

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**С. М. ВОЛЯНСЬКИЙ, Г. С. ГРУДІНА,
Я. Б. ВОЛЯНСЬКА**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ»
Частина 1

Миколаїв, 2024

Волянський С. М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» / С. М. Волянський, Г. С. Грудініна, Я. Б. Волянська. – Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова, 2024. – 29 с.

Методичні вказівки обговорено і затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів (протокол № 11 від 25 червня 2024 р.).

Методичні вказівки рекомендовано для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електромеханіка та електроенергетика», спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, галузь знань 14 – Електрична інженерія.

Рецензент: професор, д. т. н., професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія» Онищенко О. А.

Рекомендовано методичною радою Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки (протокол № 01 від 27 серпня 2024 р.).

Рекомендовано Навчально-методичною радою НУК імені адмірала Макарова (протокол № 6 від 28 серпня 2024 р.).

© С. М. Волянський, Г. С. Грудініна,
Я. Б. Волянська, 2024

© Національний університет кораблебуду-
вання імені адмірала Макарова, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 1 Вивчення базових принципів моделювання з використанням <i>Simulink</i>	5
Лабораторна робота № 2 Вирішення систем алгебраїчних рівнянь в системі <i>Simulink</i>	10
Лабораторна робота № 3 Розв’язання диференціальних та алгебраїчних рівнянь засобами <i>Simulink</i>	13
Лабораторна робота № 4 Моделювання механічної системи засобами <i>Simulink</i>	16
Лабораторна робота № 5 Дослідження динамічних характеристик двигуна постійного струму з незалежним збудженням	21
Лабораторна робота № 6 Побудова моделей кінематичних схем електроприводу	24
Список використаної літератури	28

ВСТУП

Курс лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», галузь знань 14 – «Електрична інженерія». Послідовність виконання лабораторних робіт визначається робочою програмою дисципліни.

В методичних вказівках описано вимоги до виконання лабораторних робіт з дисципліни та оформлення звітів, представлено короткі теоретичні відомості з використання бібліотеки *Simulink* для моделювання роботи електромеханічних систем.

Завдання для лабораторних робіт розроблено таким чином, що б здобувач поступово опановував функціональні можливості представлених в *Simulink* бібліотек і створював більш складні системи на основі придбаного досвіду моделювання. Наведено рекомендовану послідовність дій при виконанні лабораторних робіт. При оформленні звіту до роботи здобувачі повинні дотримуватись норм ДСТУ.

Загальні вимоги до виконання робіт

Перед виконанням лабораторних робіт здобувачі проходять інструктаж та розподіляються по робочих місцях з ПЕОМ. Здобувачі зобов'язані знати і виконувати правила техніки безпеки і правила внутрішнього розпорядку в навчальних лабораторіях кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів.

Початкові дані для виконання кожної роботи видаються викладачем. До роботи допускаються тільки теоретично підготовлені здобувачі. Звіти по лабораторних роботах можуть бути представлені як в паперовому, так і в електронному виді.

Структура звіту лабораторної роботи включає:

- 1 – номер лабораторної роботи;
- 2 – назву теми;
- 3 – мету роботи;
- 4 – короткий опис об'єкту дослідження;
- 5 – схему експерименту;
- 6 – дані експерименту;
- 7 – результати обробки даних;
- 8 – висновки.

Лабораторні роботи виконуються на ПЕОМ в середовищі *MatLab* за допомогою *Simulink* та відповідних тулбоксів.

Лабораторна робота № 1

Вивчення базових принципів моделювання з використанням *Simulink*

Мета роботи: придбання практичних навичок створення математичних моделей з використанням *Simulink*.

Завдання:

1. Ознайомитись з інтерфейсом *MatLab* та додатку *Simulink* самостійно, використовуючи теоретичні відомості (див. нижче), додаткову літературу [1–3] та *Simulink_tutorial*. Вивчити основні прийоми роботи та збереження робочих файлів.

2. Дослідити роботу блоків з бібліотеки *Sources: Clock, Pulse Generator, Ramp, Sine Wave, Step, Signal Generator*. При цьому треба змінювати параметри блоків та спостерігати результат за допомогою блоку *Scope* бібліотеки *Sinks*.

3. Дослідити роботу блоків з бібліотеки *Continuous: Derivative, Integrator, Transferfcn; Discrete: Delay, Memory; Math operation: Add, Gain, Product, Sum, Trigonometric function*. При цьому треба змінювати параметри блоків та спостерігати результат за допомогою використання блоків *Scope* та *XY-Grath* бібліотеки *Sinks* та використовувати сигнали блоку *Sine Wave* з бібліотеки *Sources*.

4. Провести вказані вище дослідження, зробити висновки по роботі оформити звіт.

Рекомендована послідовність дій. Початок роботи у *Simulink*

1. Загальна характеристика *Simulink*

Програма *Simulink*, яка входить до середовища *MatLab*, використовує принцип візуального програмування. Користувач створює модель пристрою на екрані, використовуючи бібліотеку стандартних блоків, та виконує розрахунки. На відміну від традиційних методів моделювання, користувачеві не потрібно докладно вивчати мову програмування чи математичні методи. Достатньо загальних навичок роботи на комп'ютері та знань у сфері, з якою він працює.

Використовуючи *Simulink*, користувач може вдосконалювати існуючі блоки бібліотеки, створювати власні блоки і навіть формувати нові бібліотеки блоків.

2. Запуск Simulink

Для запуску програми необхідно спочатку запустити *MatLab*. Інтерфейс пакета *MatLab* показано на рис. 1.1. Для подальшої роботи необхідно вказати адресу зберігання робочих файлів в командній строчці програми. Адреса повинна бути прописана латинськими буквами. Далі, на панелі інструментів натиснути на ярлик *Simulink*.

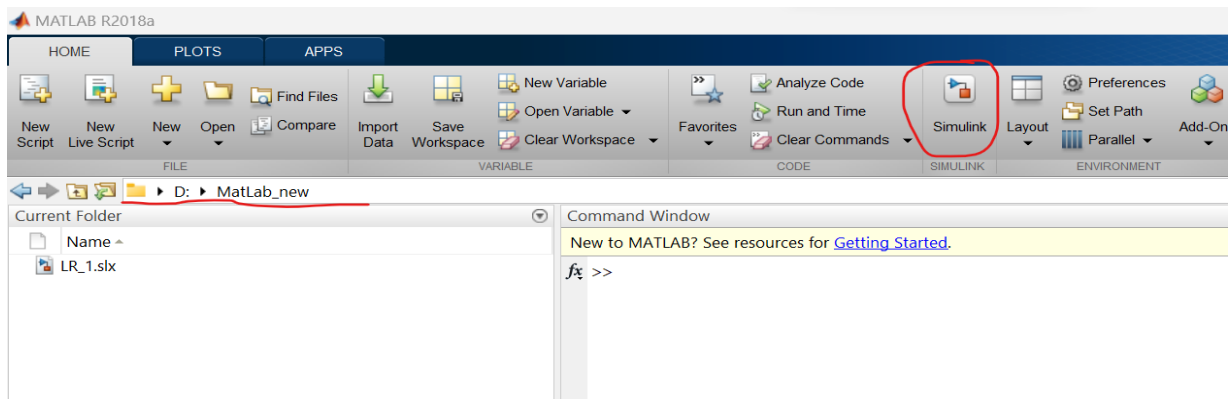


Рисунок 1.1 – Головний інтерфейс програми *MatLab*

Для створення нової моделі, в діалоговому вікні необхідно обрати *Blank model* – відкриється робоча форма (рис.1.2) (вікно моделі), що призначена для створення і імітації роботи власної моделі. Наполеглива рекомендація одразу зберегти її у призначену папку під оригінальною назвою, приклад: D:\MatLab_new, LR_1.

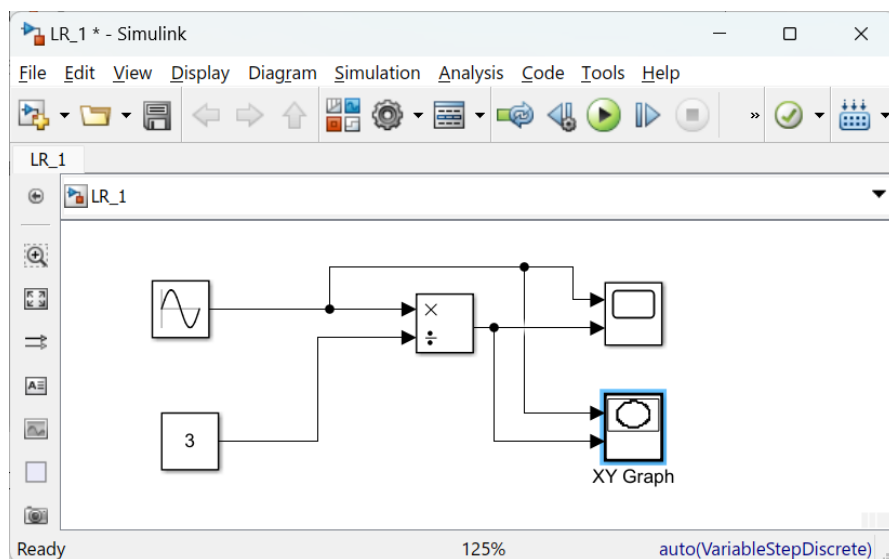


Рисунок 1.2 – Робоча форма *Simulink* зі створеною моделлю

Натиснувши на панелі задач кнопку  відкриється каталог бібліотек Simulink для створення моделей.

3. Каталог розділів бібліотеки *Simulink*

Вікно каталогу бібліотеки містить форму для пошуку необхідного елемента (за назвою), кнопку для створення нової робочої форми *Simulink*, провідник для обрання вже створеної форми (рис. 1.3).

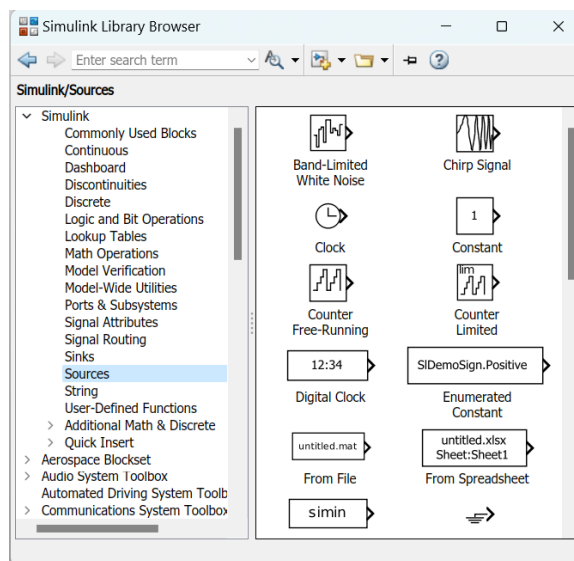


Рисунок 1.3 – Вікно каталогу бібліотеки *Simulink*

В залежності від версії *MatLab*, що використовується бібліотека *Simulink* може містити різну кількість елементів, але всі їх можна умовно поділити за призначенням на чотири частини:

- розділи, що містять джерела сигналів – *Sources...*;
- розділи, що містять блоки для перетворення сигналів – *Continuous, Discrete, Math operations...*;
- розділи з блоками для комутації сигналів – *Signal routing...*;
- розділ з блоками для реєстрації отриманого результату – *Sinks...*

При виборі певного розділу бібліотеки в правій частині вікна відображається його зміст (див. рис. 1.3).

Для створення моделі необхідно розташувати блоки у вікні робочої форми у необхідній послідовності з'єднавши їх лініями зв'язку (див. рис. 1.2).

Для цього треба відкрити відповідний розділ бібліотеки (наприклад, *Sources* – джерела). Далі, вказавши курсором на потрібний блок натиснути на ліву клавішу «миші» і перетягнути блок у вікно робочої форми. Для зручного обертання блоків на формі використовуйте Ctrl + R.

Якщо треба змінити параметри блоку, то треба двічі клацнути лівою клавішею «миші», вказавши курсором на зображенні блоку. Відкриється вікно редагування параметрів даного блоку. Після внесення змін треба закрити вікно кнопкою OK. На рис. 1.4, як приклад, показано блок *Gain* та вікно редагування його параметрів.

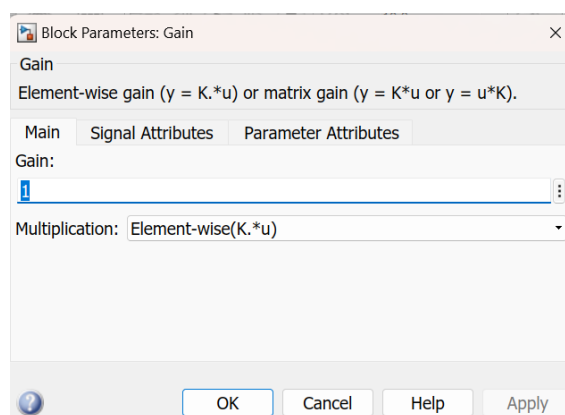


Рисунок 1.4 – Налаштування параметрів блоку *Gain* з каталогу *Math operations*

4. Початок моделювання

Імітація роботи зібраної моделі відбувається з використанням робочої форми та панелі приладів на ній (рис. 1.5).

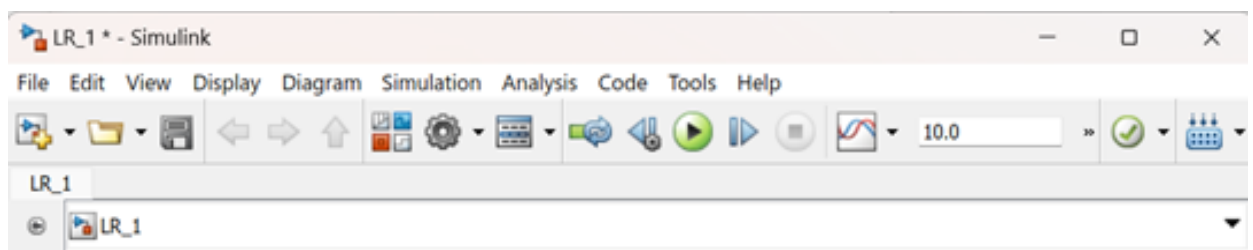


Рисунок 1.5 – Панель приладів робочої форми

Основні елементи панелі приладів поділені на частини:

 – дії з робочою формою: створення нової робочої форми; відкриття існуючої робочої форми; збереження відкритої робочої форми.



– кнопки для маніпуляцій з вікнами самостійно створених підсистем, що відкриваються в окремих робочих формах.



– кнопки для відкриття бібліотеки та налаштування параметрів моделювання і збереження отриманих результатів.



– запуск та контроль моделювання.



– інспектор даних моделювання, встановлення часу тривалості моделювання. Час моделювання обирається користувачем самостійно виходячи з вимог наглядного дослідження отриманих графіків.

5. Реєстрація результатів моделювання

Для побудови графічної залежності досліджуваної величини від часу моделювання використовується блок *Scope*. При цьому, під час дослідження, наприклад електричного ланцюга, зручно будувати діаграму струму та напруги в одному вікні (рис. 1.6), розташувавши їх один під одним. Кількість вхідних сигналів встановлюється у вікні *Number of input ports*, форма розташування у вікні *Layout*.

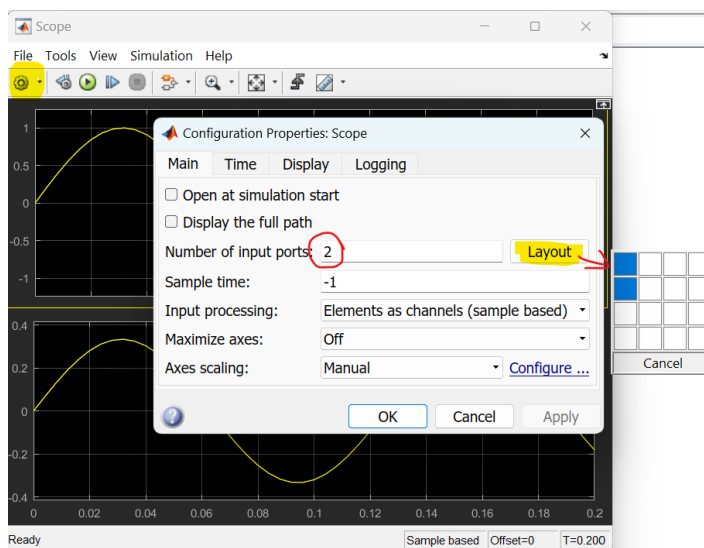


Рисунок 1.6 – Налаштування параметрів блоку *Scope*

Для отримання залежності однієї досліджуваної величини від другої використовується блок *XY Graf* (див. рис. 1.2). До відповідних входів на блоці (XY) підводяться сигнали, що досліджуються, значення яких використовується у якості

осі абсцис і ординат. У вікні параметрів блоку необхідно встановити мінімальне та максимальне значення вхідних сигналів (рис. 1.7). Таким чином можна обмежити ділянку для побудови графіка.

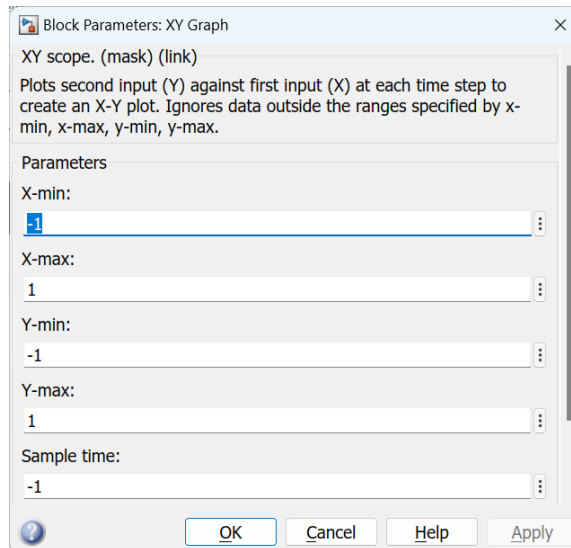


Рисунок 1.7 – Налаштування параметрів блоку *XY Graf*

Слід звернути увагу на те, що при використанні блоку *Scope* для дослідження електричних параметрів (струму або напруги чи ін.) слід використовувати відповідні вимірювальні пристрої. Лінії зв'язку від електричного кола до блоку *Scope* на пряму не приєднуються.

Зміст звіту:

- титульний аркуш;
- тема, мета, завдання;
- хід роботи (включає скріншоти зібраних схем та графіків);
- висновки по роботі, що за змістом містять аналіз отриманих результатів.

Лабораторна робота № 2

Вирішення систем алгебраїчних рівнянь в системі Simulink

Мета роботи: придбання практичних навичок використання *Simulink* для побудови графічної залежності та рішення систем алгебраїчних рівнянь.

Завдання:

1. Побудувати графік функції представленої в табл. 2.1, використовуючи блоки з бібліотеки *Simulink*. Результат представити у вигляді графічної залежності.
2. Знайти рішення системи лінійних рівнянь (табл. 2.2).
3. Знайти рішення системи нелінійних рівнянь (табл. 2.3).
4. Вирішити рівняння, відповідно до варіанту (табл. 2.4), за допомогою *Simulink* самостійно. Завдання обов'язкове на оцінку відмінно.

Вихідні дані до роботи

Для виконання даної роботи необхідно виконати наступні налаштування, рис. 2.1.

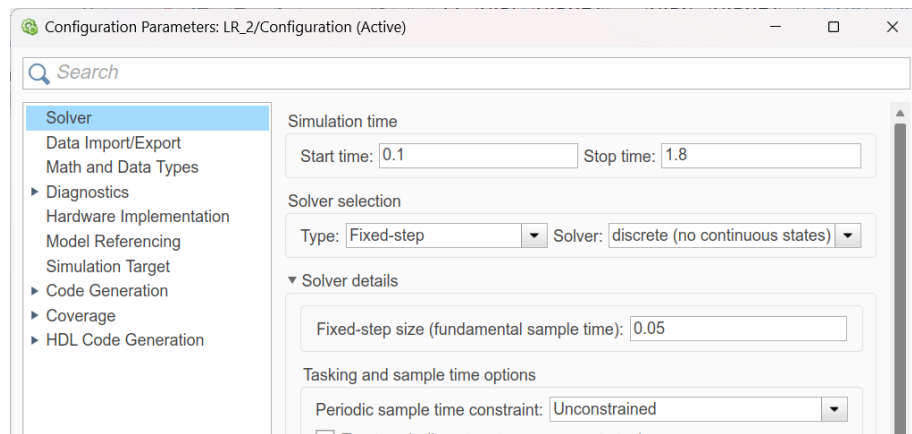


Рисунок 2.1 – Вікно налаштування параметрів моделювання

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до завдання 1

Вар. 1. Непарний номер за списком	Вар. 2. Парний номер за списком
$f(x) = \frac{\arccos x^{0.5}}{2} - \frac{3 \cdot \operatorname{arcsinh} x}{5}$	$f(x) = \frac{\ln x^{1.34+x} + \operatorname{tg} x}{7}$

Таблиця 2.2 – Вихідні данні до завдання 2

Варіант 1. Непарний номер за списком	Варіант 2. Парний номер за списком
$\begin{cases} 2x + 9y - 4z = 0 \\ 2x - 5y + 3z + 1 = 0 \\ \frac{x}{3} + 6y - 0.5z = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0.07x + 0.01y - 0.04z = 0 \\ 0.6x + 4.3y - 2.2z - 1 = 0 \\ 2x - y - z - 4 = 0 \end{cases}$

Таблиця 2.3 – Вихідні данні до завдання 3.

Варіант 1. Непарний номер за списком	Варіант 2. Парний номер за списком
$\begin{cases} e^x - y + 2z = 0 \\ e^{-x} - tg^2y - z - 3 = 0 \\ x + \sqrt{y} + 2.2z + 1 = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 2\cos x - 3tgy - 2 = 0 \\ 2\cos y - 3tgz - 1.5 = 0 \\ 2\cos z - 3tgx + 4 = 0 \end{cases}$

Таблиця 2.4 – Вихідні дані до завдання 4

Номер варіанта відповідає порядковому номеру за списком групи, 11 номер виконує 1 варіант і т. д.		
1	2	3
$\begin{cases} \lg(x-3) - \lg(5-y) = 0 \\ 4^{-1} \cdot \sqrt[3]{4^x} - 8 \cdot \sqrt[3]{4^y} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} x^2 + x \cdot \sqrt[3]{xy} = 32 \\ y^2 + y \cdot \sqrt[3]{x^2y} = 162 \end{cases}$	$\begin{cases} 2^{\cos x} + 2^{\cos^{-1}y} = 5 \\ 2^{\cos x} \cdot 2^{\cos^{-1}y} = 4 \end{cases}$
4	5	6
$\begin{cases} (2^{x+y})^{x^2+xy-8} = 1 \\ (0.37^{x-y})^{x^2+xy+2x-16} = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \sqrt{\frac{x}{y}} + \sqrt{\frac{y}{z}} + \sqrt{\frac{z}{x}} = 3 \\ \sqrt{\frac{y}{x}} + \sqrt{\frac{z}{y}} + \sqrt{\frac{x}{z}} = 3 \\ \sqrt{xyz} = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \operatorname{tg} \frac{x}{2} + \operatorname{tg} \frac{y}{2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \\ \operatorname{tg} x + \operatorname{tg} y = 2\sqrt{3} \end{cases}$
7	8	9
$\begin{cases} \sqrt{x-4} + \sqrt{y} + \sqrt{z+4} = 6 \\ 2\sqrt{z-4} - \sqrt{y} - 4\sqrt{z+4} = -12 \\ x + y + z = 14 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{x^2}{y} + \frac{y^2}{x} = 12 \\ 2^{-\log_2 x} + 5^{\log_5 \frac{1}{y}} = \frac{1}{3} \end{cases}$	$\begin{cases} \sqrt[3]{u+v} + \sqrt[3]{v+w} = 3 \\ \sqrt[3]{v+w} + \sqrt[3]{w+u} = 1 \\ \sqrt[3]{w+u} + \sqrt[3]{u+v} = 0 \end{cases}$
10		
$\begin{cases} \lg(x+y) - \lg 5 = \lg x + \lg y - \lg 6 \\ \frac{\lg x}{\lg(y+6) - (\lg y + \lg 6)} = -1 \end{cases}$		

Звіт по роботі повинен містити графіки завдань 1–3, та чисельний результат завдання 4, а також скріншоти всіх зібраних в *Simulink* схем.

Висновки по роботі повинні містити аналіз функціональних можливостей *Simulink* стосовно розв'язання алгебраїчних систем.

Лабораторна робота № 3

Розв'язання диференційних та алгебраїчних рівнянь засобами *Simulink*

Мета роботи: придбати практичні навички розв'язання систем диференційних та алгебраїчних рівнянь з використанням бібліотеки *Simulink*.

Завдання:

1. Розв'язати систему лінійних алгебраїчних рівнянь зібравши відповідну схему в системі *Simulink*. Значення коефіцієнтів рівнянь обираються з табл. 3.1, відповідно до варіанту.

2. Знайти графічне зображення (у вигляді залежності $y(t)$) рішення лінійного диференційного рівняння при нульових початкових умовах (тобто за умови $y'''(0) = y''(0) = y'(0) = y(0) = 0$). Ліву та праву частину рівняння вибирають за табл. 3.2 згідно варіанту.

Вихідні данні до завдання 1.

$$a_1x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 3x_4 = -2;$$

$$a_2x_1 - 4x_2 + b_1x_3 - 2x_4 = 2;$$

$$a_3x_1 + x_2 + b_2x_3 - 3x_4 = 5;$$

$$3x_1 + 5x_2 + b_3x_3 + 3x_4 = -3.$$

Таблиця 3.1 – Вихідні значення для розрахунку системи рівнянь

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
a_1	-1	1	2	-2	3	-3	4	-4	5	-5
a_2	-4	5	-5	-1	1	2	-2	3	-3	4
a_3	2	5	-5	-4	-1	-2	3	-3	4	1
b_1	-5	-1	1	2	-4	5	-2	3	-3	4
b_2	2	5	-5	-3	4	1	-4	-1	-2	3
b_3	-3	4	-4	5	-5	-1	1	2	-2	3

Таблиця 3.2 – Завдання для рішення диференційного рівняння

№ варіанту	Ліва частина рівняння	Права частина рівняння
1	$y^{IV} + 2y''' + 3y'' - 5y' + 2y =$	$= 2 - \sin t$
2	$y^{IV} - 4y''' - 5y'' + 4y' + 7y =$	$= \cos 2t + \sin t$
3	$y^{IV} - 2y''' - 4y'' - 5y' - 3y =$	$= \cos t \sin t$
4	$y^{IV} - 3y''' + 3y' + 2y' - y =$	$= \cos t + \sin 2t$
5	$y^{IV} + 5y''' + 3y'' - y' - 2y =$	$= \sin t \sin 3t$
6	$y^{IV} + 3y''' - 3y'' + 2y' + y =$	$= \cos t + 1$
7	$y^{IV} - y''' + 2y'' + 3y' - 5y =$	$= \cos t / \sin t$
8	$y^{IV} - 2y''' + y'' - 7y' - 4y =$	$= \sin t / \cos t$
9	$y^{IV} + 3y''' + 6y'' - 2y' - 4y =$	$= \sin 2t$
0	$y^{IV} - 4y''' - 5y'' - 2y' + 6y =$	$= \cos 2t + 1$

Рекомендована послідовність дій.

Привести рівняння до нормального виду (права частина дорівнює 0). Для розв'язання рівняння використовуються блоки *Gain*, *Add*, *Algebraic Constraint*,

Constant, Display. Зібрати схему для розв'язання першого рівняння (рис. 3.1), встановивши замість коефіцієнтів ($a_1 \dots b_3$) значення відповідно до варіанту.

Потім зібрати схему відносно другого рівняння та провести відповідні лінії зв'язку (рис. 3.2).

За тією ж логікою завершити схему для розв'язання необхідної кількості рівнянь.

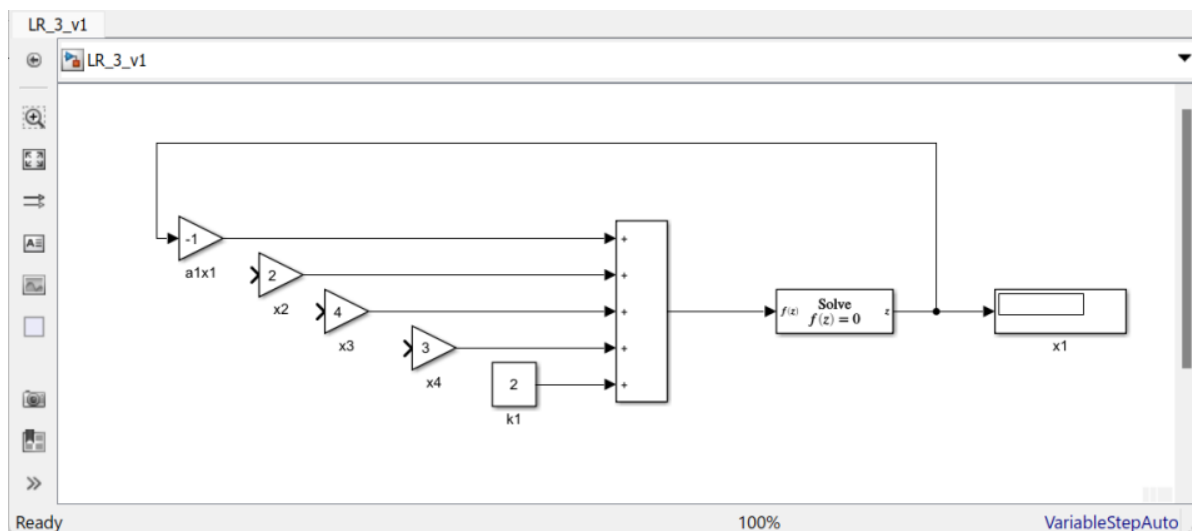


Рисунок 3.1 – Схема, що розв'язує перше рівняння з системи засобами *Simulink*

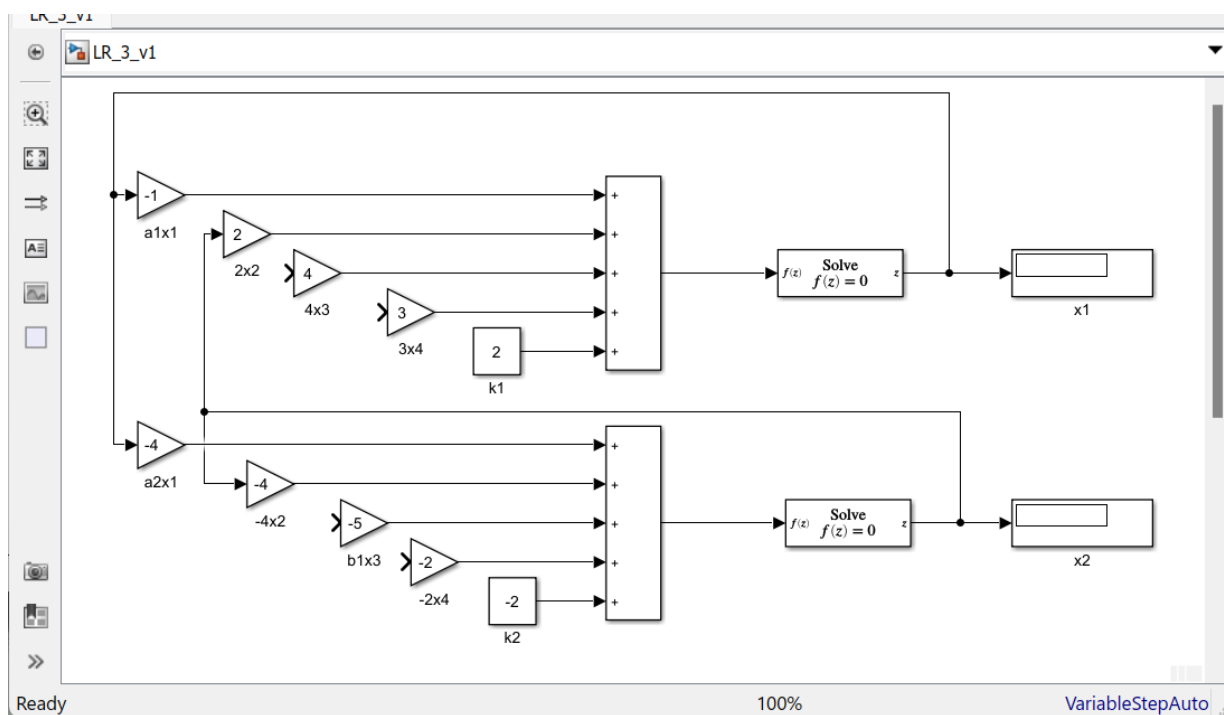


Рисунок 3.2 – Схема, що розв'язує перше та друге рівняння з системи засобами *Simulink*

Вихідні данні до завдання 2.

Розв'язання диференціального рівняння у вигляді структурної схеми має вигляд, наведений на рис. 3.3. В даному випадку вихідний сигнал знаходиться пониженням ступеня похідної шляхом подвійного інтегрування сигналу. У якості $\frac{1}{p}$ в *Simulink* використовується блок *Integrator*.

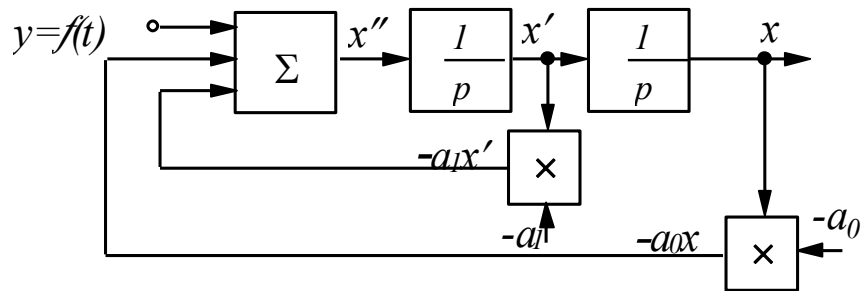


Рисунок 3.3 – Структурна схема розв'язання диференціального рівняння

Розв'язати отриману систему рівнянь в *Simulink*. Для отримання графічної залежності використати блок *Scop*.

Звіт по роботі має містити зображення схем в *Simulink* та графічне зображення функції $y(t)$. Висновки по роботі мають містити аналіз функціональних можливостей бібліотеки *Simulink* при розв'язанні систем рівнянь.

Лабораторна робота № 4

Моделювання механічної системи засобами *Simulink*

Мета роботи: Придбати практичні навички моделювання механічних систем засобами *Simulink* на основі складеної системи диференціальних рівнянь, що їх описують.

Завдання:

1. Накреслити розрахункову схему для механічної системи обраної за варіантом (табл. 4.1). Визначити, які сили діють на кожний з елементів системи. При цьому врахувати, що сила, яка діє з боку пружини, визначається рівнянням $F = K\Delta x$, де $\Delta x = (x_1 - x_2)$ – взаємне переміщення мас, пов'язаних пружиною, а сила, що

діє з боку амортизатора, визначається рівнянням $F = C\Delta v$, де $\Delta v = (v_1 - v_2)$ – швидкість взаємного переміщення мас, пов'язаних амортизатором.

2. Скласти систему диференціальних рівнянь, що описує рух елементів системи, при цьому сили тертя не враховувати. Записати систему з підстановкою чисельних значень відповідних величин (табл. 4.2). Навести результат у звіті роботи.

3. На основі складеної системи диференціальних рівнянь побудувати модель даної системи засобами *Simulink*.

4. Провести моделювання та отримати графічні залежності переміщення (Δx) та швидкості руху (Δv) при нульових початкових умовах при стрибкоподібній зміні зовнішньої сили.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до роботи

1.	
2.	
3.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	

Таблиця 4.2 – Вихідні данні до роботи

№ варіанта	Маса тіла m_1 , кг	Маса тіла m_2 , кг	Маса тіла m_3 , кг	Маса тіла m_4 , кг	K_1 , Н/м	K_2 , Н/м	K_3 , Н/м	K_4 , Н/м	C_1 , кг/с	C_2 , кг/с	C_3 , кг/с	C_4 , кг/с	Амплітуда сили F , Н
1	6,2	3,0	2,0	7,5	12	8	8	15	4	2	8	7	9,5
2	6,4	2,8	2,2	7,0	13	9	9	14	9	3	9	6	9,0
3	6,5	2,6	2,5	6,5	14	16	9	13	8	4	2	5	8,5
4	2,2	2,4	2,0	6,8	15	14	8	12	7	5	3	2	8,0
5	2,5	6,0	1,8	6,2	10	15	7	11	6	6	4	9	7,5
6	2,0	5,8	6,4	3,0	9	13	6	10	5	7	5	6	7,0
7	1,8	5,6	6,5	2,8	8	14	5	9	6	8	6	8	6,5
8	2,2	5,4	6,0	2,6	7	10	14	8	8	9	7	4	6,0
9	5,0	5,2	5,8	2,4	6	12	15	7	4	8	6	5	5,5
10	4,8	2,0	5,6	2,2	5	13	10	6	5	7	5	3	5,0

Рекомендована послідовність дій.

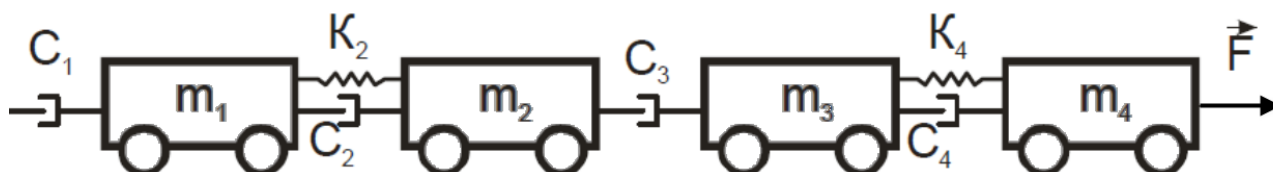


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема механічної системи за варіантом

1) Відповідно до закону Ньютона: $Ma = \sum F_i$.

$$m_1 a_1 = -C_1 \Delta v + C_2 \Delta v + K_2 \Delta x;$$

$$m_2 a_2 = -C_2 \Delta v - K_2 \Delta x + C_3 \Delta v;$$

$$m_3 a_3 = -C_3 \Delta v + C_4 \Delta v + K_4 \Delta x;$$

$$m_4 a_4 = -C_4 \Delta v - K_4 \Delta x + F;$$

Або ж, використовуючи визначення швидкості та прискорення:

$$m_1 x'' = -C_1(x'_1) + C_2(x'_1 - x'_2) + K_2(x_1 - x_2);$$

$$m_2 x'' = -C_2(x'_1 - x'_2) + C_3(x'_2 - x'_3) - K_2(x_1 - x_2);$$

і так далі...

Підставимо чисельні данні:

$$6.3x'' = -4x'_1 + 2(x'_1 - x'_2) - 8(x_1 - x_2);$$

$$3x'' = -2(x'_1 - x'_2) + 8(x'_2 - x'_3) - 8(x_1 - x_2).$$

і так далі...

Реалізуємо модель отриманої системи засобами *Simulink*.

У якості лівої частини рівняння ($m_i a_i$) обираємо блок *Sum*. Для отримання чистої похідної другого порядку розділимо вихідний сигнал на масу. Далі шляхом подвійного інтегрування отримаємо сигнал x_i . Для отримання необхідної різниці сигналів ($x_1 - x_2$) та ($x'_1 - x'_2$) додаємо на робочу форму ще декілька суматорів (рис. 4.2).

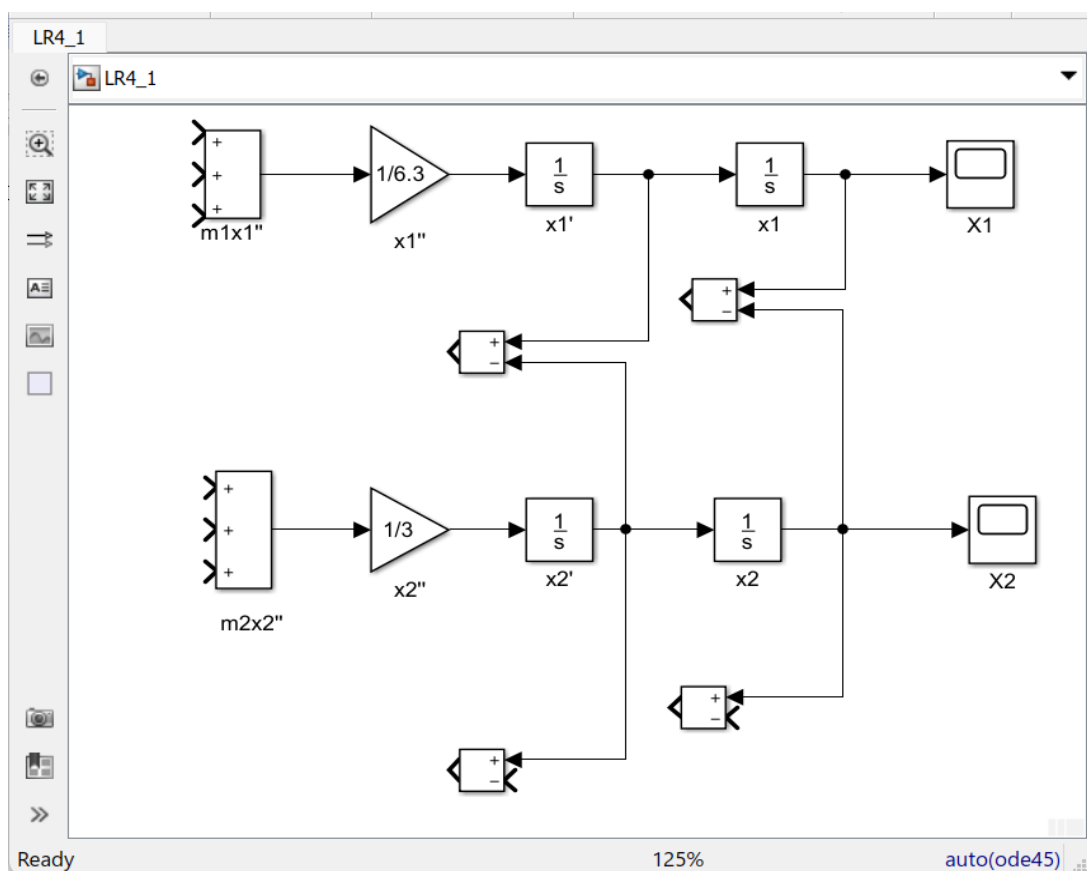


Рисунок 4.2 – Вікно робочої форми моделі

Отримавши необхідні похідні помножимо їх на відповідні коефіцієнти (рис. 4.3). Особливу увагу треба приділити урахуванню знаку коефіцієнта, його можна замінити в блоці *Sum*, замінивши додавання на віднімання, або в блоці *Gain* поставити коефіцієнт з його знаком. Для отримання реакції системи на вхідний

зовнішній сигнал F необхідно до робочої форми додати блок генерації сигналу *Signal Generator* (рис. 4.4), значення сигналу F обирається за варіантом (табл. 4.2).

Звіт повинен відображати всі етапи виконання роботи, починаючи з обрання розрахункової схеми та вихідних даних за варіантом. Також, систему рівнянь у загальному вигляді і з чисельною підстановкою. Структурну схему моделі механічної системи, а також переміщення та швидкість кожного елемента у графічному вигляді. Час моделювання встановити 1 секунду.

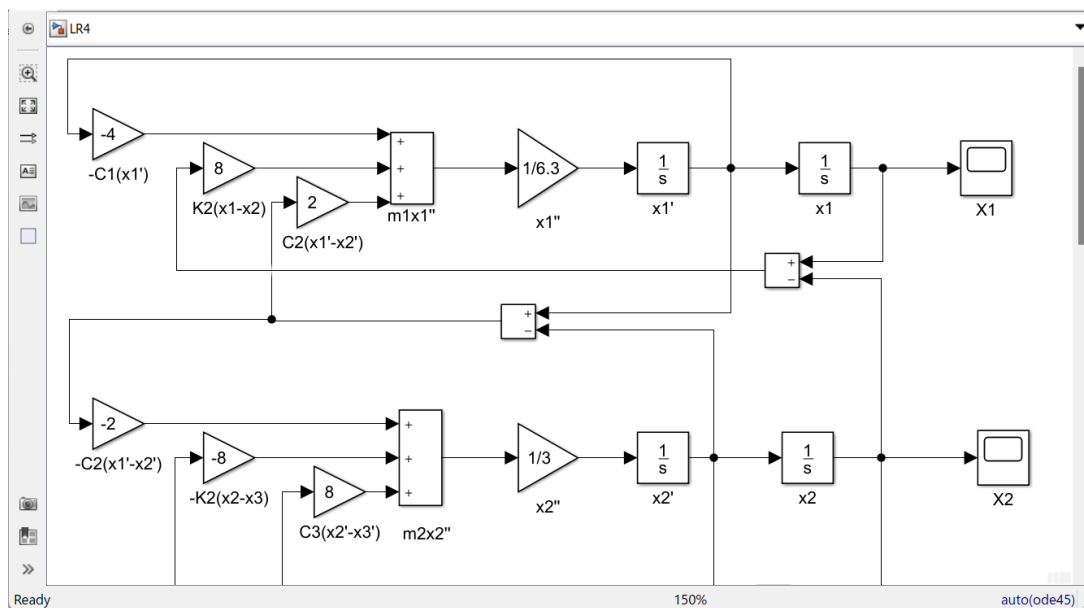


Рисунок 4.3 – Вікно робочої форми моделі

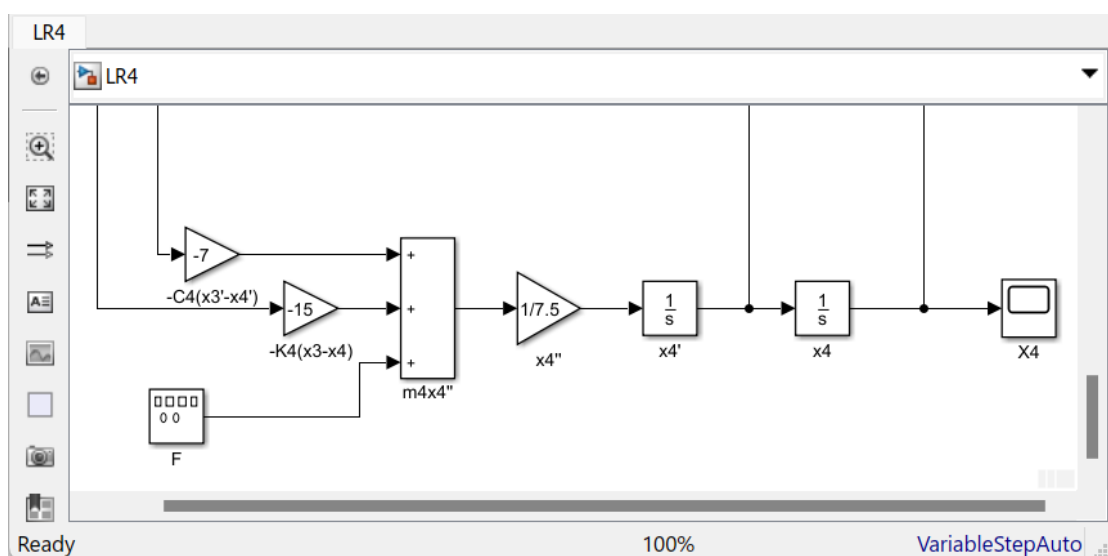


Рисунок 4.4 – Вікно робочої форми моделі з додаванням блоку сигналу зовнішнього впливу на систему

Лабораторна робота № 5

Дослідження динамічних характеристик двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Мета роботи: придбати навички комп'ютерного моделювання електроприводу з двигуном постійного струму (ДПС) незалежного збудження (НЗ) в системі *Simulink*.

Завдання:

1. Провести моделювання роботи двигуна постійного струму з незалежним збудженням в режимі холостого ходу та з динамічним навантаженням.
2. Побудувати динамічну характеристику $T_e = f(n)$ ДПС з НЗ з постійним навантаженням.

Рекомендована послідовність дій.

Знайти у пошуковій строчці бібліотеки *Simulink* двигун постійного струму за назвою «*DC Machine*» і витягнути його на робочу форму (рис. 5.1). У вікні налаштувань двигуна обрати необхідний тип двигуна за варіантом (табл. 5.1). Також, у пошуку знайти джерело постійної напруги за назвою «*DC Voltage Source*». Заживити двигун та котушку збудження напругою, відповідно до обраного типу (рис. 5.1). Для коректної роботи моделі на форму необхідно додати блок *Powergui*.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до роботи

Параметри ДПС	Значення сигналу F
01: 5HP 240V 1750RPM Field:300V	5
02: 5HP 240V 1750RPM Field:150V	7
03: 5HP 500V 1750RPM Field:300V	9
04: 10HP 240V 1750RPM Field:300V	8
05: 10HP 500V 1750RPM Field:300V	10
06: 20HP 240V 1750RPM Field:300V	15
07: 20HP 500V 1750RPM Field:300V	20

У двигуна залишились вільні один вхід *Tl* і вихід *m*. Вхід *Tl* призначений для імітації роботи двигуна під навантаженням, сигнал, що на нього надходить,

сприймається як момент опору, який визначає статичне навантаження електропривода.

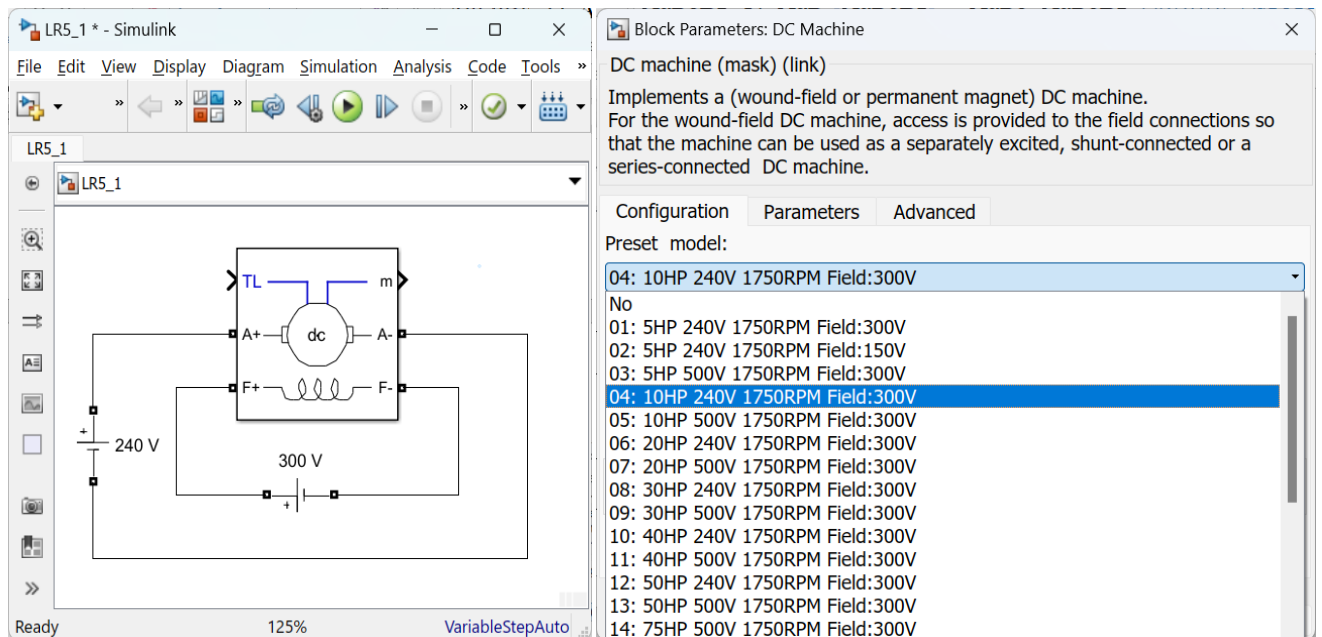


Рисунок 5.1 – Вікно робочої форми з двигуном постійного струму та вікно його налаштувань

Вихід m є багато параметричним, він дозволяє контролювати наступні параметри двигуна:

- *Speed ω_m* – швидкість обертання двигуна в рад/с;
- *Armature current i_a* – струм якоря;
- *Field current i_f* – струм збудження;
- *Electrical torque* – електромагнітний момент двигуна.

Для обрання необхідного для дослідження параметру вихід m приєднується до блоку призначеного для комутації сигналів «*Bus selector*». У вікні налаштування «*Bus selector*» обираємо, частоту обертання, струм якоря, момент двигуна (рис. 5.2).

Результат моделювання роботи двигуна представити у вигляді графічної залежності за допомогою блоку *Scop* (рис. 5.3). Провести моделювання в режимі холостого ходу, проаналізувати отримані графіки. Час моделювання встановити 0.5 с.

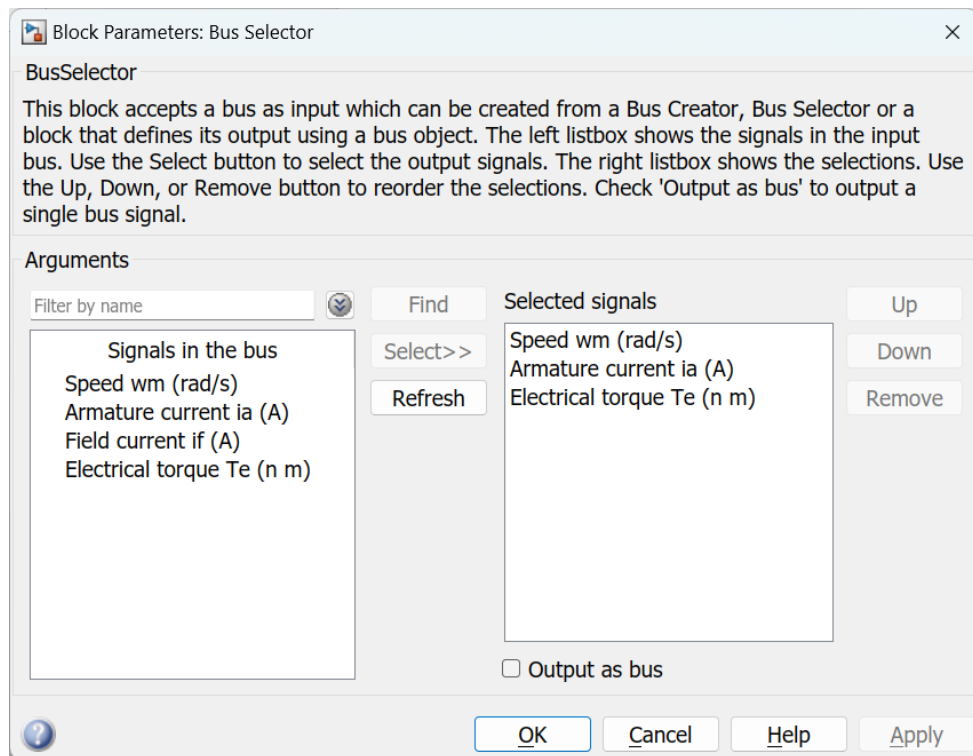


Рисунок 5.2 – Вікно налаштування *Bus selector*

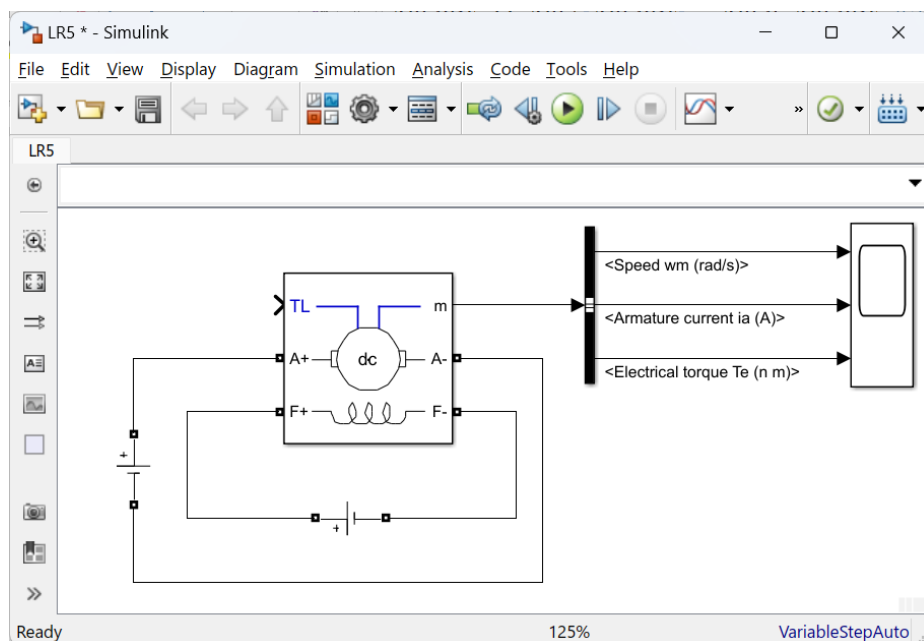


Рисунок 5.3 – Вікно робочої форми моделі ДПС з НЗ

Для отримання динамічної характеристики двигуна на вхід Tl необхідно подати сигнал, що буде імітувати стале навантаження електроприводу, значення сигналу (див. табл. 5.1). Для побудови графічної залежності $T_e = f(n)$, необхідно

скористатись блоком *XY Graf* (рис. 5.4). Частоту обертання необхідно перевести з рад/с в об/с, для цього скористуємось блоком *Gain*.

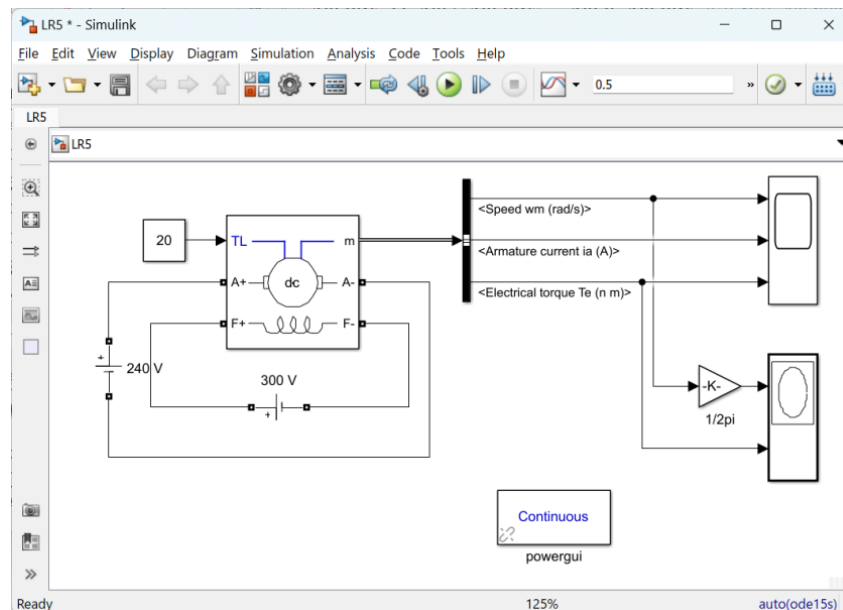


Рисунок 5.4 – Дослідження динамічної характеристики ДПС

Для отримання коректного графіку необхідно провести налаштування параметрів блоку *XY Graf* – встановити граничні значення вхідних сигналів. В даному випадку мінімальним значенням як *X* так і *Y* є «нуль», максимальне значення визначається експериментальним шляхом.

Звіт повинен відображати виконання всіх етапів роботи включно зі схемами та коректна підписані графіки з поясненнями, який саме параметр зображено.

Лабораторна робота № 6

Побудова моделей кінематичних схем електроприводу

Мета роботи: придбати навички побудови *Simulink*-моделі електромеханічних систем опираючись на математичну модель або кінематичну схему механізму.

Завдання:

1. За представленими нижче кінематичними схемами скласти математичні рівняння, що описують роботи цих електромеханічних систем за варіантом

(табл. 6.1). Погодити з викладачем. Побудувати *Simulink*-модель за розробленими математичними рівняннями.

2. Промоделювати роботу переміщення (підйому) вантажу на 50 м. Знайти швидкість його послідовного переміщення. Представити графічні залежності швидкості та переміщення.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані до роботи

Рисунок 6.1 – Кінематична схема електропривода підйомної лебідки: 1 – електродвигун; 2 – механічні гальма; 3, 7 – механічні муфти; 4 – редуктор; 5, 6 – шестерні; 8 – барабан підйомної лебідки; 9 – трос; 10 – гак; 11 – вантаж.	Рисунок 6.2 – Кінематична схема електроприводу ліфта: 1 – гальма; 2 – двигун; 3 – муфта; 4 – редуктор; 5 – шків; 6 – кабіна; 7 – канат; 8 – противага
Рисунок 6.3 – Кінематична схема електроприводу механізму пересування: 1 – ходові колеса; 2 – гальма; 3 – двигун; 4 – муфта; 5 – колії	Рисунок 6.4 – Кінематична схема механічної частини електроприводу

Вхідні дані до роботи

$J_1 = 0,1$ – момент інерції механізму гальма;

$J_2 = 2$ – загальний момент інерції механізму ліфту;

$J_d = 0,01$ – момент інерції двигуна;

$K_1 = 20$ – передавальне число редуктора;

$m = 50$ кг – маса вантажу;

$D = 0.5$ м – діаметр барабана

Рекомендована послідовність дій.

При проектуванні та інженерних розрахунках механічна частина приводу замінюється моделлю, яка, з одного боку, має бути досить простою, з другого – відбивати основні фізичні процеси реального об'єкта. При цьому слід мати на увазі, що одному об'єкту відповідає скільки завгодно багато моделей. Усі вони відбивають різні його сторони, різні властивості, особливості. Моделі можуть бути дуже хорошими, коли вони вичерпна повно, лаконічно, переконливо відбивають саме ті властивості об'єкта, які в цій задачі потрібні інженеру; можуть бути просто хорошими, коли в них є все, що потрібне, але є і зайве; і може бути поганими – неадекватними. Головна задача інженера-дослідника – довести адекватність прийнятої моделі.

1. Побудова розрахункової схеми електромеханічної системи (рис. 6.1).

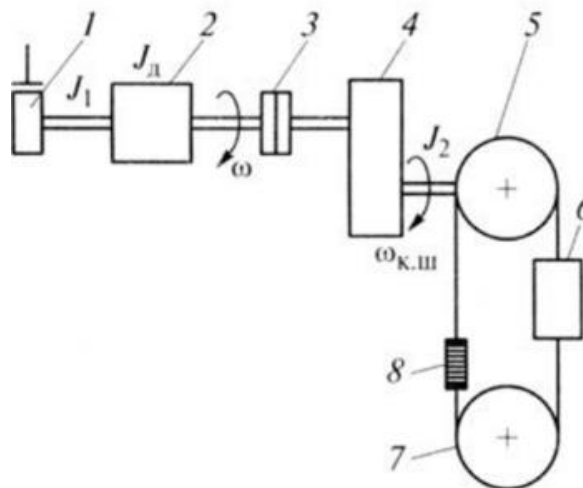


Рисунок 6.1 – Кінематична схема електропривода ліфта:

1 – тормоз; 2 – двигун; 3 – муфта; 4 – редуктор; 5 – канатопровідний шків;
6 – кабіна; 7 – канат; 8 – протизага

2. Математична модель механізму описується наступними рівняннями:

Рівняння динаміки: $M_{дв} - M_c = \sum J_i$

Загальний момент інерції:

$$J_m = J_1 + J_d + J_2/K_1$$

Швидкість руху кабіни ліфта дорівнює обертовій швидкості барабана, звідси:

Швидкість руху кабінки ліфта:

$$v = D \cdot \pi \cdot \omega$$

Переміщення, за визначенням, дорівнює інтегралу від швидкості:

$$S = \int_0^t v(t) dt$$

Загальне навантаження, яке отримує двигун:

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot D}{2K_1}$$

У якості $M_{дв}$ візьмемо параметри безпосередньо з самого двигуна, (див. попередню роботу), який додаємо до структурної схеми електроприводу.

3. Відповідно до математичної моделі побудувати *Simulink*-модель роботи механізму ліфта (рис. 6.2). Застосувати блоки з бібліотеки (*Sim power system*), *DC machine (machines)* – в налаштуваннях обрати тип двигуна, підключити живлення двигуна та збудження (*DC Voltage sources*), встановити відповідну до обраного двигуна напругу. Блоки *Gain*, *Constant*, *Integrator*, *Scop* – в бібліотеці *Simulink*). На схемі обов'язкове додавання блоку *Powergui*.

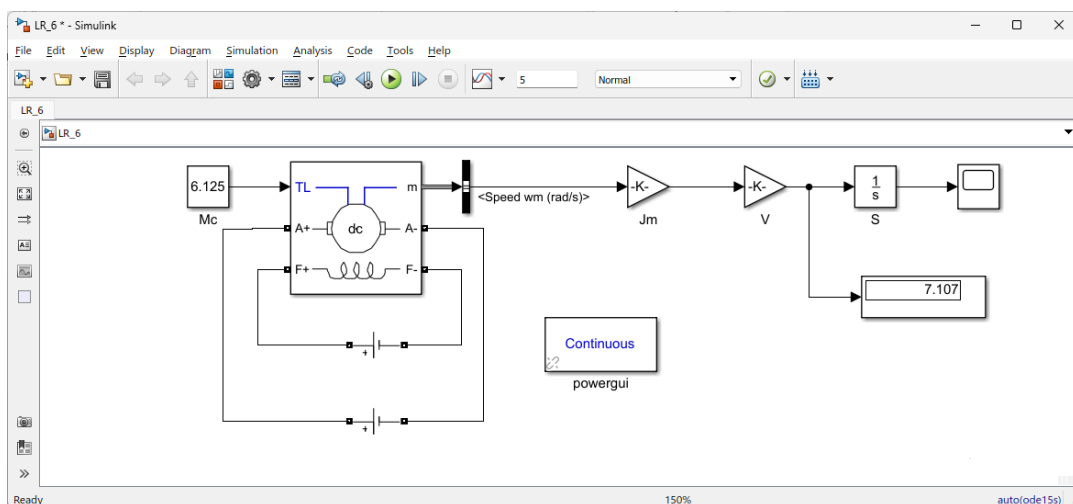


Рисунок 6.2 – *Simulink*-модель роботи механізму ліфта

4. За допомогою електронного осцилографа *Scop* побудувати графік швидкості руху кабінки ліфту та переміщення.

Звіт по роботі повинен відображати всі етапи виконання роботи включно з структурною схемою, математичною моделлю та *Simulink*-модель. А також, результат у вигляді графічної залежності. Висновки по роботі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Волянський С. М. Моделювання електромеханічних систем : навчальний посібник / С. М. Волянський, Я. Б. Волянська; за ред. проф. О. А. Онищенка. – Миколаїв : Іліон, 2018. – 246 с.
2. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
3. Лазарєв Ю. Ф. MATLAB і моделювання динамічних систем. Навчальний посібник. Глава 4. Засоби взаємодії Matlab з Simulink. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – 63 с.
4. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 421 с.
https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf
5. Чорний О. П. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В.– Кременчук, 2001. – 410 с.

Навчальне видання

С. М. Волянський, Г. С. Грудініна, Я. Б. Волянська

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Частина 1

Підписано до друку «28» серпня 2024 р. Формат 60х84/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 1,2
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим.

Надруковано поліграфічним підприємством СПД Румянцева Г.В.
54038, Миколаїв, вул. Бузника 5/1
Свідоцтво МК №11 від 26.01.2007
