність описаних блоків працює таким чином. Якщо значення швидкості W_V не переходить через нуль, вихідний сигнал блоку **Hit Crossing** дорівнює нулю. Він менший за поріг спрацьовування блоку Switch, встановлений у 0.5. Тому здійснюється моделювання рівняння (10.1), як це було описано раніше. Щойно блок **Hit Crossing** фіксує перетин швидкістю W_V нуля, на його виході сигнал стає рівним одиниці, що перевищує поріг спрацьовування ключа **Switch** і перемикає на суматор блок Saturation (M_{SR_FSR}). Одночасно сигнал блоку **Hit Crossing** надходить на вхід скидання блоку інтегратора, за яким останній починає інтегрувати заново з моменту перетинання швидкістю нуля з початковою умовою, встановленою в блоці **Constant** із позначенням 0. Якщо під час подальшого інтегрування значення швидкості W_V залишається рівним нулю, то стан схеми залишається незмінним. Якщо ж величина W_V на якомусь кроці інтегрування моделі набуває значення, відмінне від нуля, блок **Hit Crossing**

скидає значення на своєму виході в нуль і перемикає ключ **Switch**. Після чого знову запрацює гілка, що моделює узагальнену силу тертя руху і в'язкого тертя (**Coulomb & Viscous Friction**).

10.3 Порядок виконання роботи

10.3.1 Проведіть дослідження спрощеної моделі реактивних сил опору, наведеної на рисунку 10.3. Параметри за варіантами наведено в таблиці 10.1.

Дослідження повинні включати:

а) визначення реакції моделі на сигнал, що стрибкоподібно змінюється, вигляд якого наведено на рисунку 10.5, а;

б) визначення реакції моделі на сигнал, що лінійно змінюється, вигляд якого наведено на рисунку 10.5, б.

Таблиця 10.1 – Варіанти завдань

№ варіанта	$M_{ГД}$, Н·м	$M_{СР}$, Н·м	β , Н·м с/рад	J , кг·м ²
1	1	1,1	0,1	2
2	2,5	2,7	0,5	3
3	1,5	1,55	0,3	1
4	3,25	3,4	0,6	5
5	0,5	0,55	0,05	4
6	7,4	7,9	1,1	2
7	6,6	7,2	1,5	3
8	4,3	4,5	0,9	6

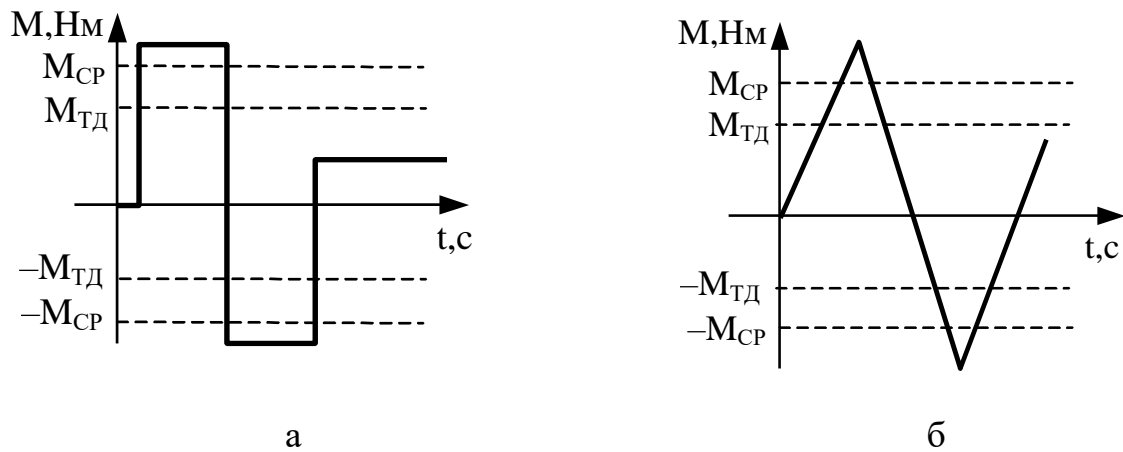


Рисунок 10.5 – Зміна рушійного моменту як вхідного впливу

Необхідно отримати графіки таких залежностей:

а) $W_V(t)$ – перше вікно осцилографа;

$M_{dv_Fdv}(t)$, $M_{R_FR}(t)$, $M_{j_Fj}(t) = (M_{dv_Fdv}(t) - M_{R_FR}(t))$ – у другому вікні того ж осцилографа;

б) W_V в функції M_{R_FR} – використовувати графопобудовник;

в) W_V в функції M_{j_Fj} – використовувати графопобудовник;

10.3.2 На основі моделі, наведеної на рисунку 10.4, створіть блок реактивного моменту (сили) опору.

При створенні маскованого блока слід урахувати, що вікно параметрів цього блока має містити поля для завдання:

- моменту інерції (маси);
- моменту зриву (сили зриву);
- моменту тертя руху (сили тертя руху);
- початкової кутової (лінійної) швидкості,
- коефіцієнта в'язкого тертя.

Наприклад, як це показано на рисунку 10.6.

В описі блока мають бути наведені формули, що описують його роботу.

10.3.3 Збережіть створений блок у бібліотеці користувача. Цей блок буде використовуватися надалі під час дослідження систем електроприводу.

10.3.4 Проведіть аналогічні пункту 10.3.1 дослідження моделі реактивних сил опору, представленої на рисунку 10.4.

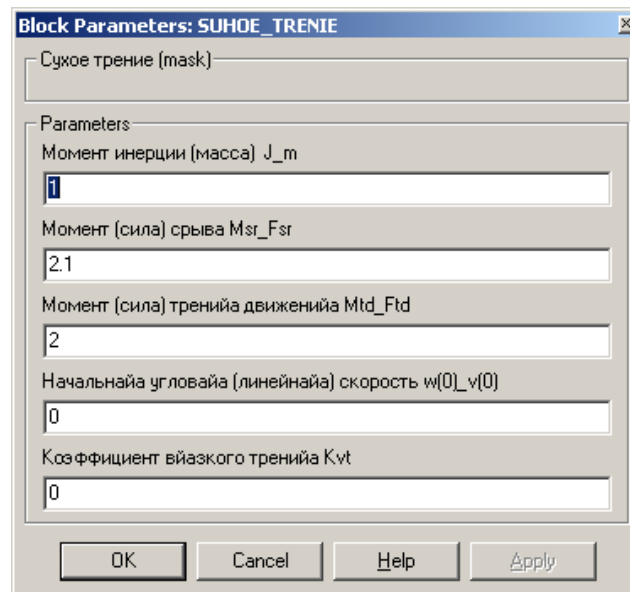


Рисунок 10.6 – Вікно параметрів маскованого блоку "сухе тертя"

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11
ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНИХ
ДИНАМІЧНИХ ЛАНЦЮГАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОДАТКА
SIMPOWERSYSTEMS

Мета роботи: освоєння методики дослідження процесів в електротехнічних системах за допомогою додатка SimPowerSystems системи MATLAB.

11.1 Теоретична підготовка

Схемотехнічне моделювання електричних схем у MATLAB здійснюється блоками додатка SimPowerSystems. Блоки додатка SimPowerSystems згруповані в такі категорії:

- з'єднувачі (Connectors);
- електричні джерела (Electrical Sources);
- пасивні елементи (Elements);
- додаткові блоки (Extra Library);
- електричні машини (Machines);
- електричні датчики (Measurements);
- елементи силової електроніки (Power Electronics).

Модель із використанням блоків цього додатка будується так само, як і під час використання блоків додатка Simulink: на вільне поле нової моделі переносяться необхідні блоки зі стандартної бібліотеки SimPowerSystems.

На відміну від зв'язків між блоками Simulink, де зв'язки являють собою передачу інформаційного сигналу, з'єднання блоків SimPowerSystems слід розглядати як ідеальний дротовий зв'язок, що забезпечує передачу електричного сигналу. Оскільки із застосуванням блоків SimPowerSystems будується Simulink-модель, то на цій моделі існують два типи сигналів – інформаційні (Simulink сигнали, s-сигнали) і силові (Power сигнали, p-сигнали). Особливістю блоків з р-сигналами є те, що блоки мають умовні електричні вхід і вихід. Більшість блоків

SimPowerSystems мають як силові, так і інформаційні входи та виходи. Для коректної побудови моделі необхідно правильно здійснювати "стикування" типів сигналів. У бібліотеці SimPowerSystems є блоки переведення одного типу сигналу в інший:

1) керовані джерела – переводять s-сигнал у р-сигнали. Мають один інформаційний вхід і два силових порти (вхід і вихід). На силових виходах формується напруга (або струм), задані зовнішнім s-сигналом;

2) вимірювачі – переводять р-сигнал в s-сигнал. Фактично це датчики струму і напруги, мають два силових порти (вхід і вихід) і один інформаційний вихід. Застосовуються для виділення електричного сигналу з метою його спостереження Simulink-блоком Scope.

Під час моделювання схеми, згідно із завданням, достатньо використовувати такі блоки:

– джерело постійної напруги: блок DC Voltage Source (бібліотека Electrical Sources). У вікні параметрів блоку задається значення напруги.

– блок для моделювання пасивного елемента (опору, індуктивності, ємності): блок Series RLC Branch (бібліотека Elements). У параметрах блоку задаються значення: активного опору (Ом), індуктивності (Гн), ємності (Ф). Блок є універсальним, і на його основі, задаючи значення відповідних величин, можна "отримати" кожен із пасивних елементів окремо, водночас зображення в піктограмі блоку зміниться автоматично. Параметри для формування з блоку Series RLC Branch окремих елементів наведено в наступній таблиці.

Одиночний елемент	Параметр, що задається в полі		
	Resistance R	Inductance H	Capacitance F
Акт. опір	R (Ом)	0	inf
Індуктивність	0	L (Гн)	inf
Ємність	0	0	C (Ф)

За допомогою цього блоку, задаючи значення у відповідних полях, можна отримати послідовне з'єднання з двох елементів. Однак, при виконанні завдання лабораторної роботи рекомендується використовувати одноелементні блоки, оскільки при цьому є можливість виміряти напругу на кожному елементі окремо.

– датчики струму і напруги: блоки Current Measurement і Voltage Measurement відповідно (бібліотека Measurements).

– для узгодження умовних входів і виходів у силових ланцюгах використовуються блоки-з'єднувачі: T-connector і L-connector (бібліотека Connectors).

– для моделювання ключа використовується блок Ideal Switch (ідеальний перемикач) – категорія Power Electronics. У параметрах блоку задаються такі дані:

1) Internal resistance R_{on} (Ohms) – внутрішній опір. За замовчуванням встановлено 0,01 Ом. Ідеальний ключ, як відомо, має нульовий опір, однак MATLAB не допускає встановлення нульового опору ключа. Тому рекомендується встановити значення на два-три порядки менше за найменший опір, наявний у схемі. Опір ключа, безумовно, впливатиме на процеси і усталені значення, однак з огляду на свою відносну малість цей вплив буде незначним;

2) Initial state (0 for 'open', 1 for 'closed') – початковий стан. У разі якщо в початковому стані ключ розімкнутий (тобто необхідно досліджувати процес при замиканні ключа) – то встановлюємо значення 0. Якщо необхідно досліджувати процес при розмиканні ключа (з початкового замкнутого стану) – встановлюємо значення 1;

3) Snubber resistance R_s (Ohms) – опір снаббера;

4) Snubber capacitance C_s (F) – ємність снаббера.

Снаббер – це послідовний RC-ланцюжок, під'єднаний паралельно контакту, для зниження перенапруг під час його комутації. Необхідність у цьому ланцюжку виникає, якщо в ланцюгах порушується закон комутації - наприклад, розмикання послідовного ланцюга з індуктивністю під час протікання по ньому струму або закорочування зарядженої ємності. Безумовно, снабберний

ланцюжок впливає на динаміку процесів. У прикметах, запропонованих у роботі, закони комутації не порушуються, тому значення в полях опору і ємності снабберного ланцюжка необхідно задати такими, щоб цей ланцюжок був "відсутній". Електричною мовою це інтерпретується як його обрив. Для цього в параметрі Snubber resistance R_s (Ohms) вказується значення inf (нескінченність). Як наслідок, у полі параметра Snubber capacitance C_s (F) може бути вказано будь-яке значення (від 0 до inf) – за фактичного обриву ланцюжка величина ємності значення не має.

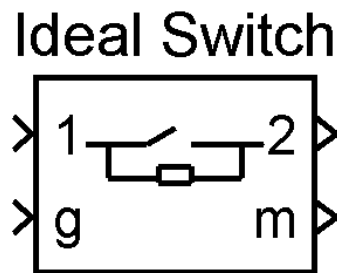


Рисунок 11.1 – Піктограма блоку «ідеальний ключ»

Блок має два входи і два виходи (рис. 11.1):

вхід 1 і вихід 2 – умовні вхід і вихід силового комутованого ланцюга (р-сигнали);

вхід g – s-вхід для підключення сигналу керування від зовнішнього джерела:

1 – замкнути ланцюг, 0 – розімкнути;

вихід m – інформаційний вихід. У вихідному сигналі об'єднані струм, що проходить через ключ, і напруга на ключі. Переглянути ці сигнали окремо можна демультимплексувавши їх блоком demux.

– блоки Simulink для формування керуючих впливів – Step і спостереження процесів – Scope, To workspace.

Вибір кроку та чисельного методу під час моделювання

Під час моделювання структур із блоками SimPowerSystems використовують методи інтегрування зі змінним кроком або дискретні методи з фіксованим кроком. Під час моделювання запропонованої системи

рекомендується застосовувати методи розрахунку зі змінним кроком ode15 або ode23s. Для отримання "гладких" кривих перехідних процесів необхідно обмежити максимальне значення кроку розрахунку. Прийнятне максимальне значення, у нашому випадку, можна підібрати після кількох запусків моделі на розрахунок.

Завдання початкових умов координат стану

Особливістю моделі з блоками SimPowerSystems є те, що MATLAB перед моделюванням прораховує усталені значення струмів і напруг в елементах системи і приймає їх як початкові умови. Наприклад, є модель для дослідження процесу заряду ємності (рис. 11.2, а). У результаті розрахунку отримуємо "нелогічний" результат – незмінну напругу на ємності (рис. 11.2 ,б). Це пов'язано з тим, що сталі значення напруги на ємності, заздалегідь розраховані MATLAB'ом, автоматично використовуються в розрахунку як початкові.

Розв'язати цю ситуацію, у нашому випадку, можна двома способами.

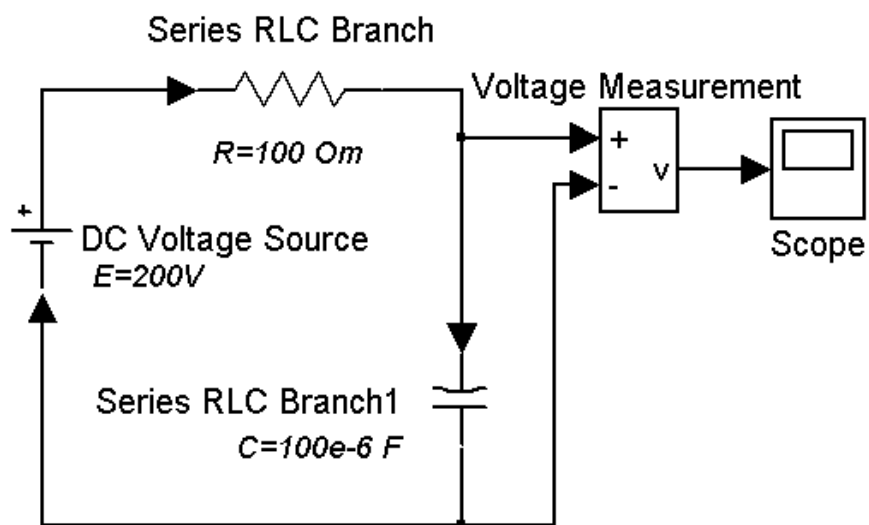
1-й спосіб – використання блоку Ideal Switch (рис. 11.3, а). При заданні його початкового стану як розімкнутий (Initial state – 0) MATLAB розраховує початкове значення напруги на ємності як таке, що дорівнює нулю. Подавши на вхід керування g блоку Ideal Switch сигнал "1", навіть починаючи з нуля часу, отримуємо потрібний перехідний процес (рис. 11.3, б).

2-й спосіб – при цьому ключ не використовується, а початкові значення напруг на ємностях і струмів в індуктивностях схеми задаються примусово. Для того, щоб задати початкові умови (у нашому випадку нульові) потрібно:

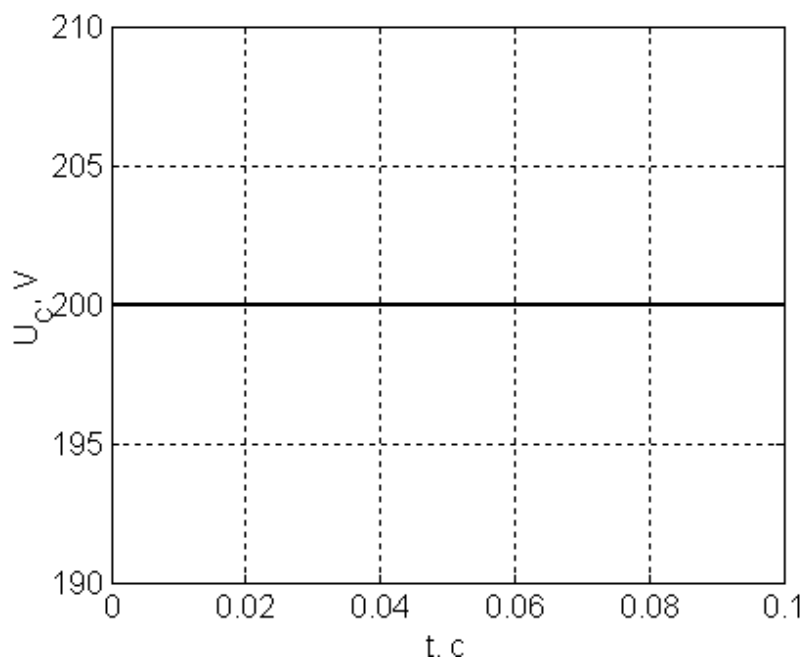
1) встановити на схему блок Powergui. Цей блок знаходиться в кореневій бібліотеці SimPowerSystems;

2) відкрити його, і через меню увійти у вікно завдання початкових значень Initial States Setting (встановлення початкових станів змінних станів, рис. 11.4, б).

3) задати початкові значення струмів в індуктивностях і напруг на ємностях, що відповідають стану схеми до комутації. Зміна виділеної координати відбувається у вікні Set selected state.

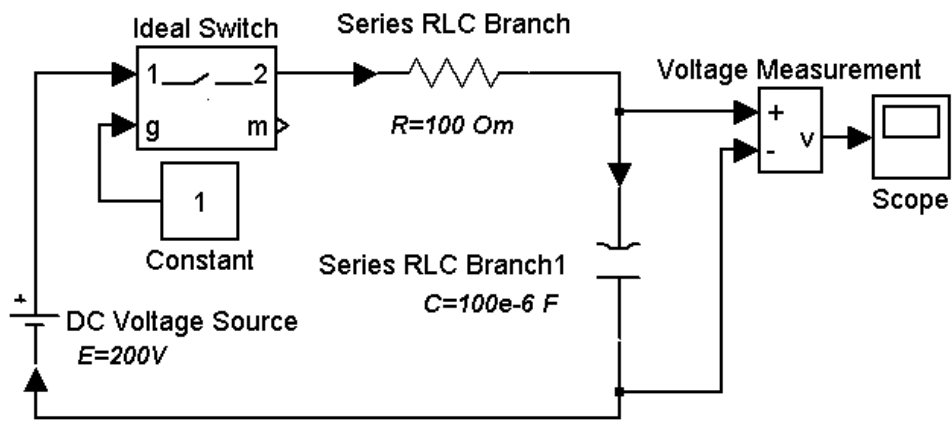


a

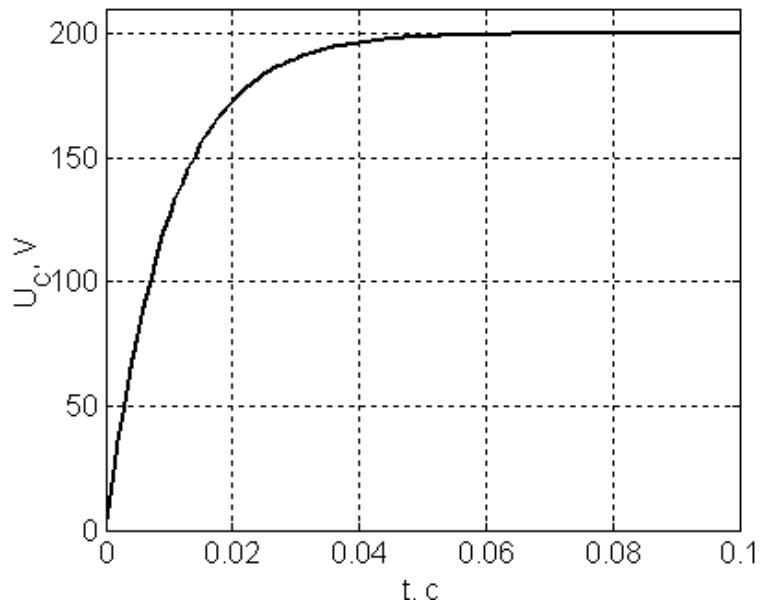


б

Рисунок 11.2 – Приклад некоректного рішення перехідного процесу



a

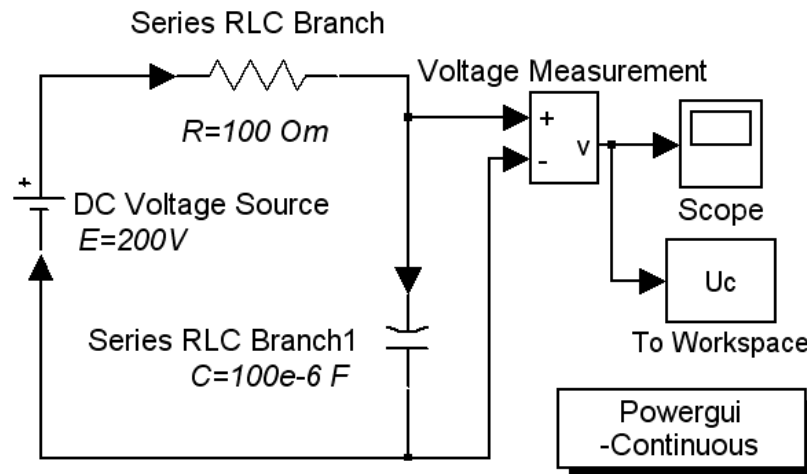


б

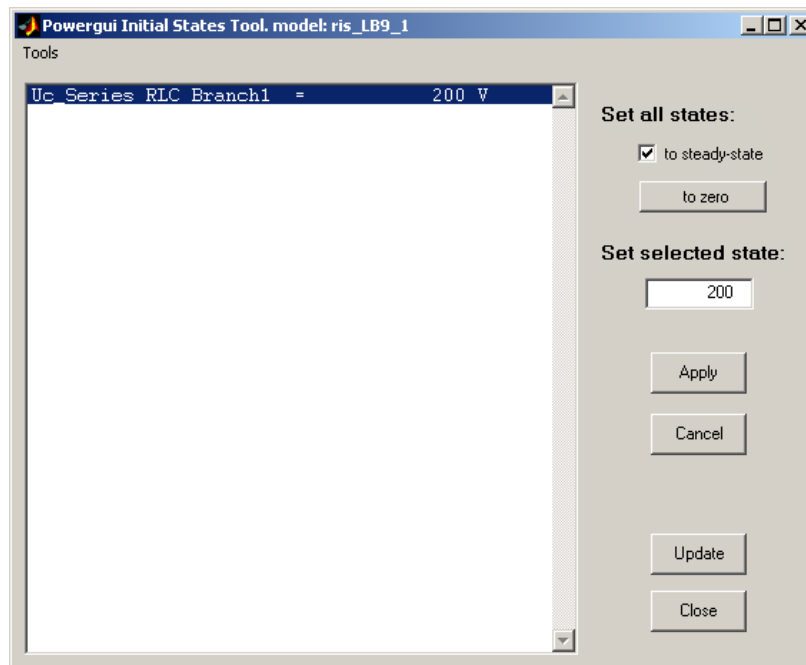
Рисунок 11.3 – Модель с использованием блока Ideal Switch

Отриману модель наведено на рис. 11.4, а. Задаючи початкове значення напруги на ємності рівним 0, отримаємо очікуваний перехідний процес.

Складність цього способу полягає в тому, що перед моделюванням необхідно розрахувати початкові значення координат стану системи. Однак за такого способу задавання початкових умов отримуємо точніші процеси, оскільки відпадає необхідність у застосуванні блока Ideal Switch, який впливає на динаміку системи.



a



б

Рисунок 11.4 – Модель з використанням блоку Powergui

11.2 Порядок виконання роботи

1. Створіть дві моделі для розрахунку перехідних процесів у схемі, наведеній на рис. 11.5 (з використанням блоків Ideal Switch і Powergui). Значення опорів, індуктивностей, ємностей і напруги джерела живлення прийміть відповідно до варіанта (табл. 11.1).

2. Розрахуйте початкові та кінцеві значення струмів в індуктивностях і напруги на ємностях.

3. Отримайте графіки перехідних процесів координат стану ($iL1$, $iL2$, uC) у двох моделях. Порівняйте результати.

4. Звіт з лабораторної роботи має містити:

- схему електричну принципову досліджуваної системи;
- розрахунок початкових і кінцевих значень основних координат;
- дві моделі досліджуваної системи;
- графіки перехідних процесів, отримані в одній та іншій моделі;
- висновки про виконану роботу.

Таблиця 11.1 - Параметри досліджуваної схеми

№ вар.	Е, В	R1, Ом	L1, мГн	R2, Ом	L2, мГн	R3, Ом	C1, мкФ	Ключ К
1	100	3	10	6	20	1	100	замикається
2	50	5	50	2,5	20	1	200	розмикається
3	20	2	10	4	10	0,5	150	замикається
4	80	4	15	1	10	0,5	250	розмикається
5	60	1	25	3	10	0,3	150	замикається
6	30	3	10	3	15	0,4	200	розмикається
7	100	10	30	2	20	0,6	250	замикається
8	120	6	40	12	30	1	200	розмикається
9	75	3	30	6	40	0,2	200	замикається
10	40	2	50	6	30	0,4	300	розмикається
11	50	2	10	1	10	1	100	замикається
12	25	2	20	2	10	1	150	розмикається
13	30	4	10	2	15	0,5	150	замикається
14	100	1	10	3	25	2	350	розмикається
15	60	3	10	3	20	1,5	200	замикається

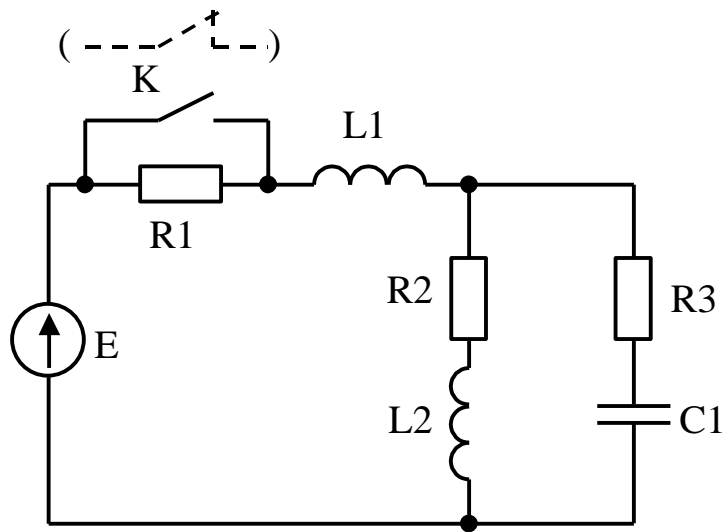


Рисунок 11.5 – Схема досліджуваного електричного кола

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гасв Є.О., Нестеренко Б.М. Універсальний математичний пакет MATLAB і типові задачі обчислювальної математики. Навчальний посібник.– К.: НАУ, 2004. – 176 с.
2. Ильин С.П. Вариационное исчисление с применением MATLAB. – Харьков: ХПИ, 2001. – 107 с.
3. Лазарєв Ю.Ф. Початки програмування в середовищі MATLAB. Навч. посібник. – К.: “Політехніка”, 2000. – 396 с.
4. Проведение математических расчетов с использованием системы MATLAB. Метод. пособие. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – 56 с.
5. Вірченко Н.О., Ляшко І.І. Графіки елементарних та спеціальних функцій. – К.: Наук. думка, 1996. – 582 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Елементарні математичні функції, які використовуються в MATLAB

abs(X)	повертає абсолютну величину для кожного числового елемента вектора X. Якщо X містить комплексні числа, abs(X) обчислює модуль кожного числа
<p>Тригонометричні функції</p> <p>Функції обчислюються для кожного елемента масиву. Вхідний масив допускає комплексні значення. Усі кути у функціях задаються в радіанах</p>	
sin(X)	Синус числа X. Якщо X - вектор, то повертає синус для кожного елемента X. X задається в радіанах.
Asin(X)	Арксинус для кожного елемента X. Для дійсних значень X в області [-1, 1] asin(X) повертає дійсне число з діапазону $[-\pi/2, \pi/2]$, для дійсних значень X поза областю [-1, 1] asin(X) повертає комплексне число
cos(X)	Косинус
acos (X)	Арккосинус. Для дійсних значень X в області [-1, 1] acos(X) повертає дійсне значення з діапазону $[0, \pi]$, для дійсних значень X поза областю [-1, 1] acos(X) повертає комплексне число.
tan(X)	Тангенс
atan(X)	Арктангенс (в діапазоні от $-\pi/2$ до $\pi/2$)
atan2(X,Y)	Чотирьох квадрантний арктангенс
cot(X)	Котангенс
acot(X)	Арккотангенс
sec(X)	Секанс
asec(X)	Арксеканс
csc(X)	Косеканс
acsc(X)	Арккосеканс
<p>Гіперболічні та обернені їм функції</p> <p>Функції обчислюються для кожного елемента масиву.</p> <p>Вхідний масив допускає комплексні значення.</p> <p>Усі кути в тригонометричних функціях вимірюються в радіанах</p>	
sinh(X)	гіперболічний синус
cosh(X)	гіперболічний косинус
tanh(X)	гіперболічний тангенс
coth(X)	гіперболічний котангенс

sech(X)	гіперболічний секанс
csch(x)	гіперболічний косеканс
asinh(X)	гіперболічний арксинус
acosh(X)	гіперболічний арккосинус
atanh(X)	гіперболічний арктангенс
acoth(X)	гіперболічний арккотангенс
asech(X)	гіперболічний арксеканс
acsch(X)	гіперболічний арккосеканс
Експоненціальні функції	
exp(X)	Експонента числа X. Для комплексного числа $z = x + i*y$ функція $\exp(z)$ обчислює комплексну експоненту: $\exp(z) = \exp(x) * (\cos(y) + i * \sin(y))$
log (X)	Натуральний логарифм числа X. Для комплексного або від'ємного z , де $z = x + y*i$, обчислюється комплексний логарифм у вигляді $\log(z) = \log(\text{abs}(z)) + i * \text{atan2}(y, x)$.
log10(X)	Логарифм за основою 10 для числа X. Область функції включає комплексні числа.
sqrt(A)	повертає квадратний корінь кожного елемента масиву X. Для від'ємних і комплексних елементів X функція sqrt(X) обчислює комплексний результат
Функції комплексного аргумента	
real(Z)	Дійсна частина комплексного аргументу
imag(Z)	Уявна частина комплексного аргументу
angle(Z)	Обчислює значення аргументу комплексного числа Z у діапазоні від $-\pi$ до π
conj(Z)	Повертає число, комплексно-спряжене аргументу Z. Якщо Z комплексне, то $\text{conj}(Z) = \text{real}(Z) - i * \text{imag}(Z)$

Таблиця А.2 – Список TeX-символів

Рядок опис	СИМВОЛ	Рядок опис	СИМВОЛ	Рядок опис	СИМВОЛ
<code>\alpha</code>	α	<code>\upsilon</code>	υ	<code>\sim</code>	\sim
<code>\beta</code>	β	<code>\phi</code>	ϕ	<code>\leq</code>	\leq
<code>\gamma</code>	γ	<code>\chi</code>	χ	<code>\infty</code>	∞
<code>\delta</code>	δ	<code>\psi</code>	ψ	<code>\clubsuit</code>	\clubsuit
<code>\epsilon</code>	ϵ	<code>\omega</code>	ω	<code>\diamondsuit</code>	\diamondsuit
<code>\zeta</code>	ζ	<code>\Gamma</code>	Γ	<code>\heartsuit</code>	\heartsuit
<code>\eta</code>	η	<code>\Delta</code>	Δ	<code>\spadesuit</code>	\spadesuit
<code>\theta</code>	θ	<code>\Theta</code>	Θ	<code>\leftrightarrow</code>	\leftrightarrow
<code>\vartheta</code>	ϑ	<code>\Lambda</code>	Λ	<code>\leftarrow</code>	\leftarrow
<code>\iota</code>	ι	<code>\Xi</code>	Ξ	<code>\uparrow</code>	\uparrow
<code>\kappa</code>	κ	<code>\Pi</code>	Π	<code>\rightarrow</code>	\rightarrow
<code>\lambda</code>	λ	<code>\Sigma</code>	Σ	<code>\downarrow</code>	\downarrow
<code>\mu</code>	μ	<code>\Upsilon</code>	Υ	<code>\circ</code>	\circ
<code>\nu</code>	ν	<code>\Phi</code>	Φ	<code>\pm</code>	\pm
<code>\xi</code>	ξ	<code>\Psi</code>	Ψ	<code>\geq</code>	\geq
<code>\pi</code>	π	<code>\Omega</code>	Ω	<code>\propto</code>	\propto
<code>\rho</code>	ρ	<code>\forall</code>	\forall	<code>\partial</code>	∂
<code>\sigma</code>	σ	<code>\exists</code>	\exists	<code>\bullet</code>	\bullet
<code>\varsigma</code>	ς	<code>\ni</code>	\ni	<code>\div</code>	\div
<code>\tau</code>	τ	<code>\cong</code>	\cong	<code>\neq</code>	\neq
<code>\equiv</code>	\equiv	<code>\approx</code>	\approx	<code>\aleph</code>	\aleph
<code>\Im</code>	\Im	<code>\Re</code>	\Re	<code>\wp</code>	\wp
<code>\otimes</code>	\otimes	<code>\oplus</code>	\oplus	<code>\oslash</code>	\oslash
<code>\cap</code>	\cap	<code>\cup</code>	\cup	<code>\supseteq</code>	\supseteq
<code>\supset</code>	\supset	<code>\subseteq</code>	\subseteq	<code>\subset</code>	\subset
<code>\int</code>	\int	<code>\in</code>	\in	<code>\circ</code>	\circ
<code>\rfloor</code>	\rfloor	<code>\lceil</code>	\lceil	<code>\nabla</code>	∇
<code>\lfloor</code>	\lfloor	<code>\cdot</code>	\cdot	<code>\ldots</code>	\ldots
<code>\perp</code>	\perp	<code>\neg</code>	\neg	<code>\prime</code>	\prime
<code>\wedge</code>	\wedge	<code>\times</code>	\times	<code>\emptyset</code>	\emptyset
<code>\rceil</code>	\rceil	<code>\surd</code>	\surd	<code>\mid</code>	\mid
<code>\vee</code>	\vee	<code>\varpi</code>	ϖ	<code>\copyright</code>	\copyright
<code>\langle</code>	\langle	<code>\rangle</code>	\rangle		

Таблиця А.3 – Кодування типів маркерів на лініях графіків

Знак	Опис		Примітки
+	plus sign	Плюс	
o	circle	Окружність	
*	asterisk	Сніжинка	
.	point	Крапка	Круг
x	cross	Хрест	
s	square	Квадрат	
d	diamond	«Діамант»	◇
^	upward pointing triangle	Трикутник із відповідним поворотом вершини	▲
v	downward pointing triangle		▼
>	right pointing triangle		►
<	left pointing triangle		◄
p	five-pointed star	П'ятикутна зірка	
h	six-pointed star	Шестикутна зірка	
none	no marker (default)		

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

з дисципліни

«МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ»

Частина III

(для здобувачів вищої освіти спеціальностей 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка», 184 «Гірництво»
та для здобувачів спеціальності 263 «Цивільна безпека»
третього наукового рівня вищої освіти)
(електронне видання)

Укладачі:

Є. С. РУДНЄВ

Ю. А. РОМАНЧЕНКО

Оригінал-макет *Ю.А. Романченко*

Підписано до друку 29.02.2024.

Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. ____ . Обл.-вид. арк. ____ .

Наклад ____ прим. Вид. № ____ . Замов. № ____ . Безкоштовно.

**Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля**

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.
Адреса видавництва: 01042, м. Київ, вул. Іоанна Павла II, 17
адреса електронної пошти uni@snu.edu.ua,
офіційний web-сайт <https://snu.edu.ua>
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com