

Д. Р. Степаненко, О. В. Торосян, А. О. Бреус

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Д. Р. Степаненко, О. В. Торосян, А. О. Бреус

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Навчальний посібник до практичних робіт

Харків «ХАІ» 2025

УДК 629.735.33.02(075)
С79

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. С. С. Добротворський,
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Сорокін

Степаненко, Д. Р.

С79 Моделювання та дослідження технічних систем [Текст] : навч. посіб. до практ. робіт / Д. Р. Степаненко, О. В. Торосян, А. О. Бреус. — Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2025. — 88 с.

ISBN _

Викладено основні відомості про роботу в програмному середовищі MatLab Simulink. Подано практичні роботи для закріплення й поглиблення знань та умінь зі створення моделей у Simulink. Роботи структуровано від простих до складних. Розглянуто проекти в Simulink для електричних, гідравлічних і механічних систем та їх комбінації.

Для здобувачів вищої освіти технічних закладів, що навчаються за спеціальностями «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування». Може бути корисним під час вивчення дисциплін «Конструювання устаткування для автоматизованого виробництва» та курсів, пов'язаних із застосуванням нових технологій у машинобудуванні та інших галузях промисловості.

Іл. 102. Табл. 5. Бібліогр.: 9 назв

УДК 629.735.33.02(075)

© Степаненко Д. Р., Торосян О. В., Бреус А. О., 2025
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2025

ISBN _

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	6
2 ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМИ MATLAB ТА TOOLBOX SIMULINK.....	7
2.1 Перший запуск Simulink.....	8
2.2 Створення моделі	10
3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	12
Практична робота № 1 Моделювання технічних систем у пакеті MatLab.....	12
Практична робота № 2 Вивчення та дослідження основних блоків Simscape на прикладі побудови підвіски автомобіля.....	30
Практична робота № 3 Вивчення та дослідження основних блоків Simscape з використанням блока постійного тертя.....	40
Практична робота № 4 Вивчення та дослідження основних блоків бібліотеки Simhydraulic.....	47
Практична робота № 5 Вивчення та дослідження основних блоків бібліотеки Simmechanics на прикладі регулятора електроприводу.....	56
Практична робота № 6 Вивчення та дослідження основних блоків бібліотеки Simmechanics на прикладі створення кінематики триланкового маніпулятора.....	60
Практична робота № 7 Вивчення та дослідження основних блоків бібліотеки Simulink на прикладі триланкового маніпулятора.....	69
Практична робота № 8 Вивчення та дослідження мереж Петрі.....	82
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ЛКМ – ліва кнопка миші;

ПКМ – права кнопка миші;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

УГП – умовне графічне позначення;

ЧПК – числове програмне керування.

ВСТУП

Моделювання та дослідження технічних систем є важливою галуззю науки та інженерії, яка знаходить застосування в багатьох сферах сучасного життя. Цей підхід дає можливість досліджувати складні процеси та явища, що відбуваються у технічних системах, з метою їх розуміння, аналізу та вдосконалення. Моделювання охоплює створення математичних моделей, які є абстрактним поданням реальних систем, і використовується для аналізу та оптимізації роботи різних типів технічних об'єктів, таких як механічні, електричні, теплові, гідравлічні та інші.

Вивчення цього предмета спрямоване на формування у здобувачів вищої освіти здатності вирішувати інженерні завдання за допомогою сучасних методів аналізу та проектування. Серед цих методів особливе місце належить комп'ютерному моделюванню, що дає змогу імітувати поведінку систем у реальному часі та експериментувати з різними сценаріями. Завдяки цьому можна виявляти слабкі місця у конструкціях, прогнозувати результати змін параметрів і знаходити оптимальні рішення (наприклад, створити механічну частину маніпулятора та поєднати його з системою керування для відпрацювання алгоритмів руху різними траєкторіями).

Моделювання є ключовим етапом у проектуванні нових технологій і модернізації наявних. Воно дає змогу інженерам мінімізувати витрати на фізичні експерименти, скорочувати терміни розроблення й підвищувати надійність кінцевого продукту. Крім того, моделювання відіграє вирішальну роль у таких напрямках, як робототехніка, альтернативна енергетика, інформаційні технології, біомедичні системи, а також у розвитку «розумних» інфраструктур.

Навчальний посібник з дисципліни «Моделювання та дослідження технічних систем» призначено не лише для закріплення здобувачами вищої освіти основних теоретичних знань, а й для набуття практичних навичок роботи з сучасними інструментами моделювання MatLab Simulink. Ця програма має зручний інтерфейс. Наявна велика кількість бібліотек для різних напрямків (механіка, електрика, пневматика, гідравліка), що містять контрольно-вимірювальні інструменти, які дають можливість відслідковувати дії моделі для подальшого налаштування. Навчальний посібник починається з вивчення цієї програми.

Практична частина містить завдання та приклад його виконання з поясненням налаштувань елементів, а також контрольні запитання. За кожною роботою студент складає звіт та надає викладачу для перевірки та оцінювання роботи.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Simulink – інтерактивний інструмент, додаток до пакета MatLab [1]. При моделюванні з використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних способів моделювання, користувачеві не обов'язково досконально знати мову програмування і числові методи математики, а достатньо загальних знань, потрібних для роботи на комп'ютері і, природно, знань тієї предметної області, в якій він працює. Simulink є самостійним інструментом MatLab і при роботі з ним не потрібно знати сам MatLab та інші його додатки. З іншого боку, доступ до функцій та інструментів MatLab залишається відкритим і їх можна використовувати в Simulink. Частина пакетів, що входять до складу MatLab, має інструменти, що вбудовуються в Simulink (наприклад, LTI-Viewer додатки Control System Toolbox – пакета для розроблення систем керування). Є також додаткові бібліотеки блоків для різних областей застосування (наприклад, Power System Blockset – для моделювання електротехнічних пристроїв, Digital Signal Processing Blockset – для розроблення цифрових пристроїв і т. ін). Під час роботи з Simulink користувач має можливість модернізувати бібліотечні блоки, створювати власні, а також складати нові бібліотеки блоків. При моделюванні користувач може вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). Під час моделювання є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути подані у вигляді графіків або таблиць. Перевага Simulink полягає також у тому, що він дає змогу поповнювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм, написаних як мовою MatLab, так і мовами C + +, Fortran і Ada.

2 ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМИ MATLAB ТА TOOLBOX SIMULINK

MatLab – це високорівнева мова технічних розрахунків, інтерактивне середовище розроблення алгоритмів та сучасний інструмент аналізу даних. Загальний вигляд головного вікна показано на рисунку 2.1.

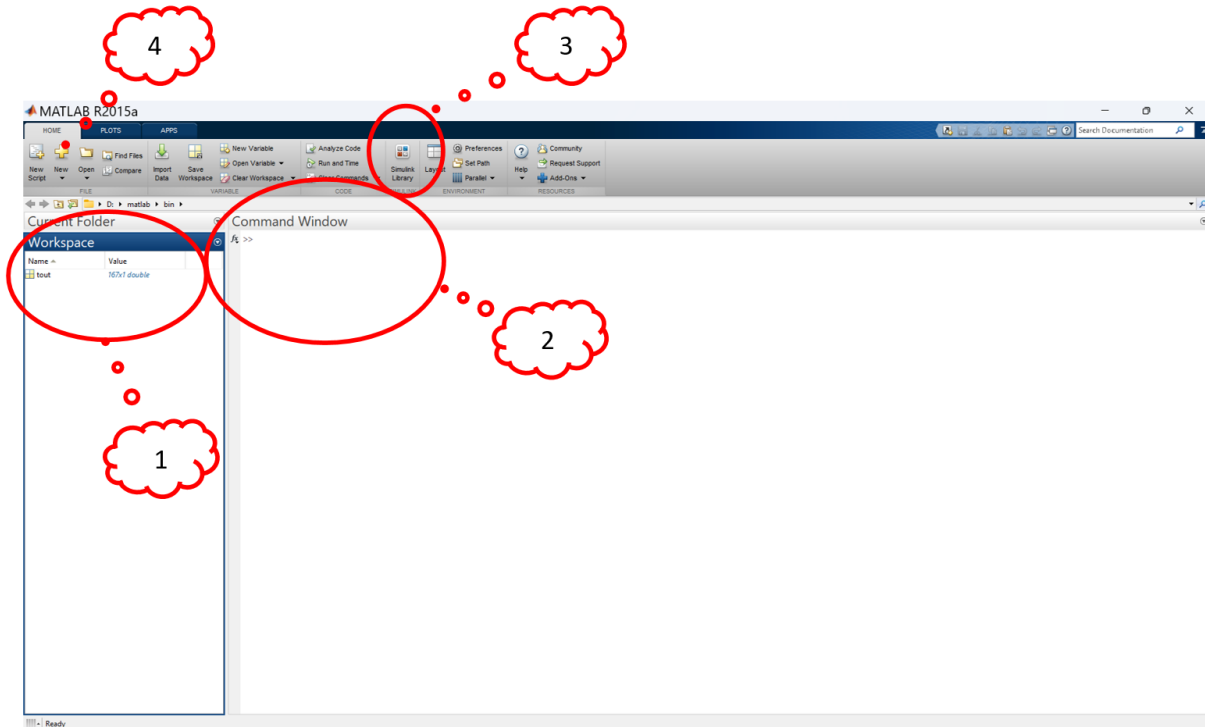


Рисунок 2.1 – Вікно програми MatLab:

1 – робочий простір (Workspace); 2 – командне вікно (Command Window); 3 – кнопка, що запускає вікно Simulink Library; 4 – кнопка створення нових файлів

MatLab – програмний продукт, що містить велику кількість інтегрованих інструментів.

Загальний опис головного вікна MatLab і його компонентів можна переглянути більш детально в [2].

Для виконання завдань, наведених у практичній частині, ознайомимося з елементами, які далі будемо використовувати. Наприклад, на рисунку 2.1 робочий простір 1 зберігає елементи, створені в командному вікні 2, які далі можна використовувати навіть у Simulink.

Simulink – графічне середовище імітаційного моделювання, що дає змогу за допомогою блок-діаграм у вигляді спрямованих графів будувати динамічні моделі, зокрема дискретні, безперервні та гібридні, нелінійні та розривні системи.

Simscape – це основна бібліотека Simulink для моделювання об'єктів різної фізичної природи. З її допомогою можна створювати моделі гібридних мультидоменних об'єктів у вигляді принципових схем, елементів та з'єднань, реальних фізичних величин з урахуванням одиниць вимірювання.

Simscape є основою для моделювання в Simulink електросилових, механічних та гідравлічних об'єктів. Бібліотека розширюється спеціалізованими пакетами SimMechanics, SimDriveline, SimHydraulics та дає змогу будувати моделі складних гібридних мультидоменних об'єктів для різних завдань аналізу, зокрема для розроблення цифрових систем керування.

2.1 Перший запуск Simulink

Є декілька способів запуску Simulink. Перший спосіб: натискаємо кнопку 3 (див. рисунок 2.1) та запускаємо вікно бібліотеки Simulink (рисунок 2.2).

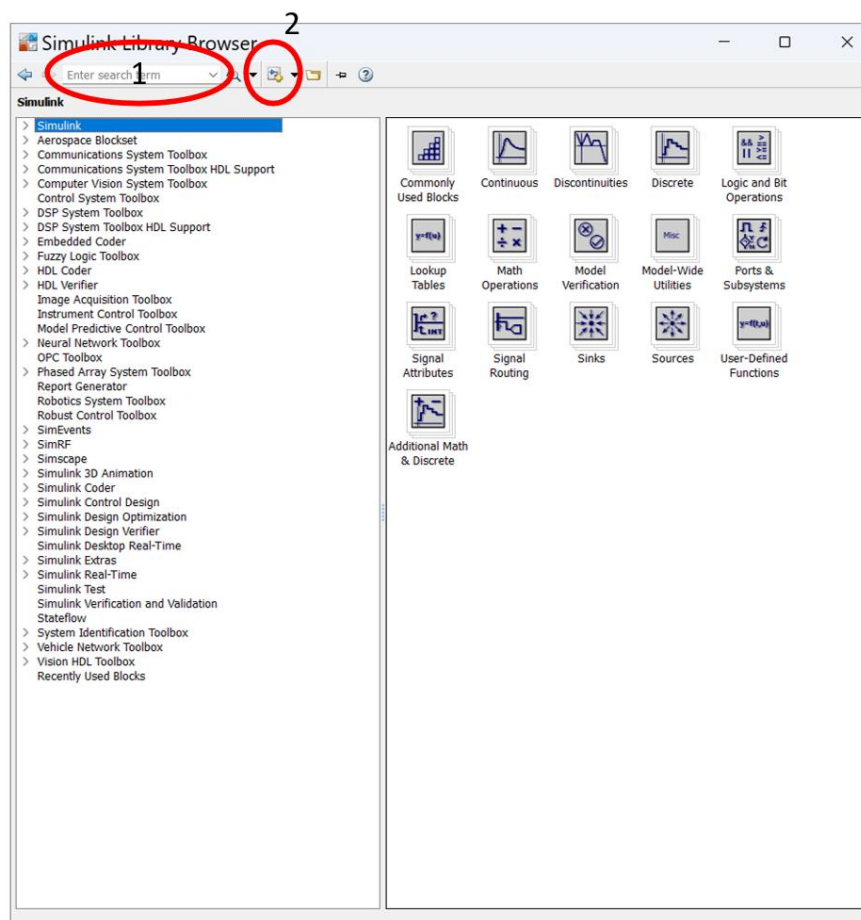


Рисунок 2.2 – Вікно бібліотеки Simulink

Натискаємо кнопку 2 (див. рисунок 2.2) – відкривається робоче вікно, в якому збираються моделі і проводяться дослідження (рисунок 2.3). Перед початком роботи зберігаємо файл. Обов'язково назву файлу і всіх папок, у яких він зберігається, записуємо латиницею!

Другий спосіб: натискаємо кнопку New (Новий) (див. рисунок 2.1) у головному вікні MatLab та вибираємо Створити файл Simulink Model. Відкриється вікно, як на рисунку 2.3. Наступним кроком відкриваємо бібліотеку елементів 1 (див. рисунок 2.3), відкриється вікно як на рисунку 2.2.

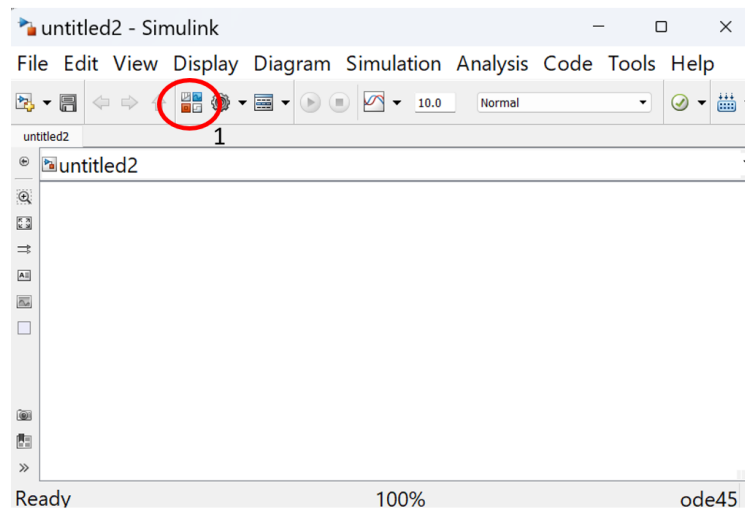


Рисунок 2.3 – Вікно нової моделі Simulink

Вікно нової моделі складається з робочого поля, меню користувача, панелі інструментів та рядка стану.

Меню користувача складається з таких розділів:

- File (команди роботи з MDL-файлами);
- Edit (команди редагування блок-схем і роботи з бібліотекою);
- View (команди зміни зовнішнього вигляду вікна);
- Display (команди налаштування відображення блоків та сигналів у моделі);
- Diagram (команди керування структурою та поведінкою діаграми);
- Simulation (команди керування моделюванням);
- Analysis (інструменти для аналізу поведінки моделі);
- Code (команди для генерації коду з моделі);
- Tools (налаштування параметрів керування бібліотеками, а також доступ до додаткових модулів);
- Help (команда доступу до довідкової документації).

Більш детально склад меню користувача та призначення елементів описано в [3].

Загальний вигляд та призначення елементів панелі інструментів зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Панель інструментів вікна моделі Simulink:

1 – відкриття нового вікна моделі; 2 – збереження моделі; 3 – стандартні операції редагування; 4 – виклик бібліотеки Simulink; 5 – виклик вікна параметрів моделі; 6 – дослідник моделі; 7 – запуск/пауза та зупинка процесу моделювання; 8 – налаштування запису зареєстрованих даних; 9 – час моделювання; 10 – режим розрахунку

У рядку стану відображається інформація про поточний стан моделі, включаючи індикацію часу завершення моделювання, поточне значення часу моделювання та алгоритм, що використовується для чисельного розрахунку моделі.

2.2 Створення моделі

Simulink – інструмент для візуального моделювання динамічних систем, тому більшість елементів створені блоками і моделі будуються у форматі графічних блок-діаграм.

Бібліотека розбита на категорії, тому з нею досить легко працювати. Якщо виникають складнощі зі знаходженням елемента, користуємось вбудованим пошуком. Вводимо назву елемента в поле 1 (див. рисунок 2.2), після чого середовище відобразить відповідні результати для вибору потрібного блоку.

Вибравши потрібний елемент, потрібно натиснути ЛКМ та, не відпускаючи її, перетягнути елемент у робоче поле вікна моделі. Аналогічно перетягнути всі елементи для створення моделі. Для з'єднання елементів слід навести курсор на вихід чи вхід блока (курсор змінить форму), натиснути ЛКМ та, не відпускаючи її, провести лінію до іншого виходу чи входу блока, який необхідно приєднати. Відпустити ЛКМ – і з'явиться лінія, що з'єднує по три блоки. За необхідності приєднатись до лінії (створити розгалуження) потрібно аналогічно з порту потрібного блока провести лінію, навівши на місце майбутнього з'єднання (курсор змінить форму) та відпустити ЛКМ, тоді з'явиться лінія з'єднання і в місці з'єднання утвориться вузол (точка).

Наступний крок створення моделі – налаштування параметрів блоків. Якщо двічі натиснути на блоці ЛКМ, з'явиться вікно налаштувань. На рисунку 2.5 показано приклад вікна налаштувань параметрів блока Константа. У цьому вікні є короткий опис блока, поля для встановлення параметрів блока та керівні кнопки ОК (застосувати параметри та закрити

вікно), Cancel (відмінити), Help (викликати файл довідки), Apply (застосувати параметри без закриття вікна).

Перед запуском процесу моделювання потрібно зберегти файл моделі. Якщо на початку, при створенні файлу, не відбувалось збереження, то потрібно задати назву файлу та вибрати місце для його збереження (усі назви слід записувати латиницею).

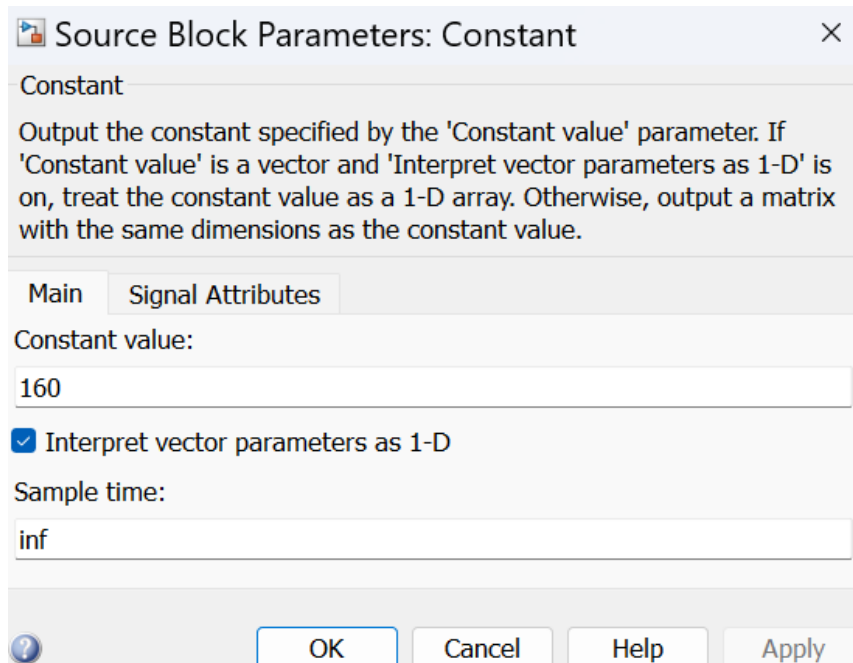


Рисунок 2.5 – Вікно налаштувань блока Константа

Налаштування параметрів моделювання. Викликаємо вікно параметрів 5 (див. рисунок 2.4). Вікно налаштувань матиме такий вигляд, як на рисунку 2.5. Воно має декілька вкладок, зупинимось на вкладці вирішувача (Solver). Тут є дуже багато параметрів, зосередимось на головних:

- Simulation Time (інтервал моделювання) встановлює початкове значення (Start Time) та кінцеве значення (Stop Time) часу моделювання;
- Solver options – вибір методу розрахунку моделі. За допомогою меню Type задається спосіб зміни модельного часу (Variable-step – моделювання зі змінним кроком, Fixed-step – моделювання з постійним кроком) та метод розв'язання звичайних диференціальних рівнянь, якими описуються блоки моделі. Зазвичай Variable-step використовується для моделювання неперервних систем, а Fixed-step – дискретних (див. рисунок 2.6). При моделюванні перших можливо задання максимальної величини кроку моделювання (Max step size) і початкове значення кроку моделювання (Initial step size), а також відносної (Relative tolerance) та абсолютної (Absolute tolerance) точності розрахунків. При моделюванні дискретних систем задається величина фіксованого кроку моделювання (Fixed step

size). Після встановлення відповідних параметрів моделювання, необхідно застосувати внесені зміни. Для цього слід натиснути кнопку Apply (застосувати), а потім – OK для закриття вікна налаштувань.

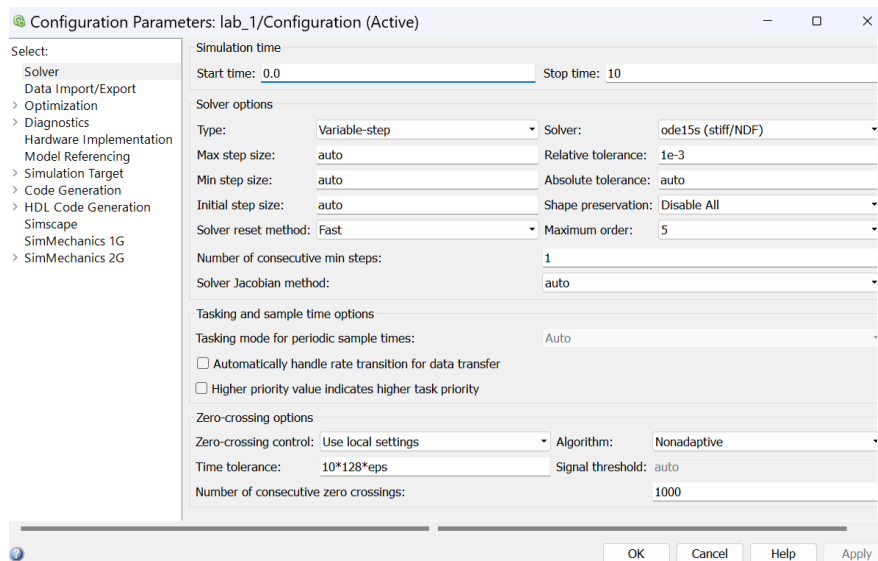


Рисунок 2.6 – Вікно налаштувань параметрів моделі

Нарешті запускаємо моделювання кнопкою 7 (див. рисунок 2.4). Більш детально розглянемо створення простої моделі в практичній роботі № 1.

3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Тут пропонується самостійно виконати практичні роботи, пов'язані зі створенням і моделюванням електричних, механічних, гідравлічних схем та їх комбінуванням.

Практична робота № 1

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ У ПАКЕТІ MATLAB

Мета роботи: онаяомитися з програмою MatLab та її розширенням Simulink на основі простих схем. Виконати необхідні налаштування для моделювання. Дослідити параметри зібраних схем.

Завдання:

1. Набути навичок складання та редагування простих схем.
2. Правильно встановити та налаштувати вимірювальні прилади.
3. Створити передавальну функцію за прикладом.
4. Побудувати графіки Control Design.
5. Створити просту схему, використовуючи Simscape.

6. Проаналізувати результати, зробити висновки та оформити звіт.

Порядок виконання роботи

MatLab – дуже потужний програмний продукт для математичних розрахунків, моделювання, обробки даних та візуалізації моделей.

Передавальною функцією називається функція, що описує залежність виходів деякої динамічної лінійної стаціонарної системи від її входів. Також відома як системна або сіткова функція.

Розглянемо коливальну ланку, що зазвичай має такий вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot d \cdot T \cdot s + 1} . \quad (3.1)$$

Для того щоб працювати у Simulink, маємо знати відразу коефіцієнти знаменника та чисельника. Можна, звичайно, швидко перемножити постійну часу та коефіцієнт демпфування, але краще навчитися користуватися змінними.

Simulink має передавальну функцію, в яку можна ввести будь-які коефіцієнти в знаменник та чисельник (головне, щоб при цьому порядок чисельника був меншим від порядку знаменника), але про це нижче.

Переходимо до збирання моделі. Про те, як запустити додаток або створити новий файл, див. розділ 2. Знаходимо елементи в бібліотеках Simulink Step, Transfer Fun, Scope, а якщо це не вдається, користуємось пошуком, як показано на рисунку 3.1, та знаходимо Scope.

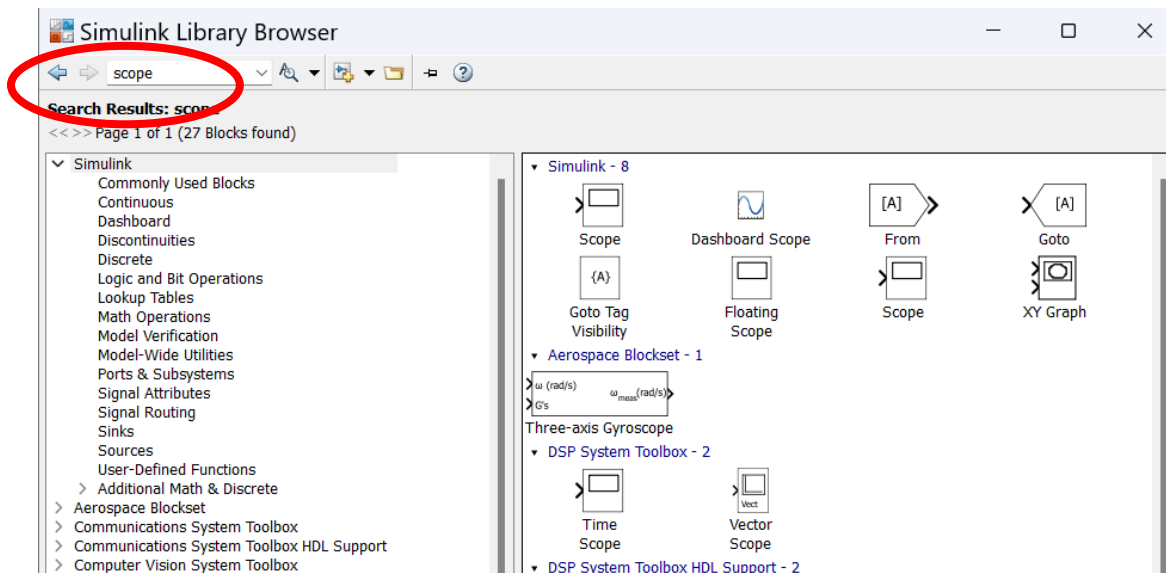


Рисунок 3.1 – Бібліотека елементів та пошук елементів Simulink Library Browser

Збираються всі елементи, як показано на рисунку 3.2.

Потім з'єднуємо всі ці ланки (процес з'єднання описано в розділі 2).

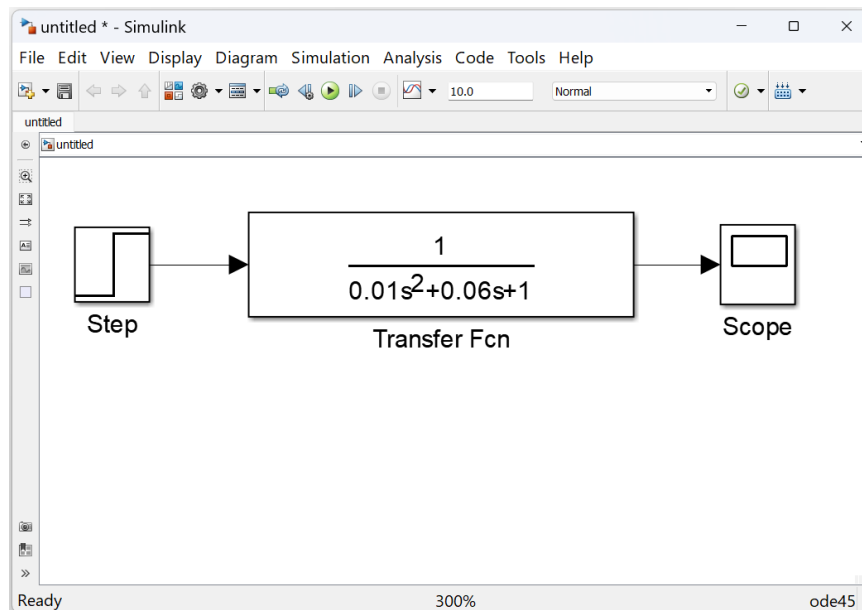


Рисунок 3.2 – Проста модель коливальної ланки в Simulink

Переходимо до налаштування блоків один за одним. Блок Step (кроковий сигнал) зазвичай використовується для моделювання різких змін у системі. У даному випадку, налаштуємо його з параметрами за замовчуванням: час початку 1 секунда, початкове значення 0, кінцеве значення 1.

Є декілька способів введення змінних у Simulink.

Перший спосіб: вводимо їх у командний рядок MatLab (рисунок 3.3).

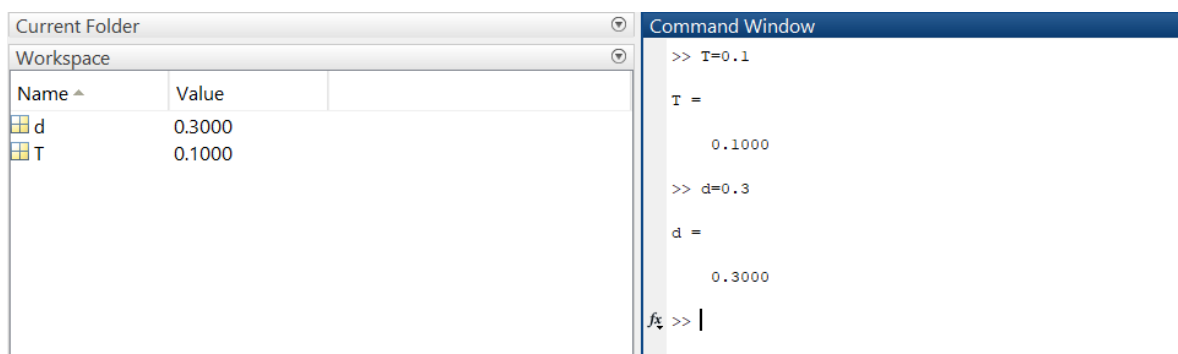


Рисунок 3.3 – Створення змінних у командному вікні

Як бачимо, значення відразу було внесено до Workspace і тепер можна вільно вносити їх у будь-який елемент Simulink і проводити з ними будь-які операції. Потім можна зберегти в один файл (Save Workspace as...) і завантажувати за потребою.

Переходимо до налаштувань блока функції і вводимо коефіцієнти зі створеними змінними, як показано на рисунку 3.4.

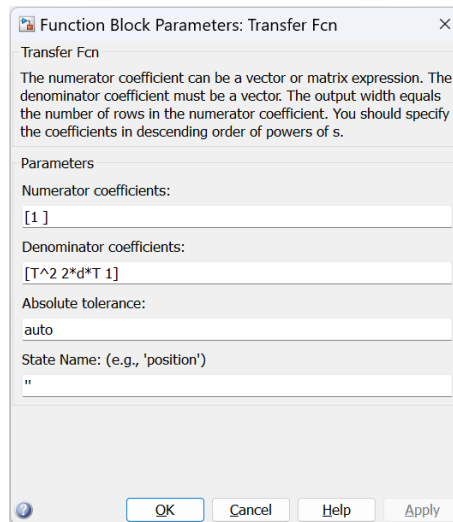


Рисунок 3.4 – Запис коефіцієнтів зі змінними до Transfer Fcn

Застосувавши такий запис, отримаємо функцію, як у рівнянні (3.1).

Другий спосіб: обчислюємо значення та записуємо вручну коефіцієнти біля кожного доданка. $T = 0.1$ (постійна часу коливальної ланки) та $d = 0.3$ (коефіцієнт демпфування). Записуємо коефіцієнти, як показано на рисунку 3.5. Кожен доданок у знаменнику відділяємо від іншого пробілом, якщо нам потрібно не враховувати якийсь із доданків, то в коефіцієнт записуємо 0. Наприклад, у нашій функції відсутній компонент s , у другому коефіцієнті записуємо 0 і рядок коефіцієнтів буде такий: 0.01 0 1. Аналогічно працює рядок чисельника.

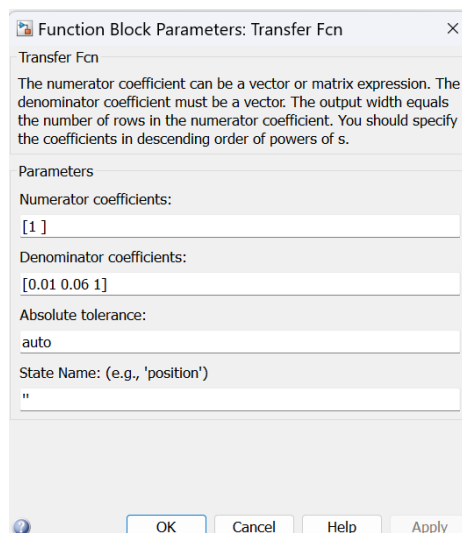


Рисунок 3.5 – Запис підрахованих коефіцієнтів до Transfer Fcn

Наступним кроком запускається розрахунок моделі (див. розділ 2). Слід натиснути Play, потім клацнути на віконце Scope, потім – на «атвомасштаб» (бінокль). Вийшло щось схоже на коливальний процес, який триває приблизно 3 секунди, однак має коливання нестабільного характеру.

При зміні часу моделювання з 10 до 3 секунд (налаштування часу знаходяться праворуч від кнопок Play та Stop) розглянемо більш детально тривалість симуляції (рисунок 3.6).

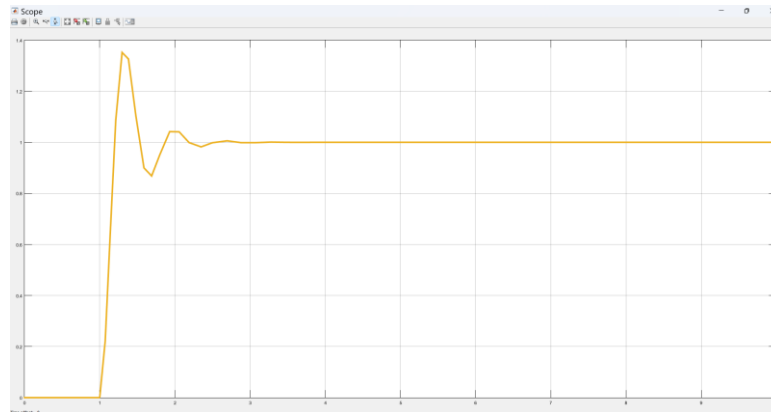


Рисунок 3.6 – Результати моделювання у вікні осцилографа

Наявні якісь неточності, особливо в області піку сигналу. У командному рядку MatLab з'являється попередження: «Обрано дефолтний максимальний крок стільки-то, якщо насправді все ок». У нас все не ок (Simulink автоматично вибрав надто великий крок інтегрування).

Розглянемо вирішувачі Simulink. Натискаємо Simulation > Configuration Parameters... і бачимо велику кількість меню і полів (рисунок 3.7). У вирішувачі (Solver) вибираємо метод, яким будемо розв'язувати диференціальні рівняння. Це може бути метод з постійним кроком або змінним. Є припущення, що систему диференціальних рівнянь будь-якого рівня складності можна розв'язати методом Ейлера, шляхом зменшення кроку.

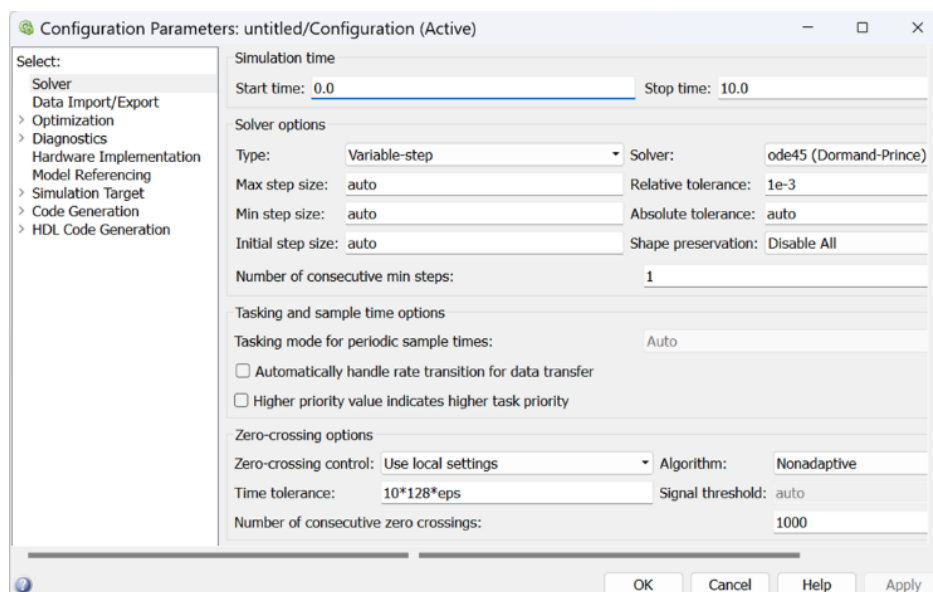


Рисунок 3.7 – Налаштування параметрів вирішувача

Це означає: якщо у перехідному процесі тривалістю 5 секунд є момент тривалістю 0.1 секунд, який потрібно обчислювати з кроком 0.1 мілісекунд (наприклад, шток гідроциліндра б'ється об обмежувач), решту 4.9 секунд, коли гідроциліндр спокійно рухається, маємо обчислювати все одно з кроком 0.1 мілісекунд. Час розрахунку в цьому випадку набагато збільшується і для важких задач може становити кілька годин, тому математики користуються алгоритмами зі змінним кроком: у відповідальні моменти вирішувач розв'язує диференціальні рівняння, зменшуючи крок настільки, наскільки це потрібно, а коли все «спокійно», збільшує крок, заощаджуючи час.

Трапляються випадки, коли потрібно розв'язувати диференціальні рівняння саме з постійним кроком, але в більшості випадків все ж таки змінний крок значно кращий.

Наступний рядок меню – вибір вирішувача. Це глибокий математичний аналіз, вникати в нього особливо не будемо. Help MatLab дуже рекомендує вирішувач ode45. З наведених там таблиць випливає, що він найточніший, з одним лише застереженням: якщо завдання не жорстке. Під жорсткістю мають на увазі жорсткість чи нежорсткість диференціальних рівнянь математичної моделі, а між ними грань досить розпливчата. Одне і те ж диференціальне рівняння може бути як жорстким, так і нежорстким, залежно від коефіцієнтів. У нашому випадку – це постійні часу різних елементів системи. Якщо вони відрізняються на кілька порядків (наприклад, постійна часу «хорошого» електрогідравлічного усиливача (ЕГУ) та «поганого гідроциліндра» (проблемного компонента, який вносить запізнення, коливання, і створює жорсткість у системі)), то швидше за все нежорсткий вирішувач типу ode45 стане нестабільним і видасть мегарозбіжний перехідний процес. У цьому випадку потрібно використовувати жорсткі вирішувачі, позначені буквою s (stiff). Тут найточнішим є вирішувач ode15s.

Отже, *тривіальні задачі розв'язуємо за допомогою стандартного методу ode45, задачі з елементами системи з постійними часу, що явно розрізняються (як-от гідроприводи), розв'язуємо з ode15s.* Якщо нічого не виходить, встановлюємо метод Рунге - Кутти четвертого порядку (ode4) з кроком 0.1 мікросекунд і залишаємо комп'ютер рахувати.

Вибираються максимальний, мінімальний та початкові кроки. Максимальний крок інтегрування має значення 0.001 секунд (1 мілісекунд). Встановлення цього кроку може бути ефективним способом «перестрахуватися» та покращити стабільність моделювання, особливо в системах з потенційно швидкими змінами. Тепер, навіть якщо вирішувач сприймає систему як просту, він не зможе здійснювати кроки інтегрування довші, ніж 1 мілісекунда.

Тиснемо OK і потім Play. Результат буде таким, як показано на рисунку 3.8.

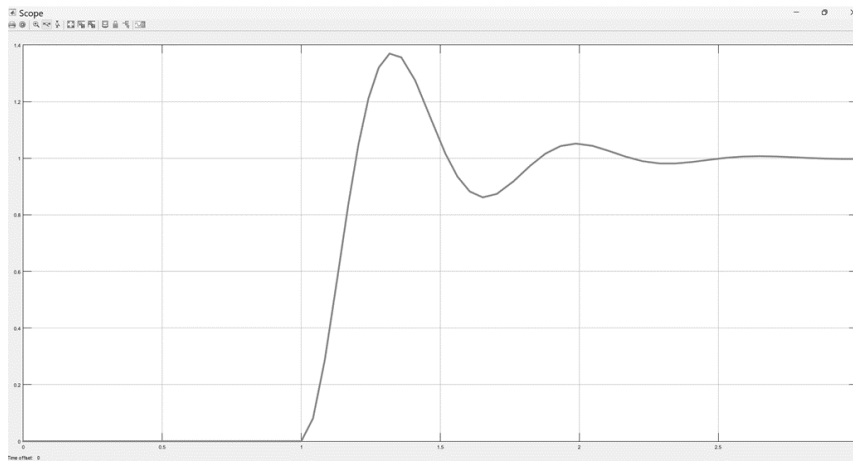


Рисунок 3.8 – Результати моделювання у вікні осцилографа

До речі, кілька слів про налаштування графіків. Поруч із кнопкою принтера є кнопка Параметри, тут можна налаштувати, наприклад, кількість осей. У цьому випадку біля вікна Scope з'явиться кілька входів та графіки будуть розташовуватися один під одним. Щоб розташувати кілька графіків на одному, потрібно використати блок Mux (рисунок 3.9). Цей блок дозволяє об'єднати декілька сигналів в один.



Рисунок 3.9 – Блок Mux

У цьому випадку кілька сигналів можна записати в один Scope і у вікні вони відображатимуться різними кольорами (налаштування див. у розділі 2).

Використання розширення Control Design

Як будувати логарифмічні амплітудні та фазові показники? Першим кроком потрібно показати системі, де вхід і де вихід. Тиснемо ПКМ на лінію між сходиною та передавальною функцією, вибираємо Linearization Points > Input Point. Далі, між передавальною функцією та виходом відповідно ставимо Output Point для визначення точки виходу. Після виконання цих кроків модель матиме вигляд, як на рисунку 3.10.

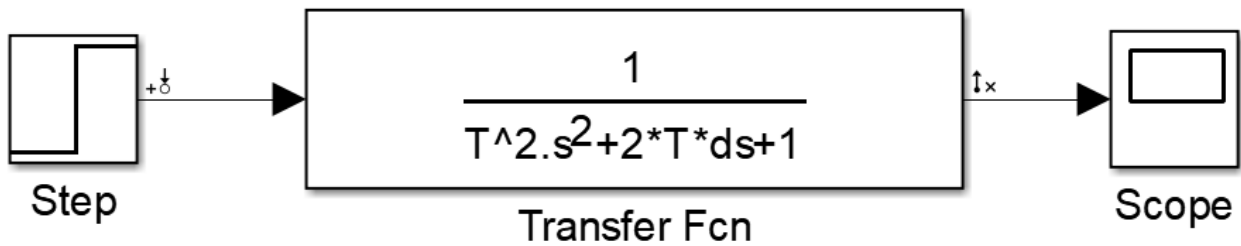


Рисунок 3.10 – Проста модель коливальної ланки в Simulink з контрольними точками

Тепер, коли ми визначили точки входу і виходу, переходимо до побудови логарифмічних амплітудних і фазових характеристик. Для цього в меню Analysis натиснемо Control Design > Linear Analysis. Після натискання цієї опції, Simulink автоматично проведе лінійний аналіз системи, і ми отримаємо результат, зображений на рисунку 3.11.

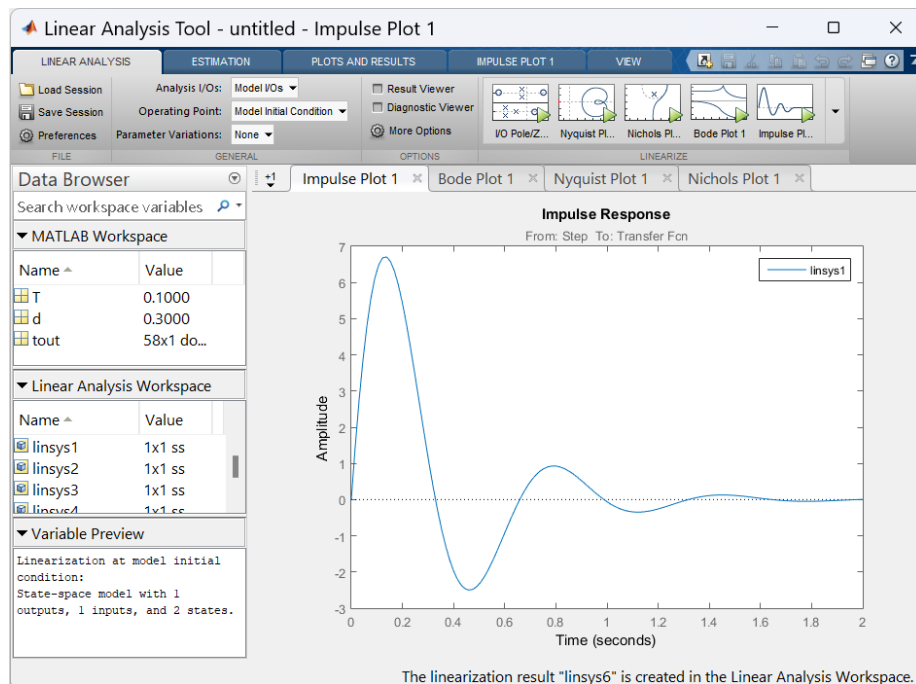


Рисунок 3.11 – Робоче вікно Linear Analysis

Налаштувань багато, за бажанням можна поміняти виходи на входи або взагалі деактивувати деякі точки для спрощення моделювання або отримання більш точних результатів. Вибираємо в Linear Analysis потрібну модель.

Після тривалої роботи програма врешті видала перехідний процес, який ми вже бачили. Але це не все. У цьому вікні можна не тільки намалювати логарифмічну сітку та змінити розмірність горизонтальної осі з рад/с (радіан на секунду) на Герці (перетворення виконується за формулою: $f \text{ (Герц)} = \omega \text{ (рад/с)} / (2\pi)$), але і в автоматичному режимі розставити запаси

по фазі та амплітуді; а також визначити, чи є система стійкою (якщо запас є), чи нестійкою (якщо запасу немає).

Використання Simscape

Розглянемо використання Simscape на прикладі гідроприводів. Щоб створити гідравлічний елемент, який постійно використовується в моделях (як-от дросель, гідроциліндр, кромки розподільника) в Simulink, потрібно постаратись. Але розробники вирішили це питання і винесли гідравлічний елемент в окрему бібліотеку Simscape, де наявна велика кількість елементів, а найголовніше – зміст кожного блока докладно описано з усіма формулами в Help.

Для того щоб швидко опанувати цю бібліотеку, зберемо просту схему, що складається з гідроциліндра, розподільника 4/3 та джерела постійного тиску.

Щоб створити модель гідравлічної системи, нам потрібно знайти відповідні блоки в бібліотеці Simscape. У ній, у свою чергу, є багато різних підкатегорій для моделювання механічних, електричних, магнітних та інших фізичних процесів. Гідравлічні елементи розташовані у двох папках бібліотеки Simscape: Foundation Library/Hydraulic та SimHydraulics (рисунок 3.12).

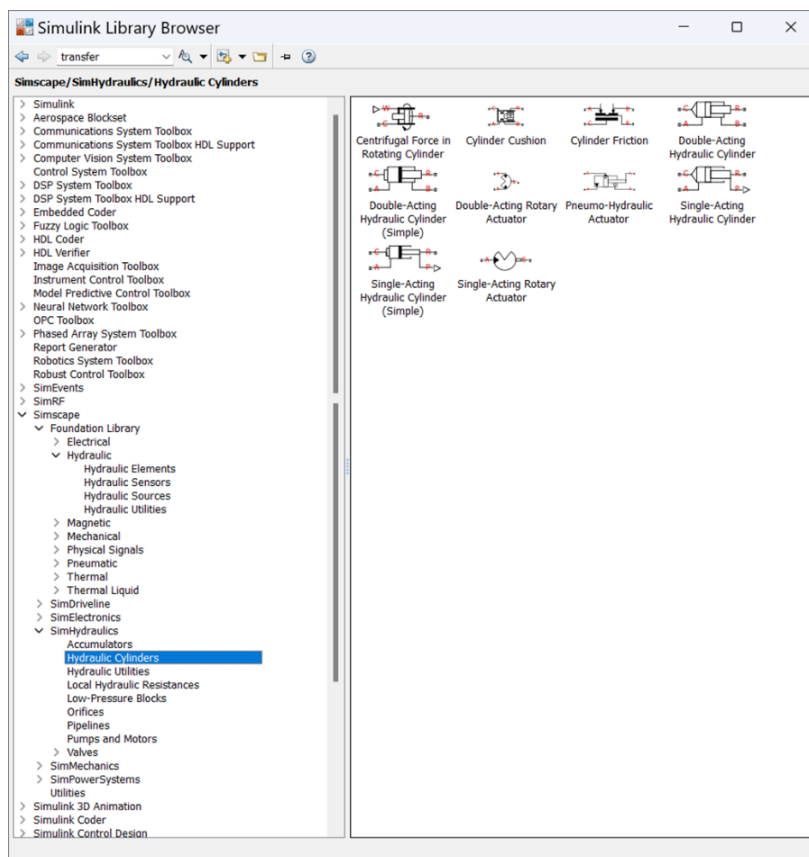


Рисунок 3.12 – Гідравлічні елементи бібліотеки Simscape

Залишилося перетягнути необхідні елементи на форму. Найпростіше знайти джерело тиску в бібліотеці основних елементів.



Рисунок 3.13 – Гідравлічне джерело тиску (насос)

Схема досить проста: є два гідравлічні входи та один керувальний вхід, який визначає, який тиск буде подаватися до лінії P (подача) відносно лінії T (злив) (рисунок 3.13). Однак на вхід для керувального сигналу не можна просто відправити сигнал із блоків Simulink, бо цей сигнал «фізичний». Для того щоб надати цьому блоку конкретне значення, слід використати перетворювач, який можна знайти в бібліотеці Utilities, а саме – блок Simulink-PS Converter (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Перетворювачі бібліотек Simulink та Simscape

На його вхід можна передавати сигнали для Simulink, а він буде їх перетворювати на сигнали для Simscape. І навпаки, якщо потрібно передати щось від Simscape до Simulink, то використовуємо PS-Simulink Converter. Але це ще не все. Відкриємо параметри перетворювача PS-Simulink Converter (рисунок 3.15).

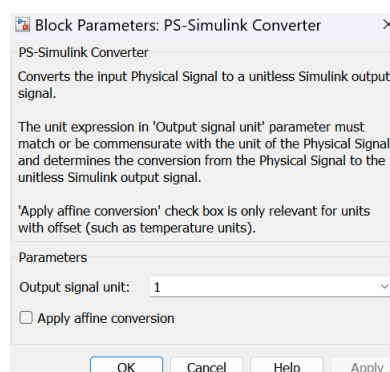


Рисунок 3.15 – Параметри перетворювача

У цьому вікні можна змінювати розмір сигналу. Щоб не відправляти на вхід константу у вигляді «16e6» та змусити блок тиску видавати постійно 16 МПа, можна просто у цьому віконці вписати «MPa» (без лапок), або, ще краще, «bar», або вибрати з переліку. Це дуже зручно.

Перейдемо до розподільника. У Simulink є дуже великий вибір розподільників. Зупинимось на розподільнику 4/3 із закритим центром.

Виберемо 4-Way Directional Valve (рисунок 3.16).

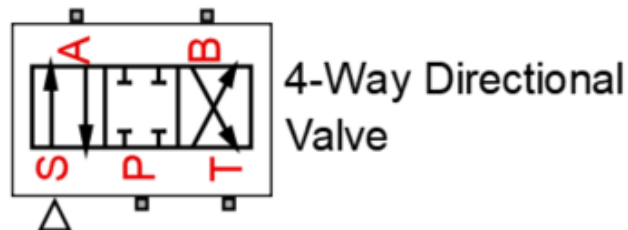


Рисунок 3.16 – Розподільник 4/3 із закритим центральним положенням

Цей розподільник містить чотири гідравлічні канали (тиск, злив, лінії A і B) та вхід для керувального сигналу, який відповідає за зміщення золотника. За версією Help, усередині цей блок має такий вигляд, як показано на рисунку 3.17.

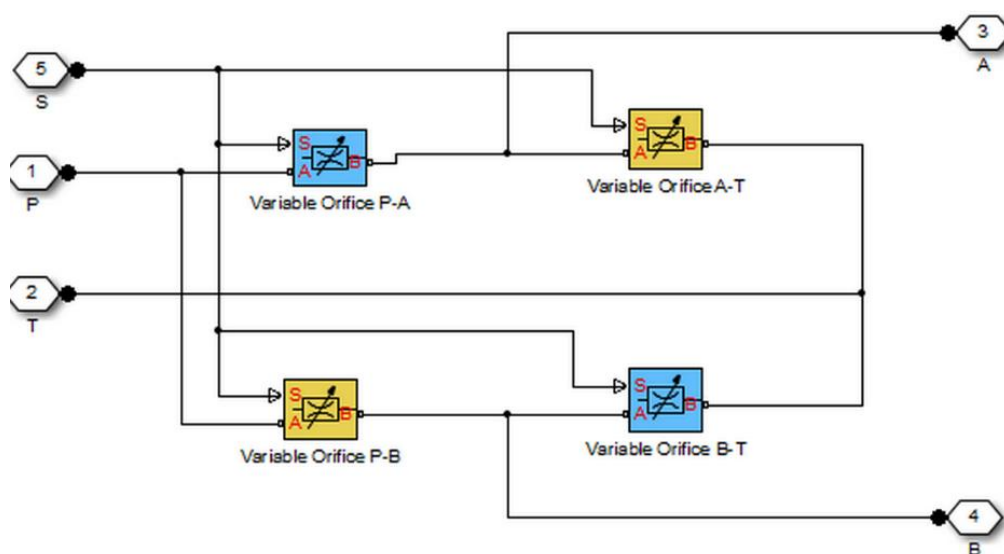


Рисунок 3.17 – Внутрішня будова розподільника

Чотири кромки змінюють свій гідравлічний опір залежно від вхідного керувального сигналу. Залишається лише визначити, як саме цей опір змінюється відповідно до ступеня відкриття. Цю властивість можна налаштувати у вікні параметрів розподільника (рисунок 3.18).

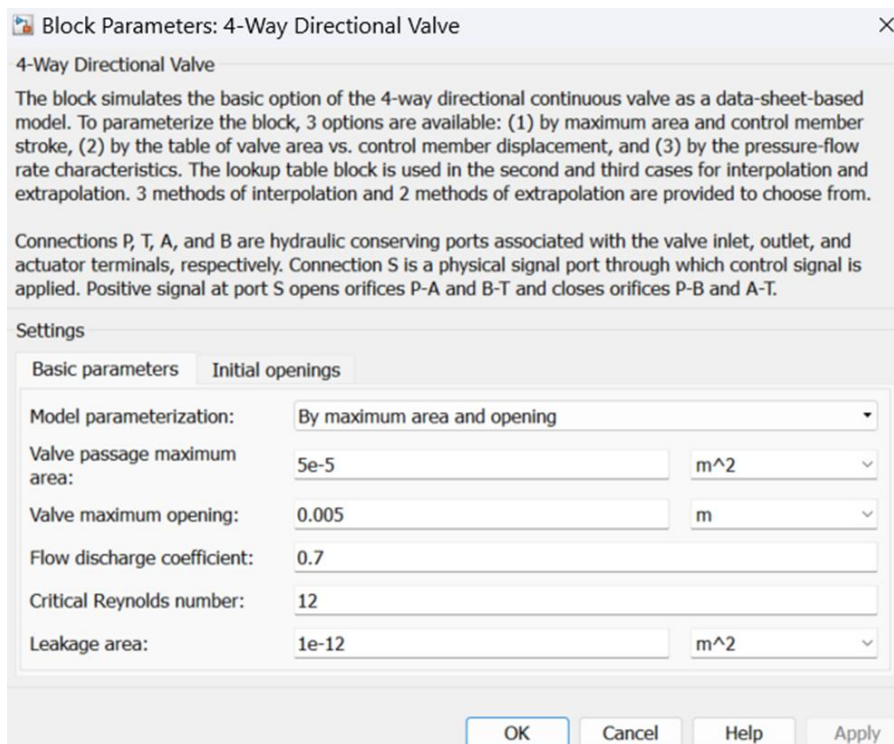


Рисунок 3.18 – Вікно параметрів розподільника

Статичні характеристики розподільника можна задати трьома способами:

- 1) за максимальним відкриттям та відповідною йому площею (у цьому випадку витрата при постійному перепаді змінюватиметься лінійно);
- 2) за таблицею відповідності зміщення золотника та площі відкриття;
- 3) за таблицею витратно-перепадної характеристики.

У навчальному прикладі виберемо найпростіший варіант витратно-перепадної характеристики за максимальним відкриттям. Введемо такі параметри:

- максимальний об'єм котушки – 3 мм;
- максимальна площа розкриття – $1.855 \times 10^{-6} \text{ м}^2$;
- коефіцієнт витрати – 0,63;
- число Рейнольдса, після якого режим стає ламінарним – 12 (за замовчуванням);
- площа «отвору» в золотнику в нулі – теж за замовчуванням.

Нарешті, вибираємо найцікавіший елемент системи – гідроциліндр. Для моделювання припустимо, що його шток є непрохідним. У моделі будемо враховувати стисливість робочої рідини, а також вплив удару об упор.

У розділі Hydraulic Cylinders бачимо багато різних елементів, із них у версії Simulink – як мінімум чотири варіанти гідроциліндрів, половина з яких односторонньої дії. Залишається вибрати із двох гідроциліндрів. Для цього

доведеться переглянути в Help опис кожної моделі. Двома словами, спрощена модель гідроциліндра (Double-Acting Hydraulic Cylinder (Simple)) не враховує стисливість рідини. Це означає, що швидкість гідроциліндра буде прямо пропорційна поступальній витраті, а тиск – зовнішньому навантаженню. Такі характеристики не влаштовують, тому розглянемо повну модель гідроциліндра Double-Acting Hydraulic Cylinder, схематично зображену на рисунку 3.19.

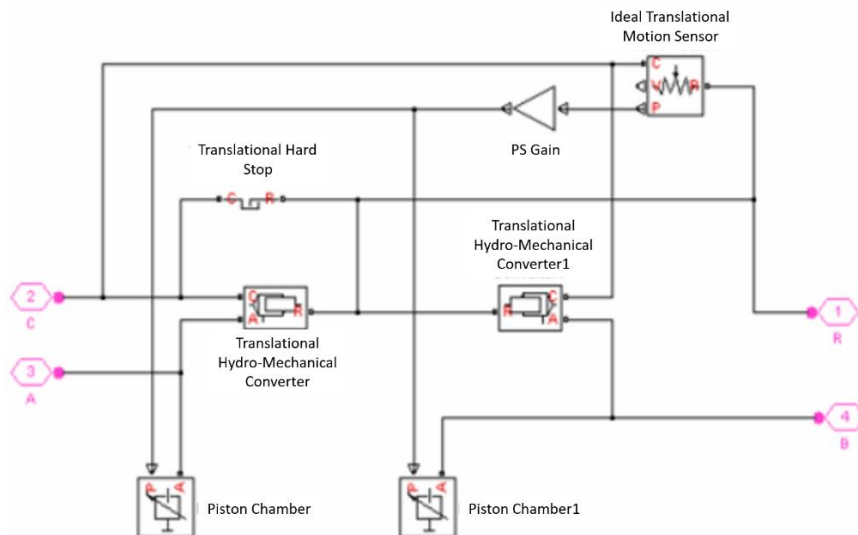


Рисунок 3.19 – Повна модель гідравлічного циліндра

Основні елементи – два поршні (Translational Hydro-Mechanical Converter), з'єднані між собою одним механічним зв'язком. Вони перетворюють подану (або відведену) витрату рідини у швидкість переміщення, просто ділячи витрату на задану площу. Тобто це той самий спрощений гідроциліндр. Однак до порожнин цих поршнів підключено змінні об'єми Piston Chamber. Об'єм у цьому блоці обчислюється як добуток площі поршня на поточне положення гідроциліндра.

Про цей блок теж краще почитати в Help, але суть у тому, що тиск у цьому випадку змінюється не раптово, а за такою залежністю:

$$\dot{p} = \frac{E}{V} \sum Q, \quad (3.2)$$

де $\dot{p}$ – похідна тиску за часом (швидкість зміни тиску);

E – модуль пружності рідини (який залежить від тиску. Ця залежність обраховується в цьому блоці, і формула написана в Help);

V – об'єм рідини;

$\sum Q$ – алгебрична сума витрат, що надходять у цей об'єм (витрата, що надходить в об'єм, збільшує тиск, а витрата, що виходить з об'єму, його зменшує).

Крім цього, до моделі доданий жорсткий стоп, що являє собою пружину та демпфер, які починають працювати, коли поршень сягає одного з крайніх положень.

У цій моделі з'явився новий вид каналу – механічний. Логічно, що гідроциліндр для своєї продуктивної роботи має бути, по-перше, закріплений, а по-друге, до чогось приєднаний. Нехай у нашому випадку він буде закріплений абсолютно жорстко і рухатиме якусь масу.

Усі необхідні елементи можна знайти у розділі Foundation Library > Mechanical. Опорний порт С гідроциліндра підключається до блоку «земля», тоді як до порту штока під'єднуються маса та демпфер. У результаті побудована схема матиме вигляд, як на рисунку 3.20.

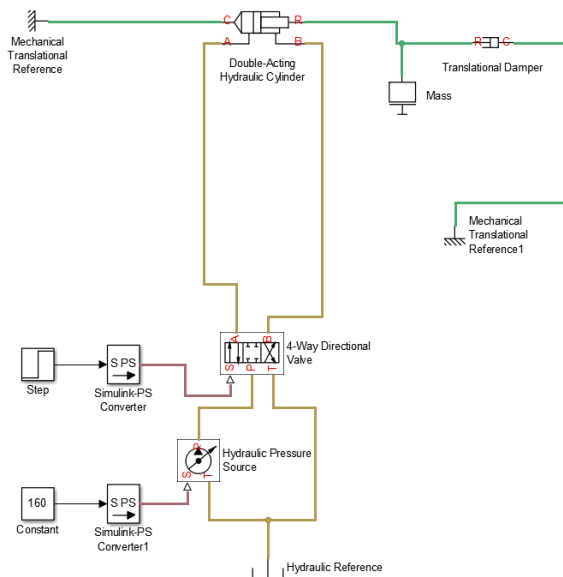


Рисунок 3.20 – Схема для дослідження роботи гідравлічного циліндра

Параметри гідроциліндра списуємо з вікна параметрів, показаного на рисунку 3.21 (вони нам знадобляться далі).

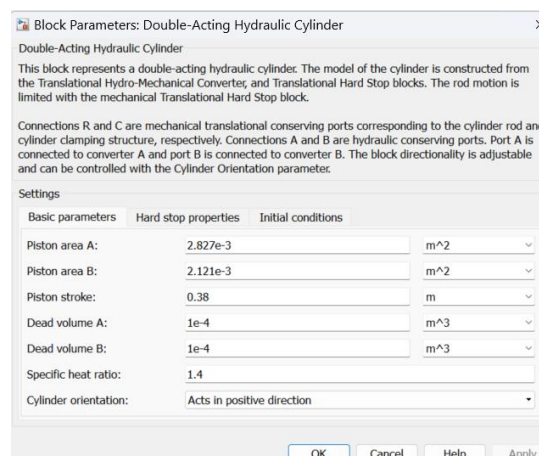


Рисунок 3.21 – Вікно параметрів гідравлічного циліндра

Параметри жорсткого стопа та початкового положення залишаємо за замовчуванням.

Маса – 2000 кг.

Параметри демпфера – за замовчуванням.

Сходинка висотою 3 мм (конвертер налаштований на міліметри) і з'являється через 0,1 с.

Начебто все, але під час моделювання з'явиться багато помилок, а спостерігати процес ми не зможемо.

Нам не вистачає трьох важливих елементів: по-перше, блока з параметрами рідини; по-друге, вікон, де спостерігається зміна параметрів; по-третє, блока вирішувача, що є вкрай необхідним для всіх моделей в Simscape.

Розпочнемо з основного етапу – приєднаємо до системи у будь-якому місці блок рідини Hydraulic Fluid і відразу переглянемо його параметри (рисунок 3.22).

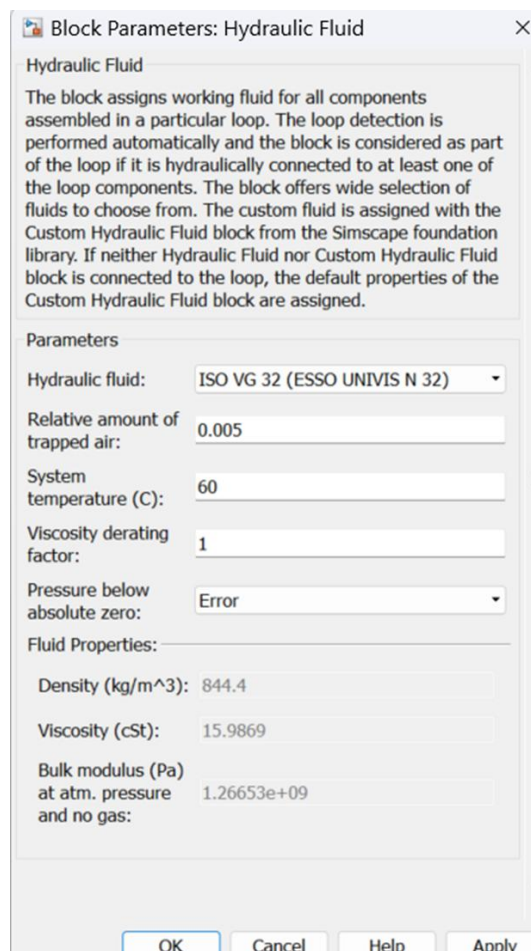


Рисунок 3.22 – Вікно параметрів блока Hydraulic Fluid

У цьому списку можна вибрати вже наявні рідини, і в нашій системі відразу будуть відомі параметри щільності, в'язкості, вмісту повітря, модуля пружності і т. ін.

Відразу ж підключимо і вирішувач. Його можна знайти в розділі Utilities, та змінювати в ньому нічого спочатку особливої потреби немає.

Для того, щоб виконати вимірювання, постараємося вивести на один графік сигнал із золотника та переміщення штока гідроциліндра. Крім цього, цікаво подивитися, як змінюється витрата через золотник та тиск у робочих порожнинах. Для того, щоб виконати вимірювання, постараємося вивести на один графік сигнал із золотника та переміщення штока гідроциліндра. Крім цього, цікаво подивитися, як змінюється витрата через золотник та тиск у робочих порожнинах.

Найпростіше вивести на графік керувальний сигнал. Наша схема вже досить переобтяжена, тому краще зробити це, використовуючи блоки Goto та From у розділі бібліотеки Simulink, що називається Signal Routing. Це матиме приблизно такий вигляд, як показано на рисунку 3.23.

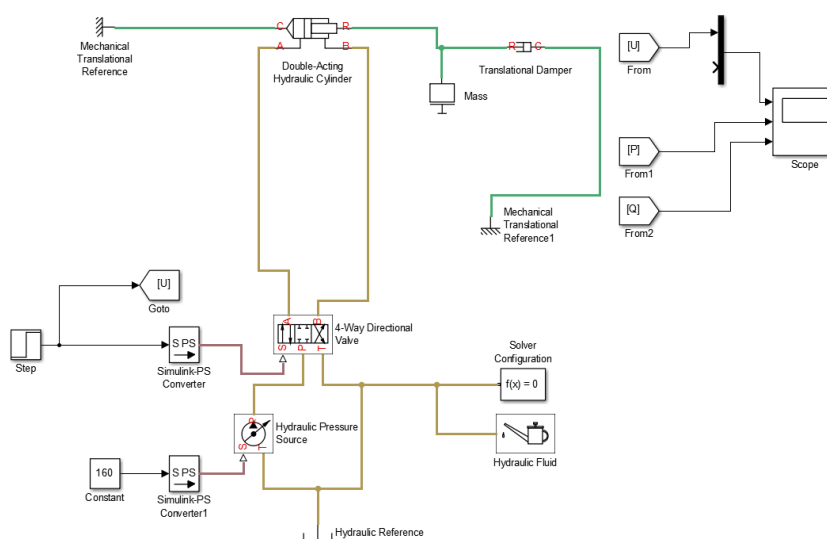


Рисунок 3.23 – Розширена схема дослідження роботи гідравлічного циліндра

Як видно, із бажаних чотирьох сигналів отримали через блок Goto тільки один сигнал. Розглянемо, як отримати решту.

Найпростіше справа з вимірюванням тиску. Для цього використовується датчик тиску (Hydraulic Pressure Sensor), який під'єднується до відповідної точки системи, де необхідно зчитати тиск. Другий вихід датчика можна з'єднати або з «відром» (тобто зі зливом/резервуаром), або з іншою порожниною гідроциліндра — якщо потрібно виміряти перепад тисків між двома камерами. Отриманий сигнал передається через перетворювач (налаштований на відповідні одиниці — бари або мегапаскалі) до блоку Goto для подальшої обробки або візуалізації.

Датчик переміщення аналогічно одним кінцем під'єднуємо до штока гідроциліндра, іншим — до корпусу або основи (умовно — до «землі»). Конвертер налаштовуємо на метри. Датчик витрати потрібно вбудовувати

прямо в лінію так, щоб уся витрата робочої рідини йшла через нього. Якщо ж під'єднати датчик витрати «до відра» (тобто до зливної лінії, в обхід гідроциліндра), то уся рідина просто піде на злив, і гідроциліндр не отримає тиску. В такому випадку виконавчий механізм не працюватиме, а дані з датчика не відображатимуть реальної витрати, пов'язаної з роботою циліндра.

Перетворювач налаштовуємо на l/min.

Унаслідок цих змін схема матиме приблизно такий вигляд, як показано на рисунку 3.24.

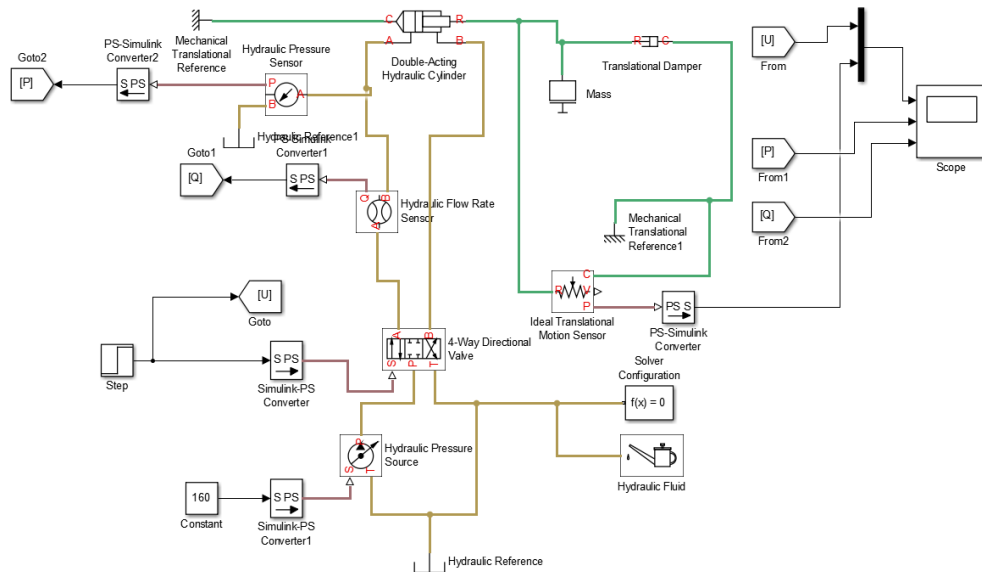


Рисунок 3.24 – Розширена схема дослідження роботи гідравлічного циліндра

Настійно рекомендується перед запуском зменшити максимальний крок інтегрування до 0.001 секунд та у параметрах графіка зняти обмеження на максимальну кількість точок, що виводяться, у противному разі отримаєте лише шматок графіка.

Після запуску отримаємо приблизно таку картину (рисунок 3.25).

Невдалий вибір масштабу для виведення керувального сигналу та переміщення гідроциліндра може суттєво ускладнити аналіз результатів моделювання. Це можна виправити, якщо розділити сигнал на певну константу перед його виведенням на графік або взагалі перевести всі величини у безрозмірний вигляд. Використовуючи ці методи, можна покращити відображення керувального сигналу та переміщення гідроциліндра на графіку та зробити аналіз результатів моделювання більш ефективним.

Уже зараз можна бачити, що модель реагує більш-менш адекватно. При відкритті золотника тиск і витрата збільшуються стрибкоподібно і шток починає рухатися. При наїзді на жорсткий стоп (який виявився змодельованим як пружинний елемент) тиск у порожнині різко зростає до

максимального значення, а витрата відповідно зменшується до нуля. Як результат – рух штока припиняється, що підтверджує правильну роботу моделі й наявність симуляції динаміки у крайових станах.

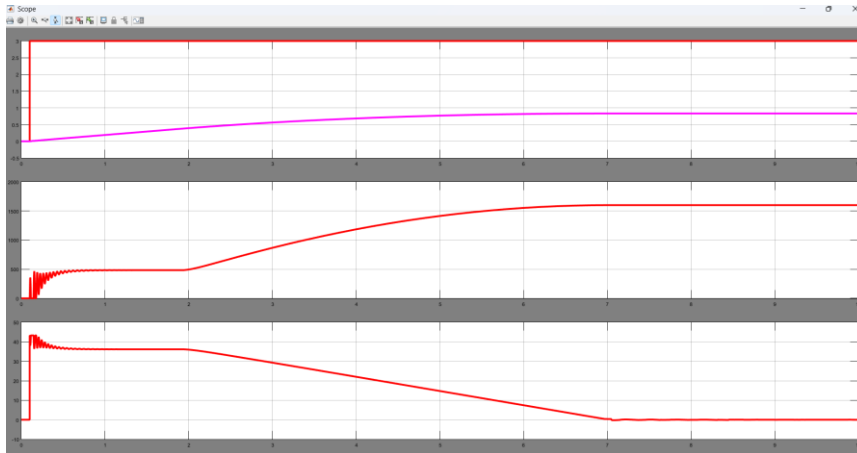


Рисунок 3.25 – Результати роботи гідравлічного циліндра на осцилографі

Таким чином створена модель гідроприводу, в якій мимоволі враховано безліч дрібниць, що при складанні диференціальних рівнянь зазвичай не враховують (зміна модуля пружності рідини від тиску, жорсткий стоп тощо).

На цьому перша практична робота закінчена, переходимо до практичної роботи № 2 про моделювання складних механізмів у SimMechanics та візуалізації їх роботи.

Контрольні запитання

1. Що таке передавальна функція?
2. Який елемент бібліотеки може вивести результат роботи передавальної функції?
3. Які головні параметри налаштування вирішувача (Solver) в MatLab?
4. Для чого призначена бібліотека SimHydraulics?
5. Для чого потрібен перетворювач бібліотек Converter?
6. Назвіть головні елементи гідравлічної схеми.
7. Як виміряти витрати рідини в гідравлічній системі?
8. Як виміряти тиск рідини в гідравлічній системі?
9. Що відбуватиметься з гідравлічним циліндром, якщо на обидва входи подати рідину з однаковим тиском?
10. Які функції розподільника та принцип його роботи?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.

3. Створити модель, як на рисунку 3.10, налаштувати її роботу та показати графіки.
4. Створити модель, як на рисунку 3.20, налаштувати її роботу та показати графіки.
5. Створити модель, як на рисунку 3.24, налаштувати її роботу та показати графіки.
6. Відповіді на контрольні запитання.
7. Файл з моделями.

Практична робота № 2

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ БЛОКІВ SIMSCAPE НА ПРИКЛАДІ ПОБУДОВИ ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ

Мета роботи: засвоїти основні елементи бібліотеки Simscape на прикладі побудови простої моделі (підвіски автомобіля), навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та виконувати дослідження моделі, змінюючи параметри моделі.

Завдання:

1. Скласти та відредагувати прості схеми.
2. Правильно встановити вимірювальні прилади та їх налаштувати.
3. Створити схему за прикладом та налаштувати параметри.
4. Проаналізувати результати, зробити висновки та оформити звіт.

Порядок виконання роботи

Виконаємо роботу, що ілюструє основні етапи побудови фізичної моделі та знайомить з використанням основних блоків Simscape. Проведемо моделювання простої механічної системи та дослідимо її поведінку за різних умов.

На рисунку 3.26 зображено схему простої моделі підвіски автомобіля, що складається з пружинного елемента (жорсткість) та демпфера, підключеного до тіла автомобіля (поданого у вигляді маси). До цієї маси прикладається зовнішня сила, що спричиняє її переміщення. У моделі можна змінювати такі параметри, як жорсткість пружини, маса тіла або профіль сили, а також аналізувати, як ці зміни впливають на швидкість і положення тіла.

Щоб створити еквівалентну схему Simscape, виконайте такі дії:

1. Відкрийте браузер Simulink® бібліотеки.

2. Створіть нову модель. Для того, щоб це зробити, на верхній панелі меню бібліотечного браузерa виберіть File > New > Model. Програма створить порожню модель у пам'яті та відобразить її у новому вікні редактора моделі.

3. Відкрийте бібліотеку Simscape > Foundation Library > Mechanical > Translational Elements Library.

4. Перетягніть масу, пружину поступального переміщення, поступальний демпфер та два механічні поступальні опорні блоки у вікно моделі.

5. Розташуйте блоки, як показано на рисунку 3.27. Щоб повернути блок, виділіть його та натисніть Ctrl + R.

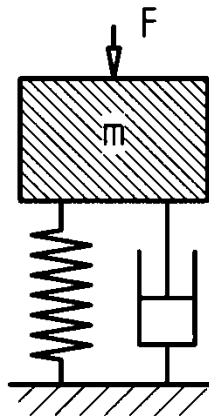


Рисунок 3.26 – Проста схема моделі підвіски автомобіля

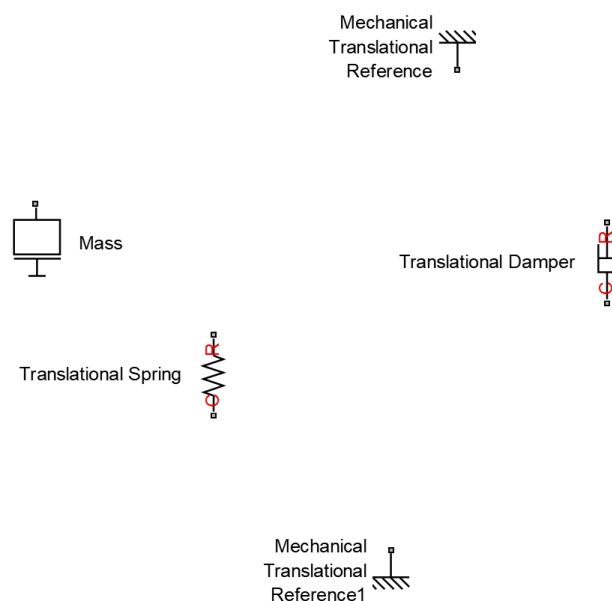


Рисунок 3.27 – Розміщення блоків моделі підвіски автомобіля

6. Під'єднайте пружину, демпфер та маси блоків до одного з блоків Mechanical Translational Reference, як показано на рисунку 3.28.

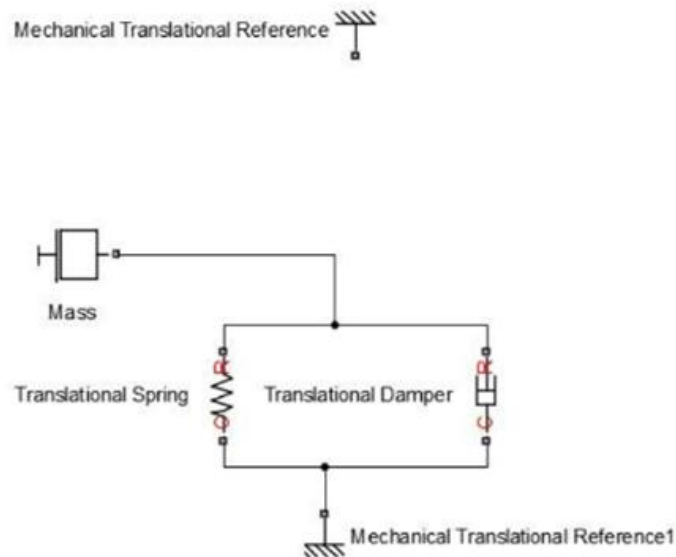


Рисунок 3.28 – З'єднання частини елементів моделі підвіски автомобіля

7. Щоб додати силу, що діє на масу, відкрийте бібліотеку Simscape > Foundation Library > Mechanical > Mechanical Sources library та додайте блок Ideal Force Source на діаграмі.

Щоб відобразити правильний напрямок сили, показаної на оригінальній схемі, переверніть блок, вибравши Diagram > Rotate & Flip > Flip Block > Up-Down у верхньому рядку меню вікна моделі. Під'єднайте блок до порту C (case) на другий блок Mechanical Translational Reference та його порт R (rod) до блока маси, як показано на рисунку 3.29.

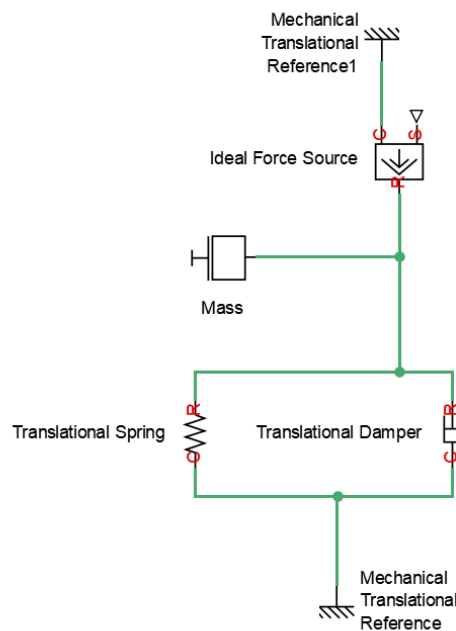


Рисунок 3.29 – Приєднання блока Ideal Force Source

8. Додайте датчик для вимірювання швидкості та положення маси. Помістіть блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Mechanical Sensors у діаграмі та під'єднайте його, як показано на рисунку 3.30.

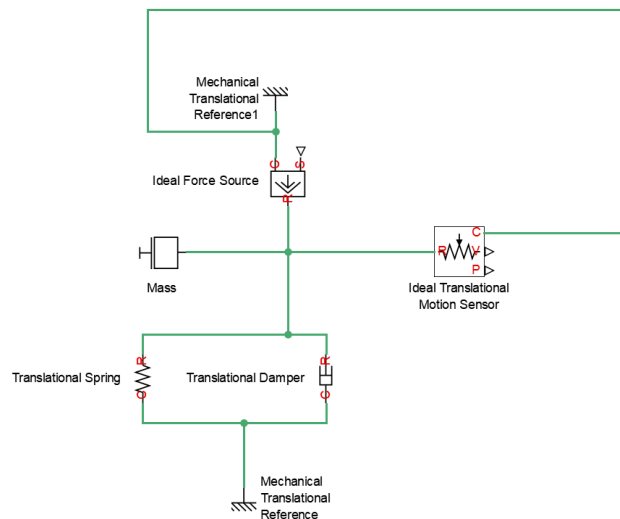


Рисунок 3.30 – Під'єднання сенсора

9. Тепер додайте джерело та осцилографи (Scopes) з основної бібліотеки Simulink (рисунок 3.31). Відкрийте бібліотеку Simulink > Sources та скопіюйте блок сигналу Builder у модель. Потім відкрийте бібліотеку Simulink > Sinks та скопіюйте два блоки осцилографів. Перейменуйте один із блоків осцилографів на «швидкість», а інший – на «положення».

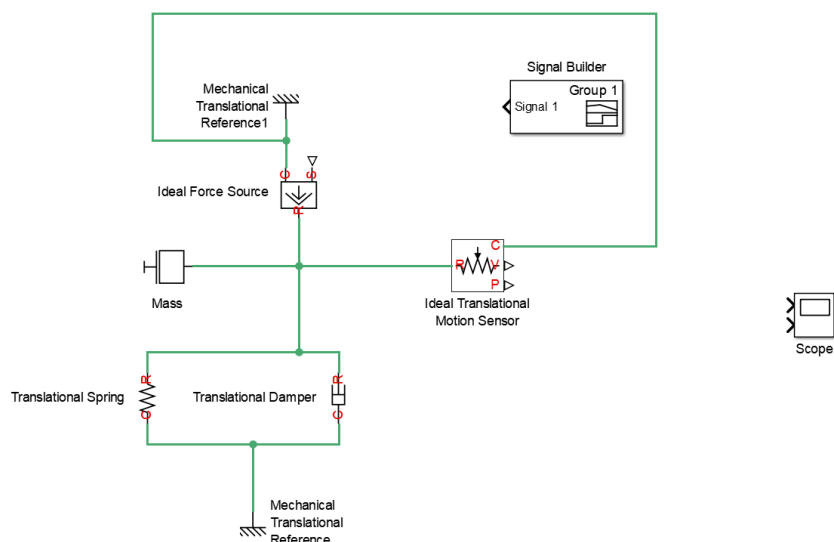


Рисунок 3.31 – Додані до схеми джерело сигналу та осцилографи

10. Щоразу, коли під'єднуєте джерело або осцилограф Simulink до діаграми Simscape, слід використовувати відповідний перетворювач блока, щоб перетворити сигнали в Simulink на фізичні сигнали і навпаки. Відкрийте

бібліотеку Simscape > Utilities та скопіюйте блок Simulink-PS Converter та два блоки PS-Simulink Converter у модель. Під'єднайте блоки, як показано на рисунку 3.32.

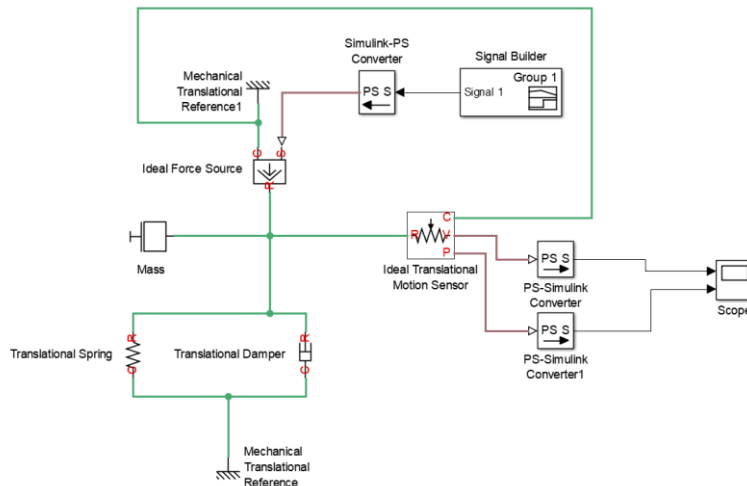


Рисунок 3.32 – Під'єднання елементів різних бібліотек через перетворювачі

11. Кожна топологічно різна фізична мережа у діаграмі потребує одного блока Solver Configuration, знайденого у бібліотеці Simscape > Utilities. Скопіюйте цей блок у модель та під'єднайте його до ланцюга шляхом створення точки розгалуження (branch point) та під'єднання цієї точки до порту тільки блока Solver Configuration. Схема повинна мати такий вигляд, як на рисунку 3.33.

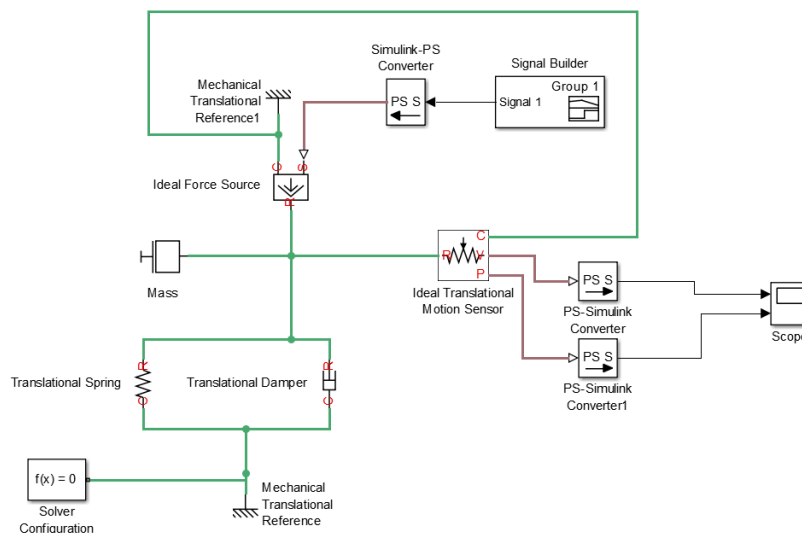


Рисунок 3.33 – Під'єднання вирішувача

12. Блок-схему завершено. Збережіть її (назву запишіть латиницею).

Зміна початкових налаштувань. Коли зібрали блок-схему моделі, як описано в розділі 2, наступним кроком є налаштування параметрів моделювання, зокрема вибір вирішувача (solver) та інших конфігураційних параметрів. Це критично важливо для коректної та ефективної роботи моделі.

Зміна початкових налаштувань

1. Виберіть вирішувач Simulink. На верхній панелі меню вікна моделі виберіть Simulation > Model Configuration Parameters. Відкриється діалогове вікно Configuration Parameters, показуючи розділ Solver (вирішувач).

У Solver Options (Опції вирішувача) виберіть метод ode23t (mod.stiff/Trapezoidal) та подивіться, як використання ode23t допоможе розв'язати проблеми, пов'язані з жорсткістю системи (рисунок 3.34). У додаткових опціях встановіть максимальний розмір кроку 0.2.

Зверніть увагу, що час моделювання вказано в межах від 0 до 10 секунд, цього достатньо для аналізу перехідних процесів у системі. Можете налаштувати цей параметр пізніше, якщо це необхідно.

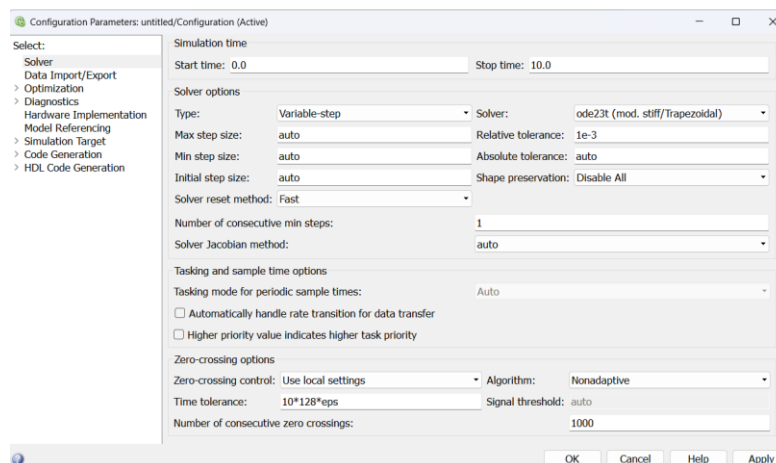


Рисунок 3.34 – Налаштування параметрів вирішувача

Натисніть ОК, щоб закрити діалогове вікно параметрів конфігурації. Збережіть модель.

Запуск симуляції

Після того як зібрано блок-схему та вказано початкові параметри для моделі, можна запустити симуляцію.

Вхідний сигнал сили надходить від блоку Signal Builder, у якому задано типовий профіль сигналу, зображений на рисунку 3.35. Сигнал починається зі значення 0, на 4 секунді відбувається стрибок до значення 1, а потім крок

змінюється назад на 0 на шостій секунді. Цей профіль встановлено за замовчуванням.

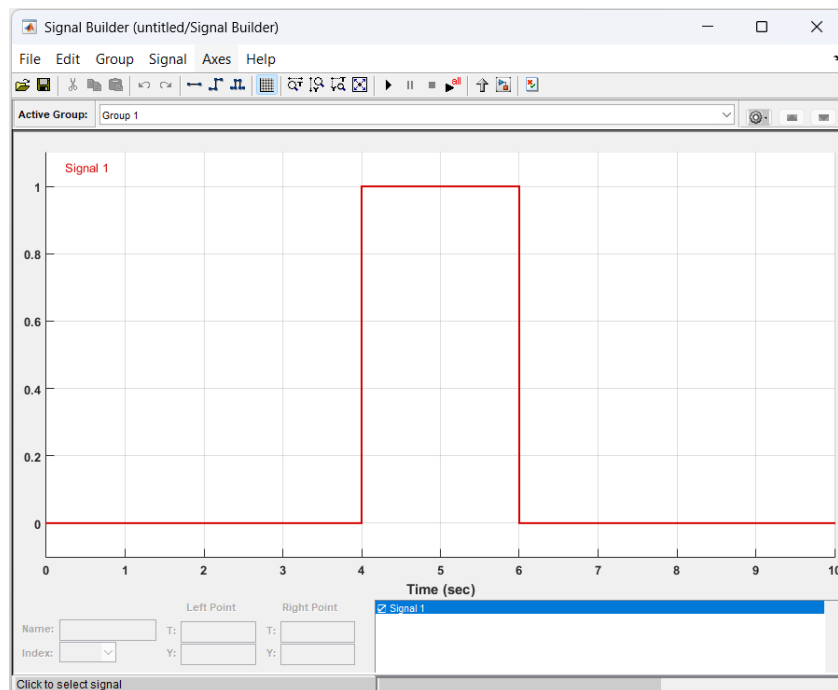


Рисунок 3.35 – Формування вхідного сигналу в блоці Builder

Осцилограф швидкості виводить швидкість маси, а осцилограф положення виводить значення переміщення маси залежно від часу.

Запускаємо симуляцію Simscape: вирішувач оцінює модель, розраховує початкові умови і виконує симуляцію. Цей етап може тривати декілька секунд. Повідомлення у нижньому лівому кутку вікна моделі забезпечує оновлення статусу.

Після того як моделювання починає працювати, відображені на осцилографі швидкість і положення показують результати моделювання, як на рисунку 3.36.

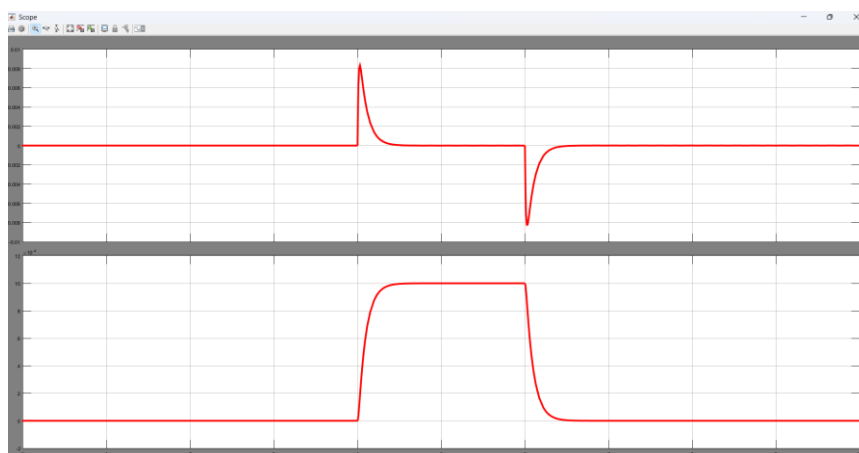


Рисунок 3.36 – Результати моделювання швидкості та положення

Спочатку маса перебуває у спокої. Потім за 4 секунди, коли вхідний сигнал різко змінюється, відбувається стрибок швидкості маси в додатному напрямку та поступово повертається до нуля. Положення маси одночасно змінюється більш плавно, внаслідок інерції та демпфування, і залишається на новому значенні доти, доки сила діє на нього. За 6 секунд, якщо вхідний сигнал змінюється на нуль, відбувається дзеркальний стрибок швидкості і маса поступово повертається до вихідного положення.

Тепер можна налаштувати різні параметри входів і блоків та побачити їх вплив на характеристики швидкості й переміщення маси.

Регулювання параметрів

Після запуску початкового моделювання можна експериментувати з різним регулюванням входів та параметрами блоків.

Виконуємо такі опції:

1. Змінити профіль сили.
2. Змінити параметри моделі.
3. Змінити вихідні позиції (значення на осцилографі).
4. Цей приклад показує, як зміна вхідного сигналу впливає на профіль сили і, отже, на переміщення маси.

Відкрийте налаштування Builder для формування профілю сигналу.

Натисніть вертикальний сегмент профілю сигналу або точку профілю сигналу та перетягніть їх або створіть новий профіль. Закрийте діалогове вікно блока.

Запустіть моделювання. Результати моделювання наведіть у звіті.

5. Змінити параметри моделі.

У цій моделі сила діє на масу проти пружини й демпфера, з'єднаних паралельно. Цей приклад показує, як зміна жорсткості пружини та в'язкості демпфера впливає на переміщення маси.

Відкрийте налаштування блока пружини. Встановіть жорсткість пружини до 2000 Н/м (4000 Н/м).

Запустіть моделювання. Збільшення жорсткості пружини зменшує _____ (занесіть результати моделювання до звіту).

Відкрийте налаштування блока демпфера. Встановіть його коефіцієнт згасання до 500-600 Н/(м/с).

Запустіть моделювання. Через збільшення коефіцієнта згасання _____ (занесіть результати моделювання до звіту).

6. Змінити позицію маси вихідної одиниці.

У моделі використовується блок PS-Simulink Converter та його конфігурація параметрів, встановлених за замовчуванням, яка не визначає одиниць масштабування. Таким чином, осцилограф виводить переміщення

маси за замовчуванням, тобто у метрах. Далі змінимо вихідні одиниці для того, щоб значення переміщення маси виводилося у міліметрах.

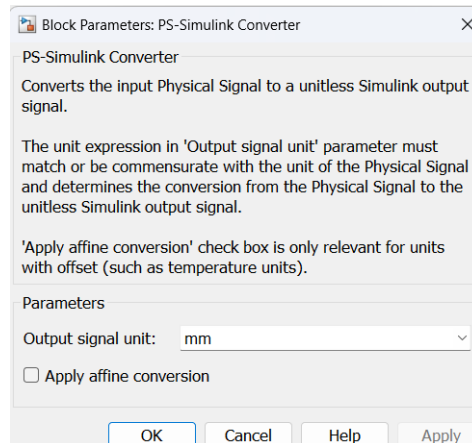


Рисунок 3.37 – Налаштування параметрів перетворювача

У вікні налаштувань перетворювача PS-Simulink Converter введіть mm у поле зі списком Output signal unit (Вихідний сигнал) та натисніть OK (рисунок 3.37).

Запустіть моделювання. У вікні області дії установки клацніть для автоматичного виставлення масштабу осей. Переміщення маси має тепер вимірюватися у міліметрах. У звіті опишіть виконану роботу.

Контрольні запитання

1. З яких елементів складається модель підвіски автомобіля?
2. Які параметри моделі можна змінювати?
3. Для чого потрібен перетворювач бібліотек Converter?
4. Який метод вирішувача використовується для моделювання механічних систем?
5. Для чого призначена бібліотека Simscape?
6. Для чого призначено блок Builder?
7. Перелічіть головні елементи механічної схеми.
8. Як виміряти швидкість та положення елемента тіла з масою на схемі?
9. Як змінюється поведінка системи при зміні вхідного сигналу, який створили в блоці Builder?
10. Яким чином розподіляється енергія між пружиною, демпфером та масою під час коливань, і як це відображається на графіку Scope?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.

3. Опис використаних елементів та налаштувань.
4. Модель системи (підвіска автомобіля).
5. Три варіанти налаштування параметрів з описом:
 - а) зміна профілю сили;
 - б) зміна параметрів моделі;
 - в) зміна вихідних позицій (значень на осцилографі).
6. Висновки про виконану роботу.
7. Відповіді на контрольні запитання.
8. Файл з моделлю.

Практична робота 3

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ БЛОКІВ SIMSCAPE НА ПРИКЛАДІ БЛОКА ПОСТІЙНОГО ТЕРТЯ

Мета роботи: засвоїти основні елементи бібліотеки Simscape на прикладі побудови простої моделі (з поступальним (лінійним) тертям), навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та виконувати дослідження моделі, змінюючи параметри моделі.

Завдання:

1. Набути навичок складання та редагування простих схем.
2. Навчитися правильно встановлювати та налаштовувати вимірювальні прилади.
3. Створити схему за прикладом та налаштувати параметри.
4. Проаналізувати результати, зробити висновки та оформити звіт.

Порядок виконання роботи

Продовжимо опановувати Simscape. Розглянемо просту механічну систему та дослідимо її поведінку за різних умов. Ця робота ілюструє основні етапи побудови фізичної моделі та знайомить з використанням основних блоків Simscape.

На рисунку 3.38 показано просту схему для дослідження поступального тертя, що складається з пружини та демпфера, під'єданого до тіла (поданого у вигляді маси), що переміщається від джерела ідеальної швидкості через фрикційний елемент. Можна змінювати параметри моделі, такі як жорсткість пружини, маса тіла або профіль сили, а також переглядати отримані зміни швидкості та положення тіла.

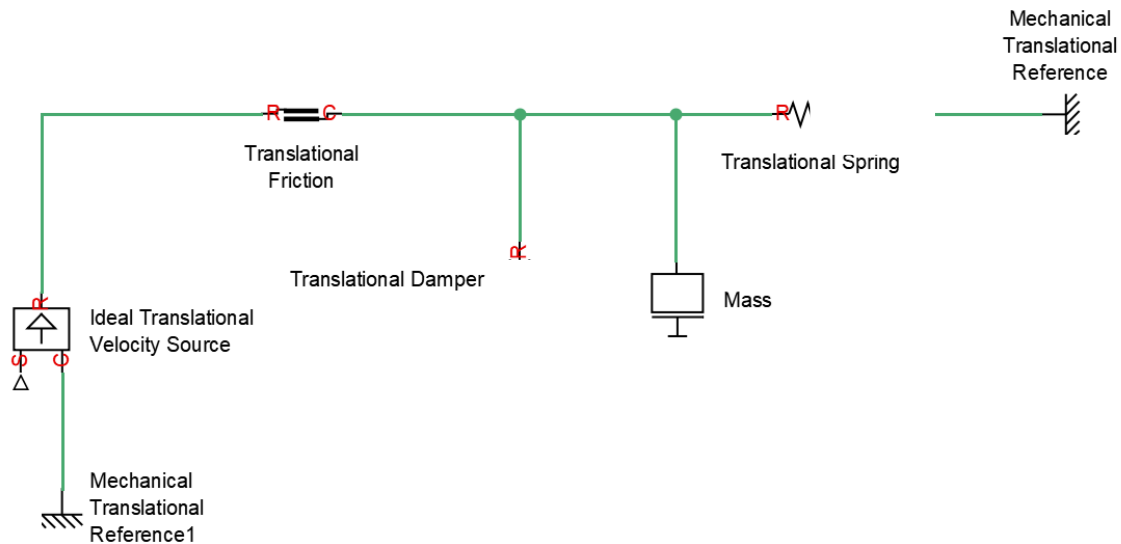


Рисунок 3.38 – Проста модель з використанням поступального тертя

Для того щоб створити еквівалентну схему в Simscape, запустіть Simulink, як і в попередній роботі. Перетягніть у вікно моделі елементи, які потрібні для збирання схеми (рисунок 3.39).

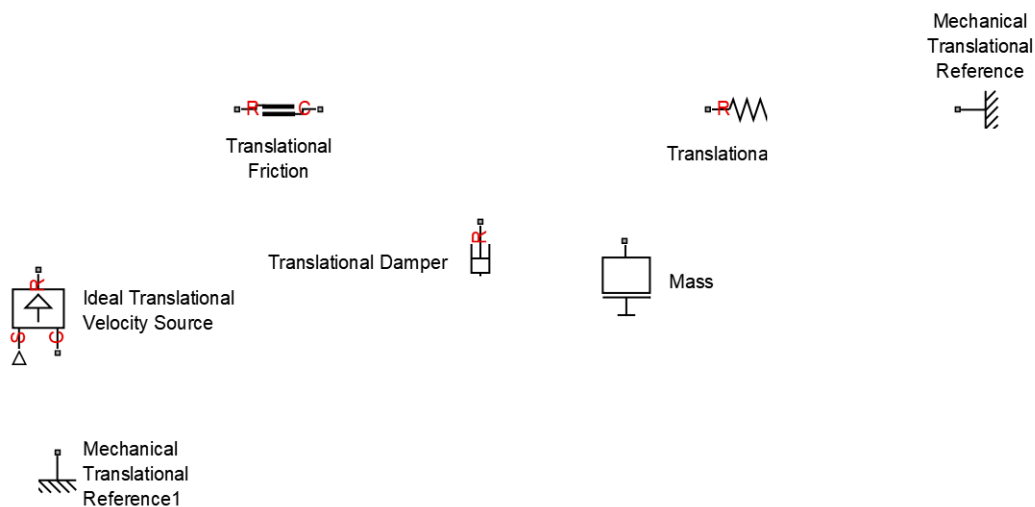


Рисунок 3.39 – Елементи для збирання досліджуваної схеми

З'єднайте елементи: пружину, демпфер, масу блоків та інші елементи, як показано на рисунку 3.40.

Додайте датчики для вимірювання швидкості та положення маси. Також під'єднайте блок Ideal Translational Motion Sensor із бібліотеки Mechanical Sensors, як показано на рисунку 3.41.

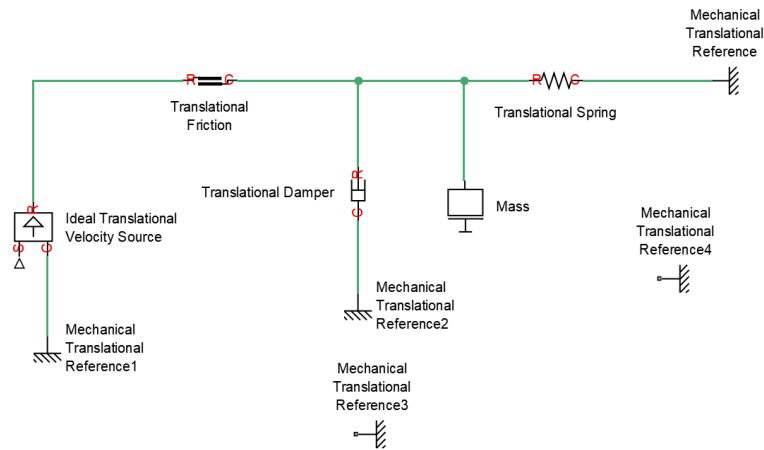


Рисунок 3.40 – З'єднання елементів досліджуваної схеми

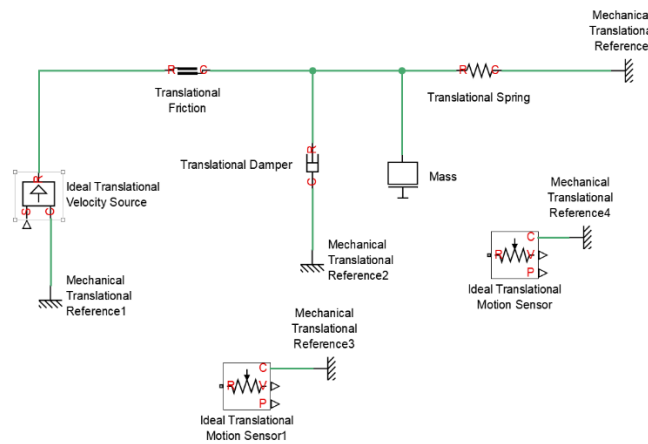


Рисунок 3.41 – Додавання блоку Ideal Translational Motion Sensor до досліджуваної схеми

Потім додайте джерело та осцилограф (Scopes), як у попередній роботі (рисунок 3.42).

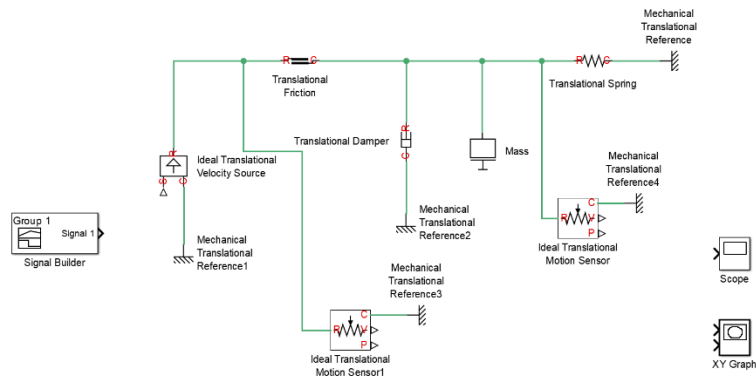


Рисунок 3.42 – Додавання елементів створення сигналу та осцилографа

Щоразу, коли під'єднуєте джерело або осцилограф Simulink до діаграми Simscape, використовуйте відповідні перетворювачі, щоб

перетворити сигнали в Simulink на фізичні сигнали і навпаки. З бібліотеки Simscape > Utilities блок Simulink-PS Converter та два блоки PS-Simulink Converter додаються до моделі.

Під'єднайте блоки, як показано на рисунку 3.43.

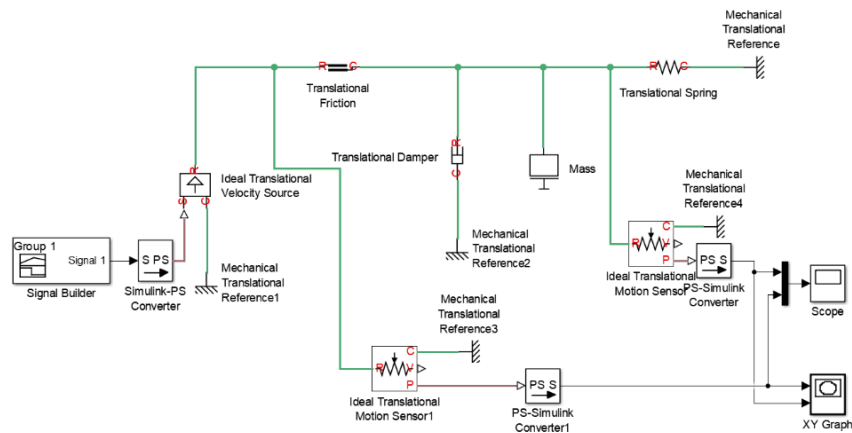


Рисунок 3.43 – Додавання перетворювача для сумісної роботи різних бібліотек

Головний елемент схеми Solver Configuration додайте до схеми, як показано на рисунку 3.44.

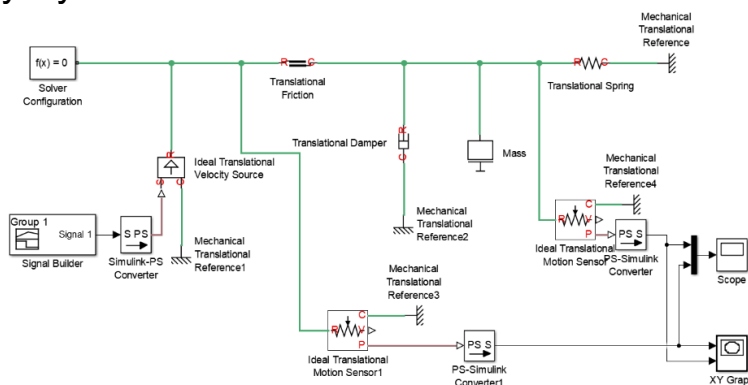


Рисунок 3.44 – Додавання вирішувача

Схему завершено. Збережіть її (назву запишіть латиницею).

Зміна початкових налаштувань

Виберіть вирішувач Simulink. На верхній панелі меню вікна моделі виберіть Simulation > Model Configuration Parameters. Відкриється діалогове вікно Configuration Parameters, розділ Solver (вирішувач).

У Solver Options (Опції вирішувача) виберіть метод ode23t (mod.stiff/Trapezoidal) (рисунки 3.45).

У додаткових опціях встановіть максимальний розмір кроку 0.2.

Час моделювання вказано в межах від 0 до 10 секунд. За необхідності його можна налаштувати пізніше.

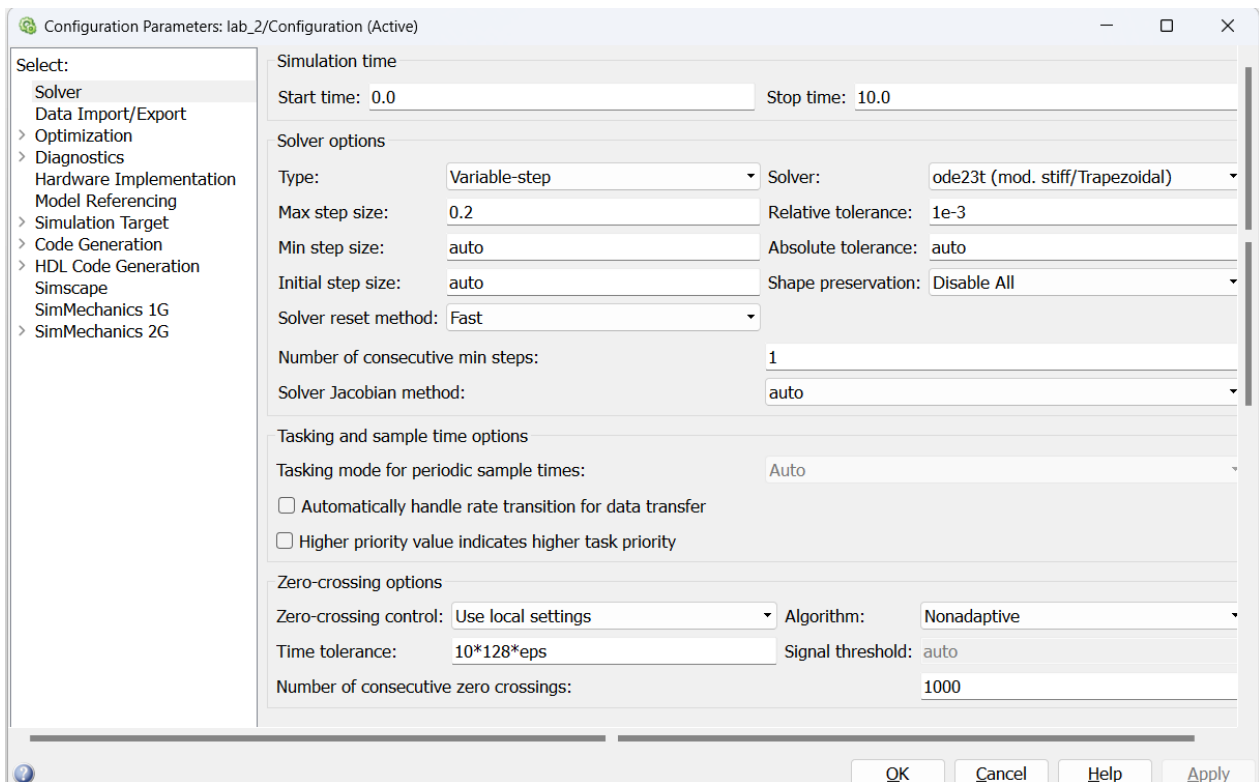


Рисунок 3.45 – Вікно налаштування вирішувача

Натисніть ОК, щоб закрити діалогове вікно параметрів конфігурації та зберегти налаштовані параметри.
Збережіть модель.

Запуск симуляції

Після того як було зібрано блок-схему та вказано початкові параметри для моделі, запускається симуляція.

Вхідний сигнал блока Builder задається так, як показано на рисунку 3.46.

Зайдіть у Signal-new, виберіть готовий профіль сигналу та модифікуйте його.

Осцилограф швидкості виводить швидкість маси, а осцилограф положення виводить значення переміщення маси залежно від часу (можна ці сигнали виводити в одному вікні осцилографа).

Щоб запустити симуляцію, натисніть  на панелі інструментів вікна моделі. Вирішувач оцінює модель, розраховує початкові умови і виконує симуляцію. Цей етап може тривати декілька секунд. Повідомлення у нижньому лівому кутку вікна моделі забезпечує оновлення статусу.

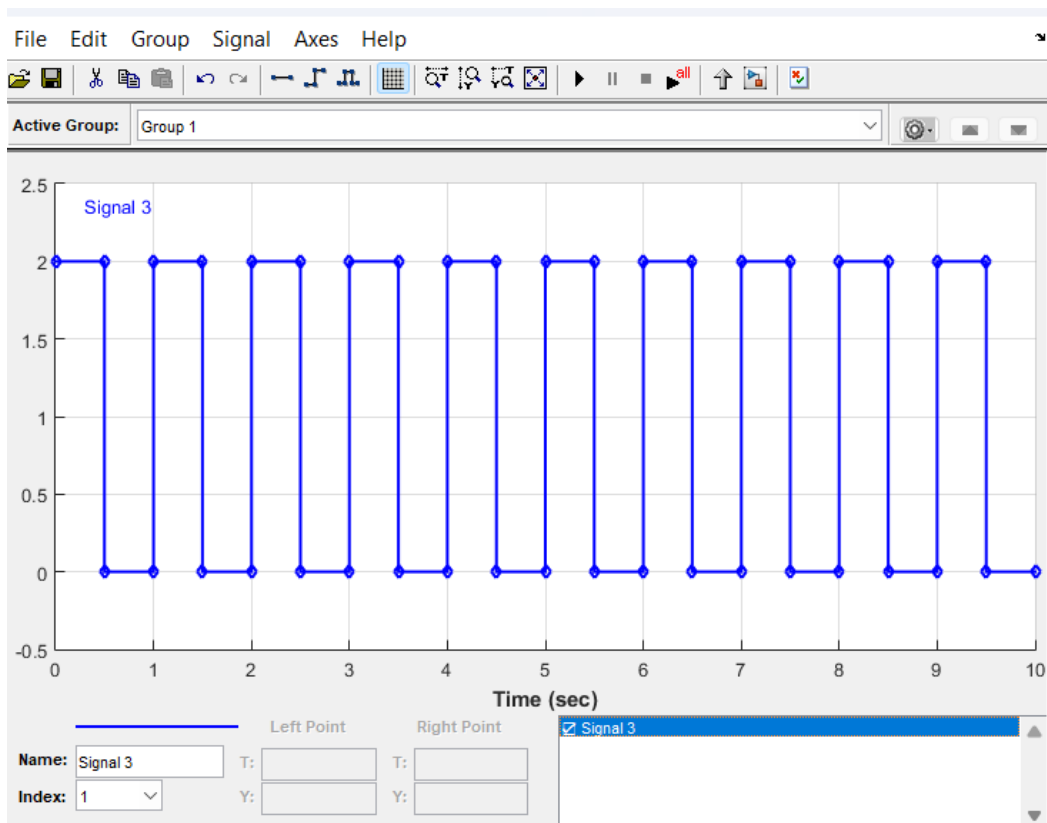


Рисунок 3.46 – Вікно блока створення сигналу

Після того як моделювання починає працювати, відображені на осцилографі швидкість і положення змінюють свої значення, як показано на рисунку 3.47.

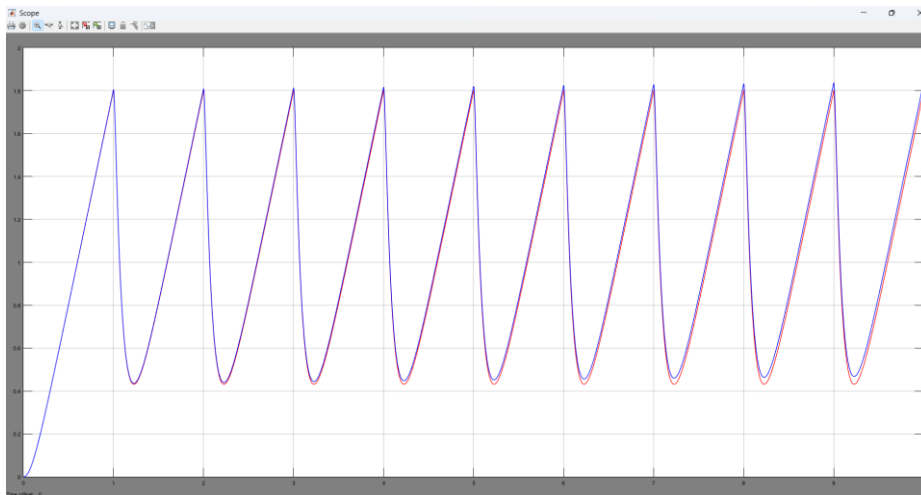


Рисунок 3.47 – Відображення на осцилографі результату моделювання досліджуваної схеми

Тепер дослідіть модель. Виконайте налаштування параметрів входів і блоків та проаналізуйте їх вплив на характеристики швидкості та переміщення маси.

Регулювання параметрів

Після запуску початкового моделювання можна експериментувати з різним регулюванням входів та параметрами блоків.

Спробуйте такі опції:

1. Змінити профіль сили.
2. Змінити параметри моделі.
3. Змінити вихідні позиції (значення на осцилографі).
4. Цей приклад показує, як зміна вхідного сигналу впливає на профіль сили і, отже, на переміщення маси.

Відкрийте налаштування Builder для формування профілю сигналу.

Натисніть вертикальний сегмент профілю сигналу або точку профілю сигналу та перетягніть їх. Закрийте діалогове вікно блока.

Запустіть моделювання. Результати моделювання наведіть у звіті.

5. Змінити параметри моделі (силу тертя відриву, коефіцієнт тертя).

Контрольні запитання

1. З яких головних елементів складається схема?
2. Який елемент бібліотеки може вивести результат роботи передавальної функції?
3. Охарактеризуйте блок Ideal Translational Motion Sensor.
4. Для чого призначено блок XY Graph?
5. Яким методом виконується обчислення моделі?
6. Що відбувається з переміщенням маси, якщо змінити параметри сигналу у блоці Signal Builder?
7. Яке призначення блока Translational Spring та як він впливає на поведінку системи?
8. Як впливає блок Translational Friction на швидкість переміщення маси?
9. Яке призначення блока Ideal Translational Source і як зміна його параметрів впливає на динаміку системи?
10. Чим відрізняються показники від двох Ideal Translational Motion Sensor, і для чого використовується кожен із них?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.
3. Опис використовуваних елементів та налаштувань.
4. Модель системи.
5. Налаштування параметрів та їх аналіз:

- а) зміна профілю вхідного сигналу;
- б) аналіз роботи блока Translational Friction.
- 6. Висновки про виконану роботу.
- 7. Відповіді на контрольні запитання.
- 8. Файл з моделлю.

Практична робота № 4

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ БЛОКІВ БІБЛІОТЕКИ SIMHYDRAULIC

Мета роботи: засвоїти основні елементи бібліотеки Simhydraulic на прикладі побудови простої моделі (з бістабільним циліндром), навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та виконувати дослідження моделі, змінюючи параметри моделі.

Завдання:

1. Ознайомлення з бібліотекою SimHydraulics.
2. Побудова простої гідросистеми з бістабільним циліндром.
3. Налаштування параметрів компонентів.
4. Задання вхідного сигналу.
5. Запуск симуляції та спостереження результатів та дослідження впливу параметрів.
6. Оформлення висновків.

Порядок виконання роботи

У цій роботі продовжується дослідження гідравлічної системи та аналіз її поведінки за різних умов. Ця робота ілюструє основні етапи побудови фізичної моделі та знайомить з використанням основних блоків Simhydraulic.

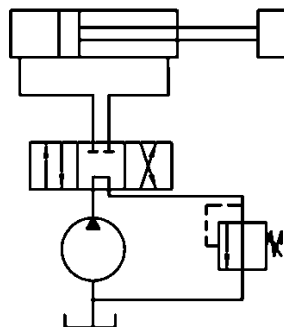


Рисунок 3.48 – Проста схема керування гідравлічним циліндром

На рисунку 3.48 показано схему керування гідравлічним циліндром двосторонньої дії з одним штоком. У моделі до циліндра під'єднано пружину та демпфер, а також масу, яку переміщує циліндр. Можна змінювати параметри моделі, такі як жорсткість пружини, маса тіла або профіль сили, а також переглядати отримані зміни швидкості та положення тіла.

Запустіть середовище Simscape, як у попередніх роботах. Відкрийте бібліотеку Simscape > Simhydraulics library (рисунок 3.49), де наведено всі основні гідравлічні елементи.

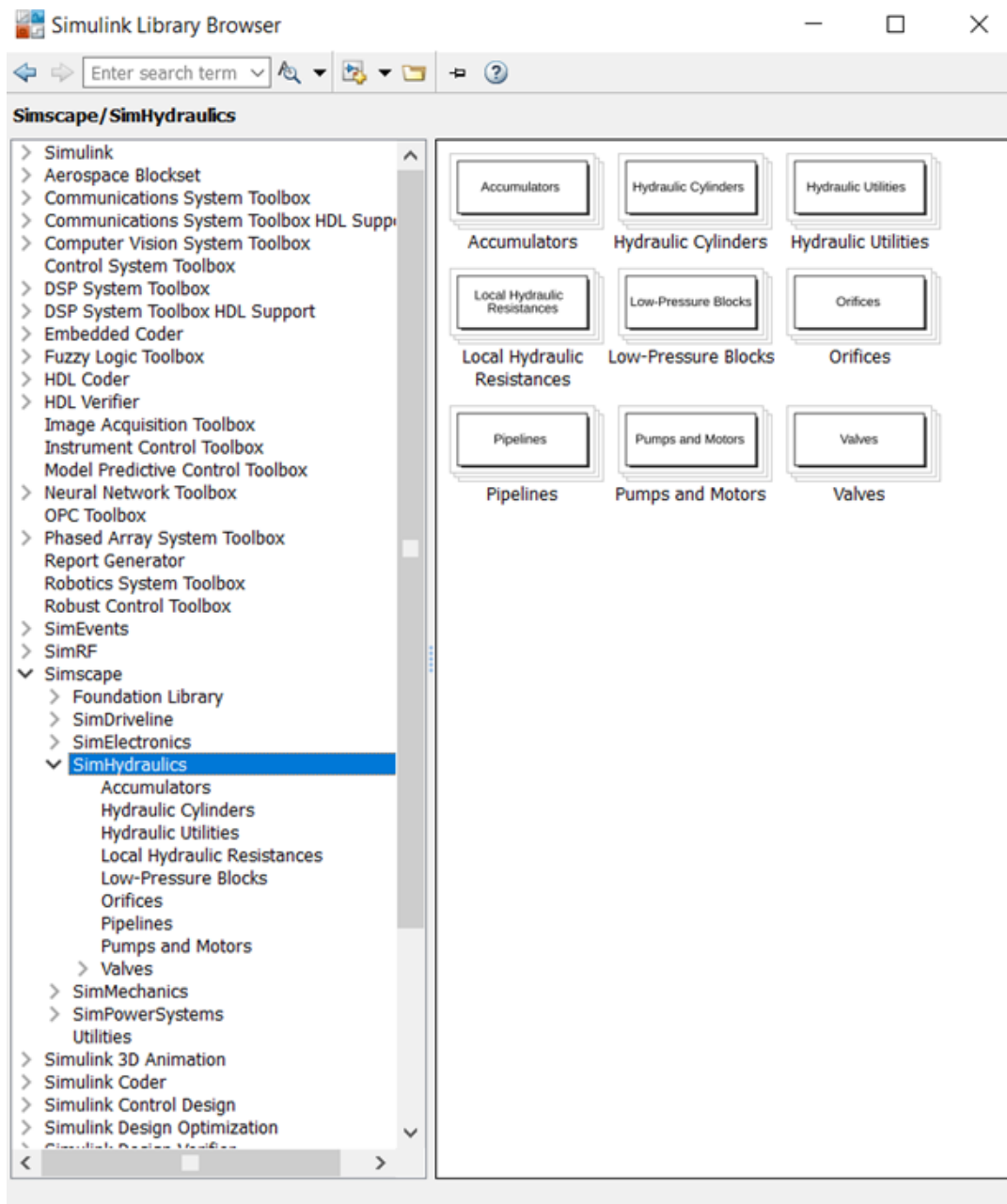


Рисунок 3.49 – Вікно бібліотеки гідравлічних елементів

Зайдіть у бібліотеку Pumps and Motors та виберіть Fixed_Displacement Pump (гідронасос, основний елемент енергетичного рівня) (рисунок 3.50).

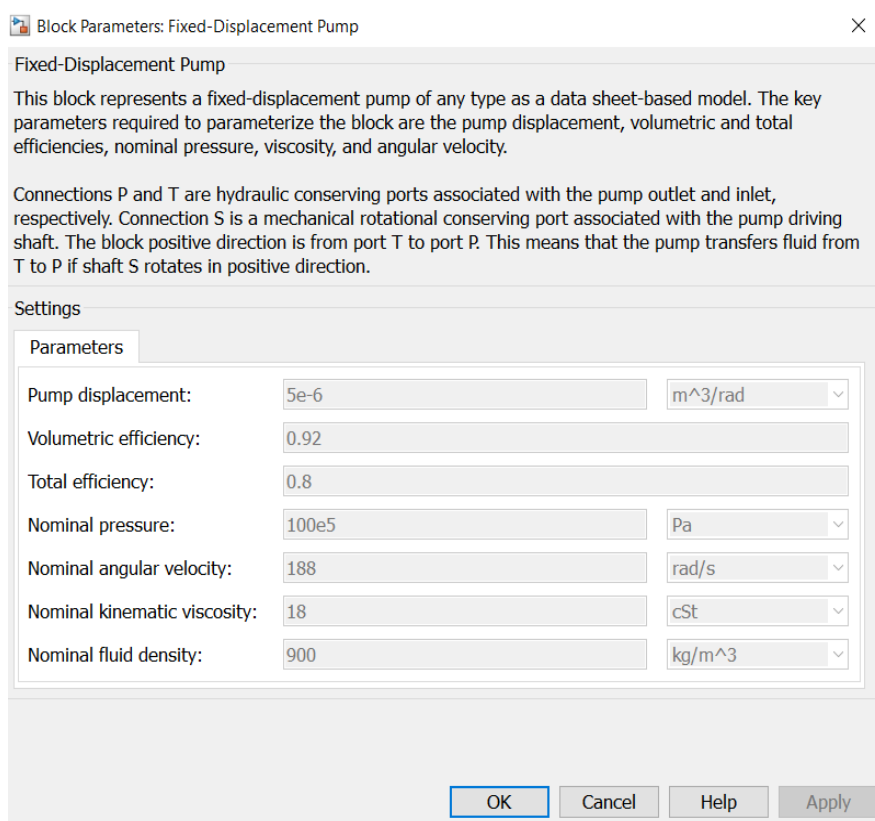


Рисунок 3.50 – Вікно налаштувань гідравлічного насоса

У бібліотеці Foundation Library > Hydraulic > Hydraulic Elements виберіть Hydraulic Reference зливу ємність (гідробак)). Далі виберіть циліндр Simscape > Simhydraulics > Hydraulic Cylinder > Double-Acting Hydraulic Cylinder (рисунок 3.51) та розподільник Simscape > Simhydraulics > Valves > Directional Valves 4-Way Directional Valve A (рисунок 3.52).

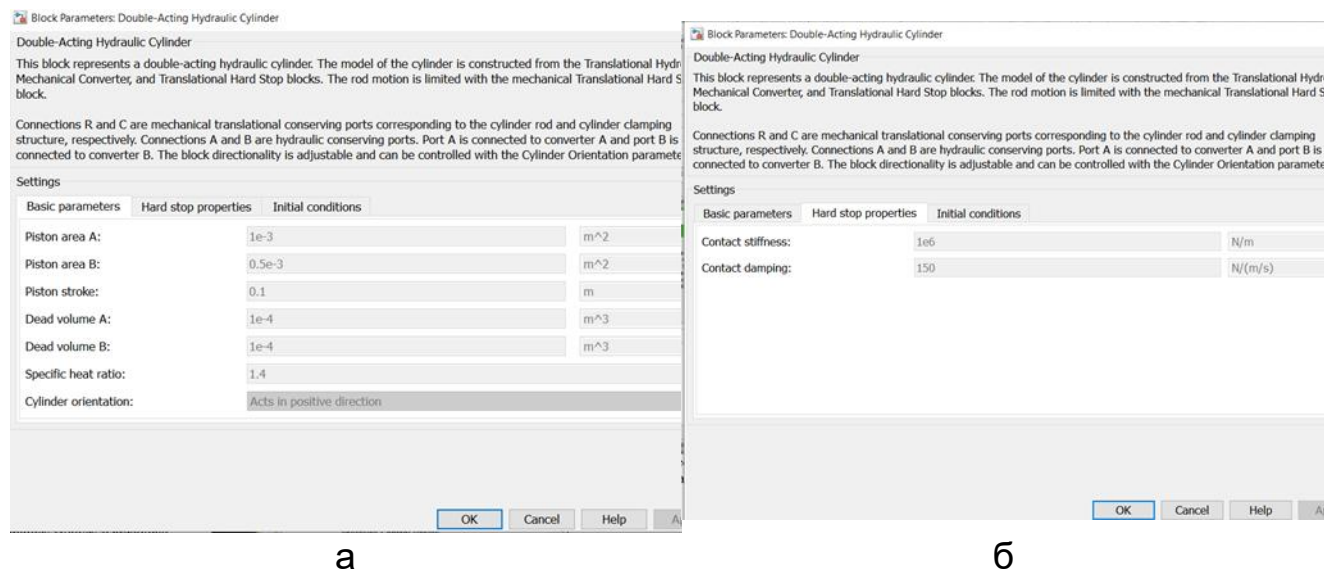


Рисунок 3.51 – Вікно налаштувань параметрів гідравлічного циліндра: а – вкладка «Базові параметри»; б – вкладка «Налаштування параметрів зупинки»

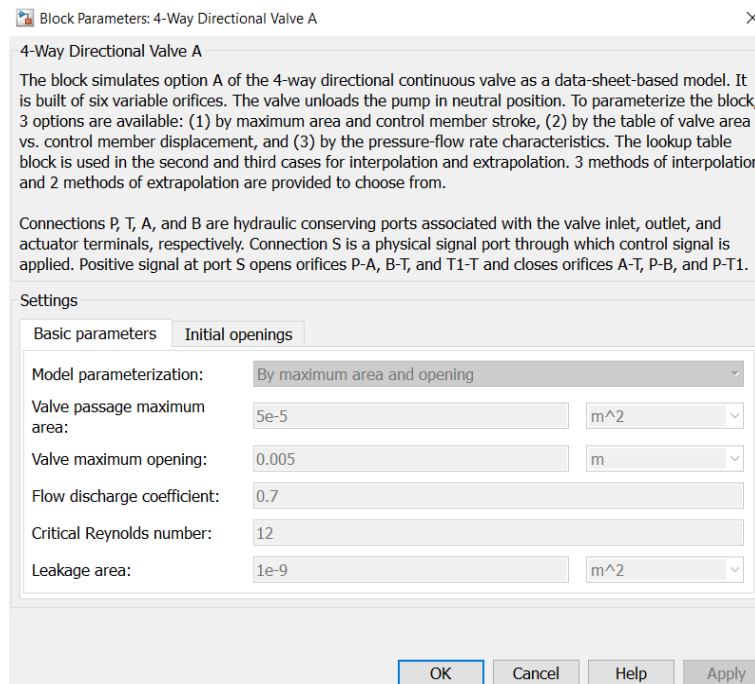


Рисунок 3.52 – Вікно налаштувань гідравлічного розподільника

З'єднайте всі елементи (рисунок 3.53). У бібліотеці Valve > Pressure Control Valves виберіть регулятор тиску Pressure Relief Valve. Також під'єднайте до схеми з бібліотеки Hydraulic Utilities елемент Hydraulic Fluid, який задає тип робочої рідини та її параметри (рисунок 3.54, 3.55). Для даного моделювання виберіть мастило типу Skydrol LD-4.

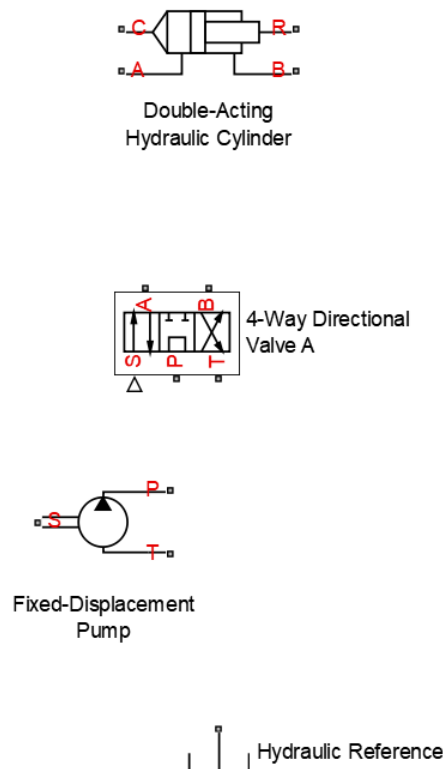


Рисунок 3.53 – Елементи для збирання досліджуваної схеми

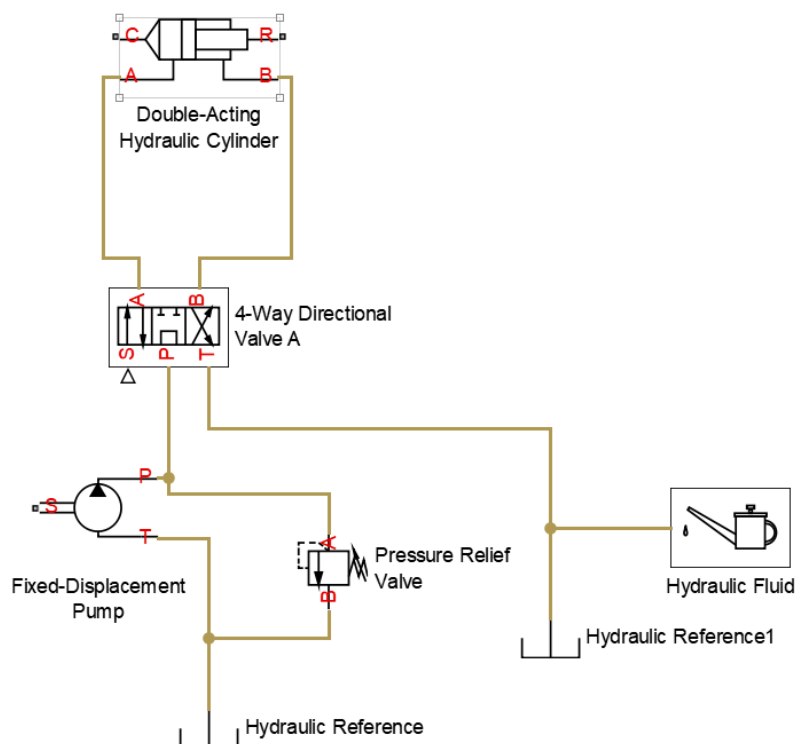


Рисунок 3.54 – Частково зібрана модель з блоком опису параметрів мастила

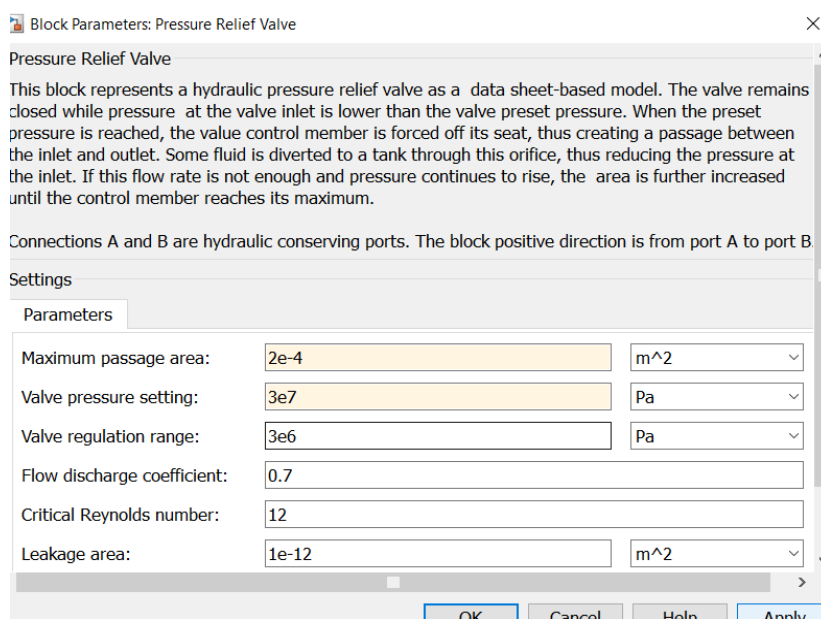


Рисунок 3.55 – Вікно налаштувань регулятора тиску

Для обертання насоса додайте двигун. Його виберіть у бібліотеці механіки Foundation Library > Mechanical > Mechanical Sources та виберіть Ideal Angular Velocity Source (рисунок 3.56).

Для фіксації двигуна у просторі та забезпечення його обертання з бібліотеки Foundation Library > Mechanical > Rotational Elements виберіть Mechanical Rotation Reference та під'єднайте до порту C двигуна.

Задайте швидкість обертання двигуна 188 радіан за секунду за допомогою стандартного блока Constant. Далі в SimScape > Utilities виберіть перетворювач Converter для адекватної роботи різних бібліотек. Встановіть розмірність РАДІАНИ ЗА СЕКУНДУ.

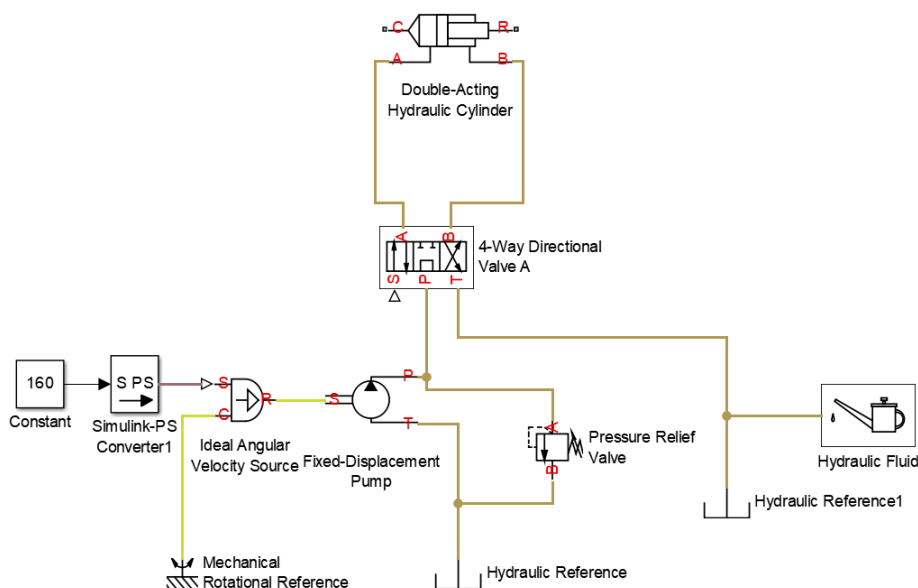


Рисунок 3.56 – Додавання до схеми двигуна для обертання гідравлічного насоса

Тепер додайте механічну частину до гідравлічного циліндра (рисунок 3.57). Для цього перетягніть масу (встановивши 100 кг), пружину поступального переміщення, поступальний демпфер, механічні поступальні опорні блоки та датчик з осцилографом у вікно моделі (додаткову інформацію наведено в практичній роботі № 1).

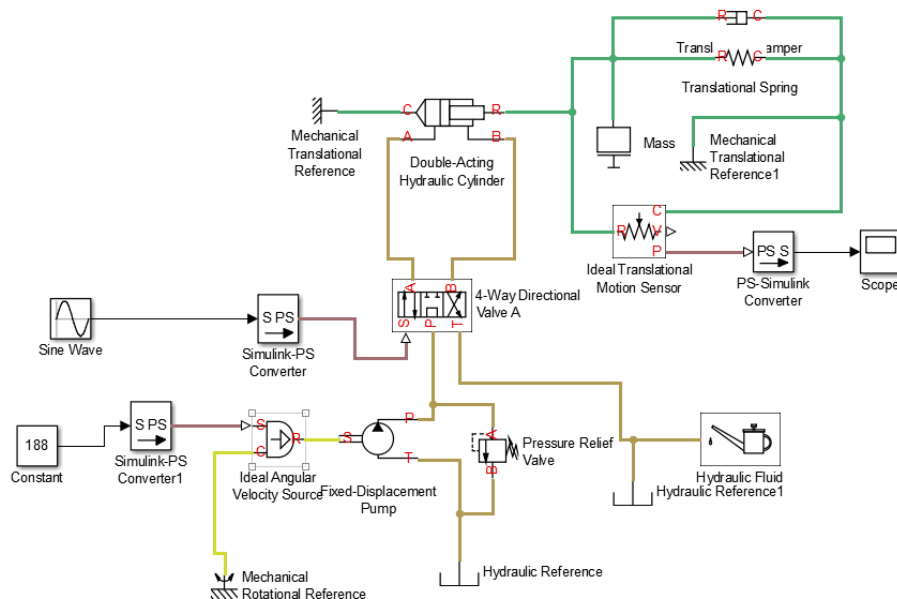


Рисунок 3.57 – Схема з приєднаною до гідравлічного циліндра механічною частиною

Під'єднайте керувальні сигнали до розподільника. Для прикладу встановіть необхідні параметри синусоїдального сигналу. У бібліотеці Simulink > Sources виберіть блок Sine Wave, налаштуйте його параметри, а потім під'єднайте його до системи через перетворювач одиниць, у якому вкажіть розмірність «метри».

Пам'ятайте, що кожного разу, коли під'єднуємо джерело, осцилограф або будь-який елемент Simulink до діаграми Simscape, слід використовувати відповідний перетворювач блока, щоб перетворити сигнали Simulink на фізичні сигнали і навпаки. Відкрийте бібліотеку Simscape > Utilities та скопіюйте блок Simulink-PS Converter та два блоки PS-Simulink Converter у модель. Під'єднайте блоки, як показано на рисунку 3.58.

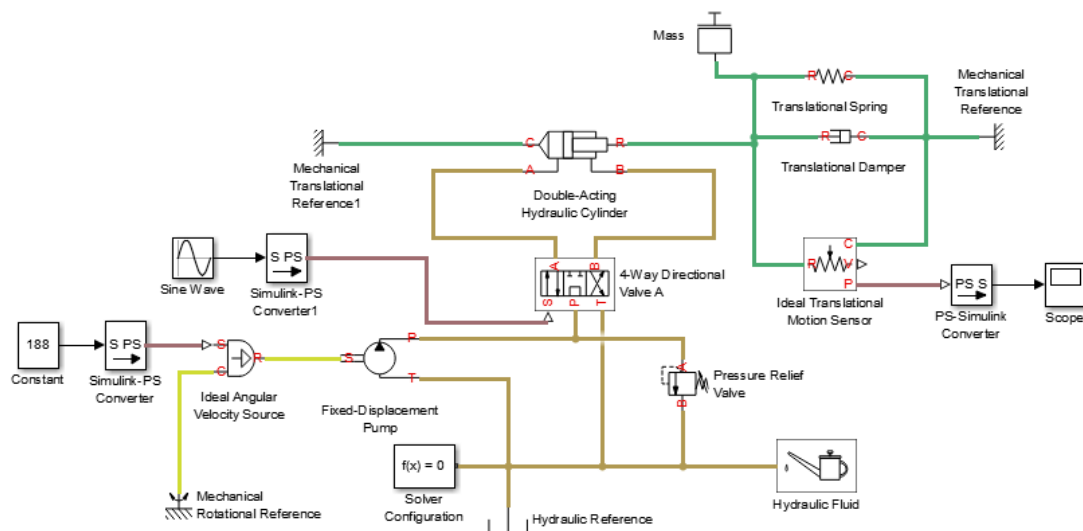


Рисунок 3.58 – Повна схема для дослідження гідравлічного циліндру

Блок-схему завершено. Збережіть її (назву запишіть латиницею).

Зміна початкових налаштувань

Після того як зібрано блок-схему моделі, як описано вище, слід вибрати відповідний вирішувач та встановити коректні значення параметрів конфігурації моделі.

Щоб підготуватися до імітації моделі, виконайте такі дії:

1. Виберіть вирішувач Simulink. На верхній панелі меню вікна моделі виберіть Simulation > Model Configuration Parameters. Відкриється діалогове вікно Configuration Parameters, показуючи розділ Solver (вирішувач).

2. Під Solver Options (опції вирішувача) виберіть метод ode15s (stiff/NDF).

3. Розгорніть додаткові опції та встановіть максимальний розмір кроку 0.2 (рисунок 3.59).

4. Також зверніть увагу, що час моделювання вказано в межах від 0 до 10 секунд. Можна налаштувати цей параметр пізніше, якщо необхідно.

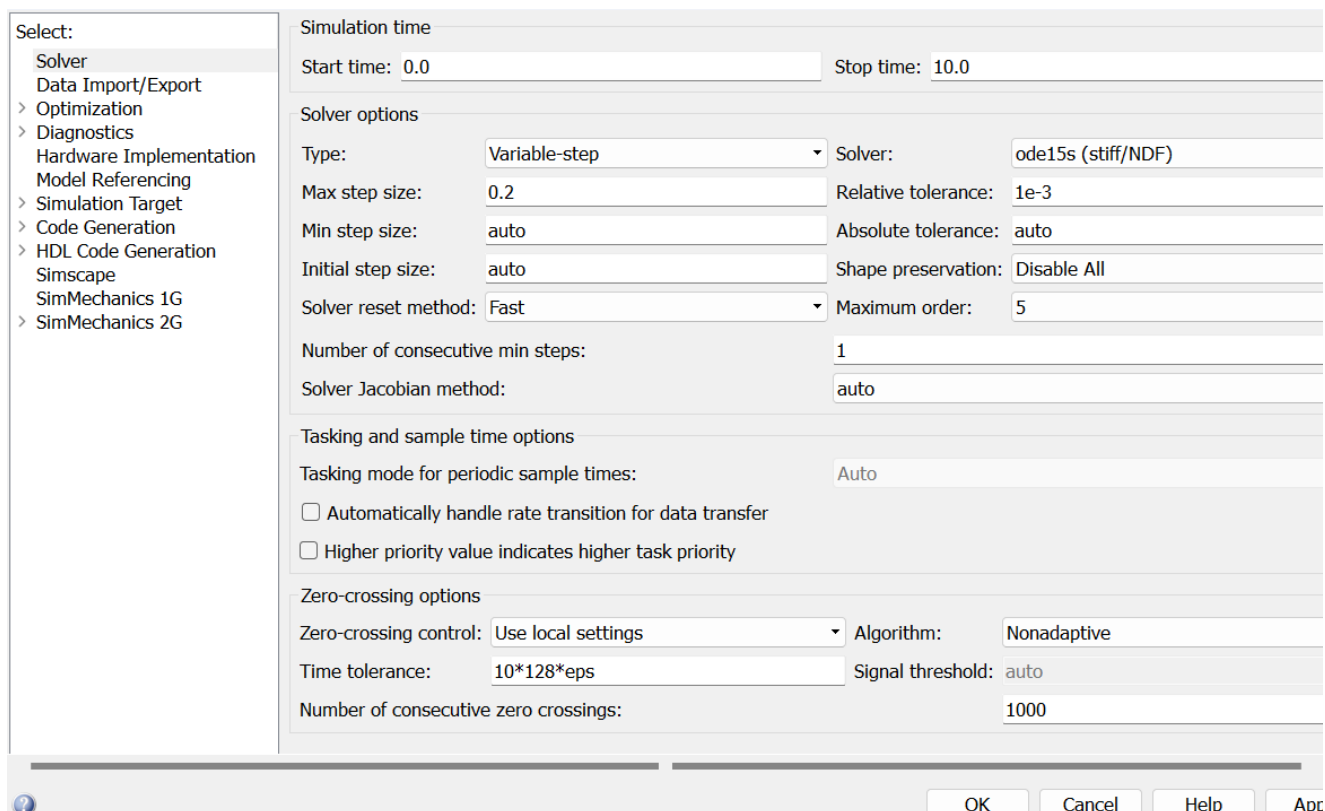


Рисунок 3.59 – Вікно налаштувань параметрів вирішувача

5. Натисніть ОК, щоб закрити діалогове вікно параметрів конфігурації.
6. Збережіть модель.

Запуск симуляції

Після того як зібрано блок-схему та вказано початкові параметри моделі, можна запустити симуляцію.

1. Режим роботи розподільника задається сигналом з блоку Sine Wave.

Налаштуйте параметри сигналу наступним чином.

2. Запустіть симуляцію Simscape. Вирішувач оцінює модель, розраховує початкові умови і виконує симуляцію. Цей етап може тривати декілька секунд. Повідомлення у нижньому лівому кутку вікна моделі забезпечує оновлення статусу.

3. Після того як моделювання починає працювати, відображені на осцилографі швидкість і положення показано на рисунках 3.60, 3.61.

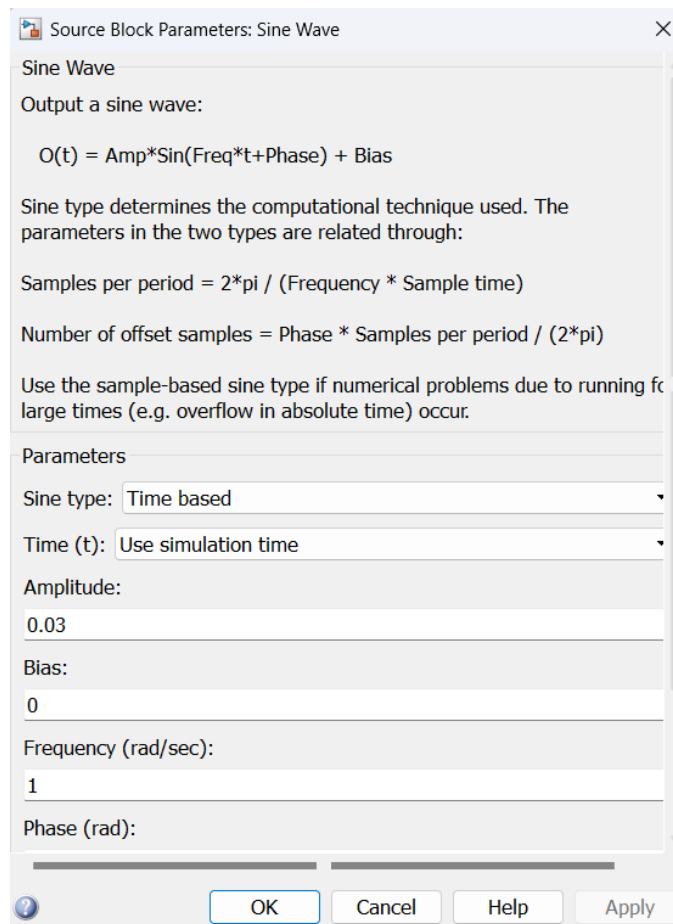


Рисунок 3.60 – Задання синусоїдального сигналу у вікні налаштувань параметрів блока

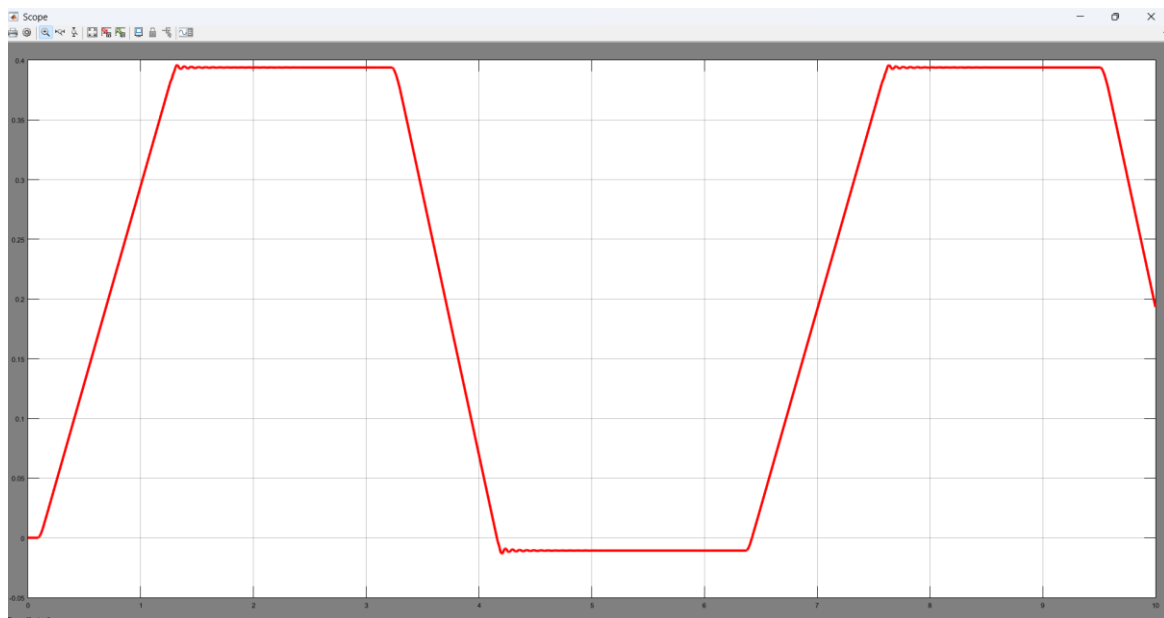


Рисунок 3.61 – Вікно осцилографа з результатом моделювання

Тепер можна налаштувати різні параметри входів і блоків та побачити їх вплив на характеристики швидкості та переміщення маси.

Регулювання параметрів

Після запуску початкового моделювання можна експериментувати з різним регулюванням входів та параметрами блоків.

Спробуйте такі опції:

1. Змінити керувальний сигнал, використовуючи блок Builder (Імпульси, трапеції, трикутники).
2. Змінити параметри моделі (кожен дослід окремо, за основу беремо початкові налаштування):
 - а) масу;
 - б) площу циліндра;
 - в) площу пружини та демпфера.
3. Змінити параметри моделі одночасно в пункті 1 і пункті 2.

Контрольні запитання

1. Що таке бістабільний циліндр?
2. Для чого призначена бібліотека SimHydraulics?
3. Яким елементом з бібліотеки можна вивести результат роботи циліндра?
4. Які головні параметри налаштування вирішувача (Solver) у Matlab для гідравлічних моделей?
5. Як реагує модель на зміну сигналу в блоці Builder?
6. Перелічіть головні елементи гідравлічної схеми.
7. Порівняйте графіки вхідного керувального сигналу блока SineWave розподільника та відпрацювання руху штока циліндра.
8. Як задати робочу рідину для моделі?
9. Що відбуватиметься з гідравлічним циліндром, якщо на обидва входи подати рідину з однаковим тиском?
10. Які є види розподільників?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.
3. Опис використовуваних елементів та налаштувань.
4. Модель системи з блоком тертя.
5. Налаштування параметрів та їх аналіз:
 - а) зміна профілю вхідного сигналу;
 - б) аналіз змінюваних параметрів роботи.
6. Висновки щодо виконаної роботи.
7. Відповіді на контрольні запитання.
8. Файл з моделлю.

Практична робота № 5

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ БЛОКІВ БІБЛІОТЕКИ SIMMECHANICS НА ПРИКЛАДІ РЕГУЛЯТОРА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Мета роботи: засвоїти основні елементи бібліотеки Simmechanics на прикладі побудови простої моделі (на прикладі регулятора електроприводу триланкового маніпулятора), навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та досліджувати модель, змінюючи її параметри.

Завдання:

1. Набути навичок складання й редагування простих схем.
2. Правильно встановлювати та налаштовувати вимірювальні прилади.
3. Створити схему за прикладом та налаштувати параметри.
4. Проаналізувати результати, зробити висновки та оформити звіт.

Порядок виконання роботи

Продовжуємо вивчати можливості Simscape. Ця робота знайомить з використанням основних блоків Simmechanics.

На рисунку 3.62 зображено блок-схему приводу, у якій реалізовано ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор), що забезпечує автоматичне керування системою.

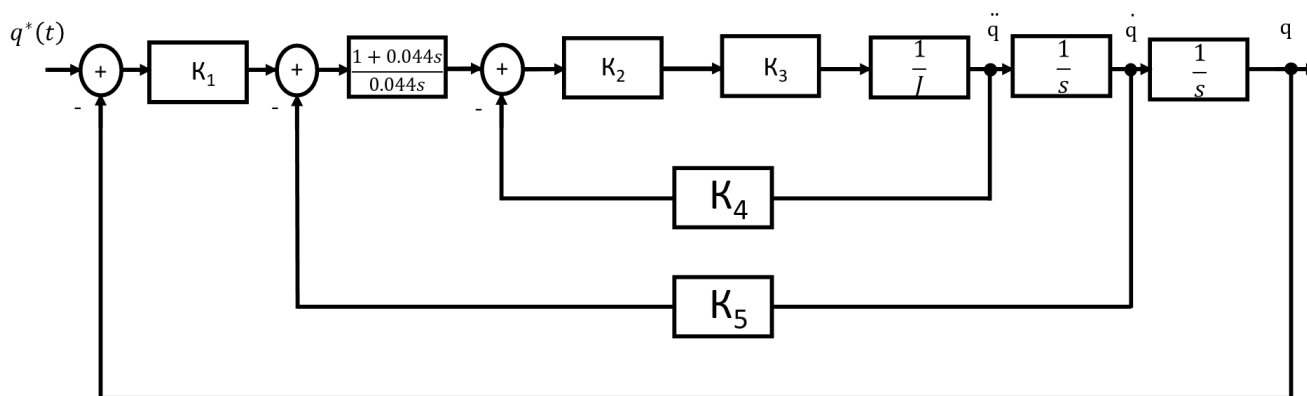


Рисунок 3.62 – Блок-схема регулятора приводу

Для моделювання такого приводу скористайтесь параметрами, наведеними в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти регулятора приводу

Номер варіанта	K1	K2	K3	K4	K5	J
1	1950	0,275	200	0,048	78	8
2	2330	2.8	117	0.043	94	55
3	3880	2.94	96	0.0442	156	166
4	4202	2.97	120	0.0552	168	226

Щоб створити еквівалентну схему Simscape, виконайте такі дії:

1. Відкрийте браузер Simulink® бібліотеки.
2. Створіть нову модель, як у попередніх роботах.
3. Використовуючи стандартні елементи з бібліотеки Simulink, зберіть схему, як показано на рисунку 3.63.

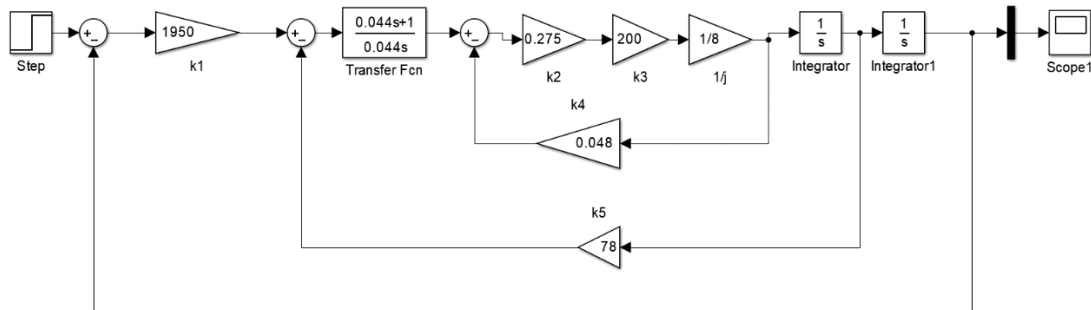


Рисунок 3.63 – Модель регулятора приводу

4. Далі задайте значення коефіцієнтів. Перший варіант: запишіть їх у кожен блок. Другий варіант: у командному вікні створіть змінні, наприклад, K1 = 123456, і натисніть «ввести». Далі ці змінні можна записувати до блоків Simulink.

5. Також за необхідності контролю вихідного та вхідного значення зручно встановлювати вхідні та вихідні точки. Для цього виділіть сполучну лінію, натисніть праву кнопку миші Linear Analysis Point і там виберіть вхідну або вихідну точку (див. практичну роботу № 3).

6. Збережіть модель. Проведіть пробну симуляцію.

Зміна початкових налаштувань

Після того як зібрано блок-схему моделі, як описано вище, необхідно вибрати вирішувач та забезпечити правильні значення параметрів конфігурації (рисунок 3.64).

Підготуйте до імітації модель: встановіть потрібний час.

Зверніть увагу, що час моделювання вказано в межах від 0 до 10 секунд. Цей параметр можна налаштувати пізніше, якщо необхідно.

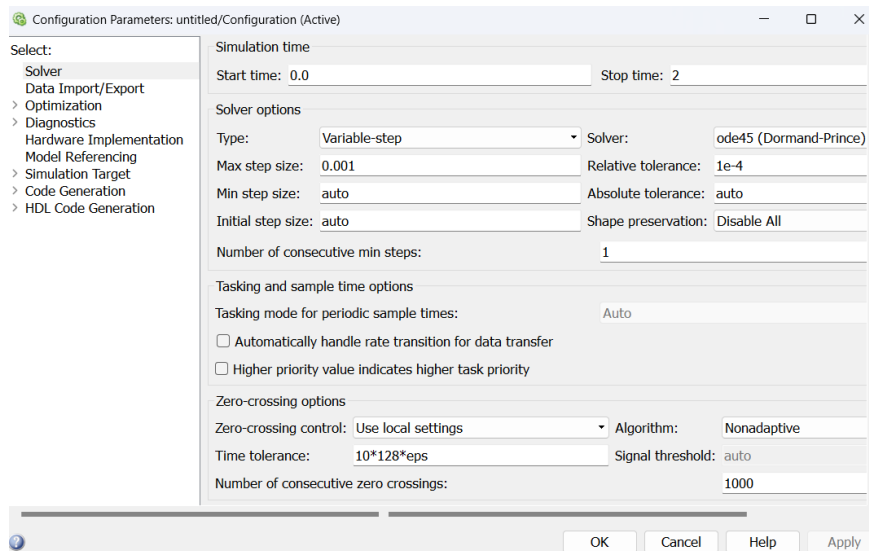


Рисунок 3.64 – Вікно налаштувань вирішувача

Натисніть ОК, щоб закрити діалогове вікно параметрів конфігурації. Збережіть модель.

Запуск симуляції

Після того як зібрано блок-схему та вказано початкові параметри моделі, запустіть симуляцію.

1. Сигнал з блоку Step задає режим роботи системи. Задайте параметри, як показано на рисунку 3.65.

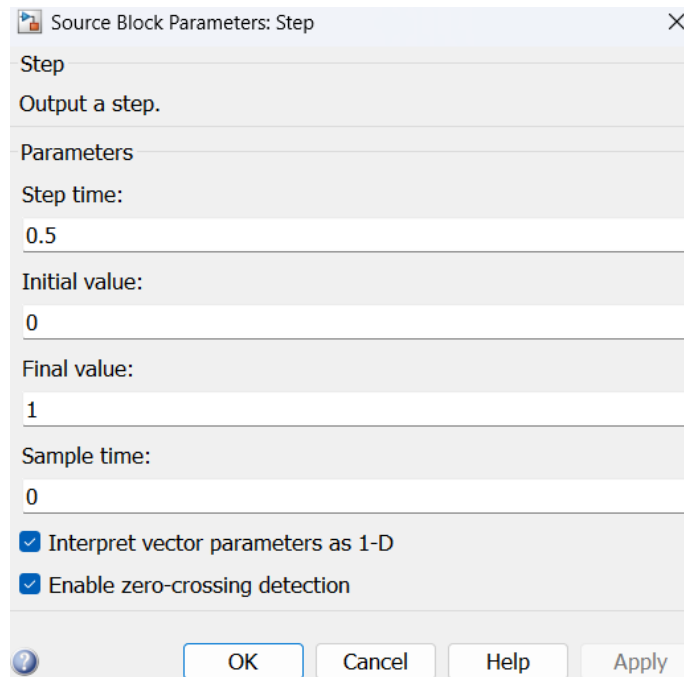


Рисунок 3.65 – Елементи для збирання досліджуваної схеми

2. Запустіть симуляцію, Simscape-вирішувач оцінює модель, розраховує початкові умови і виконує симуляцію. Цей етап може тривати декілька секунд. Повідомлення у нижньому лівому кутку вікна моделі забезпечує оновлення статусу.

3. Після того як моделювання починає працювати, на осцилографі видаються його результати, як показано на рисунку 3.66.

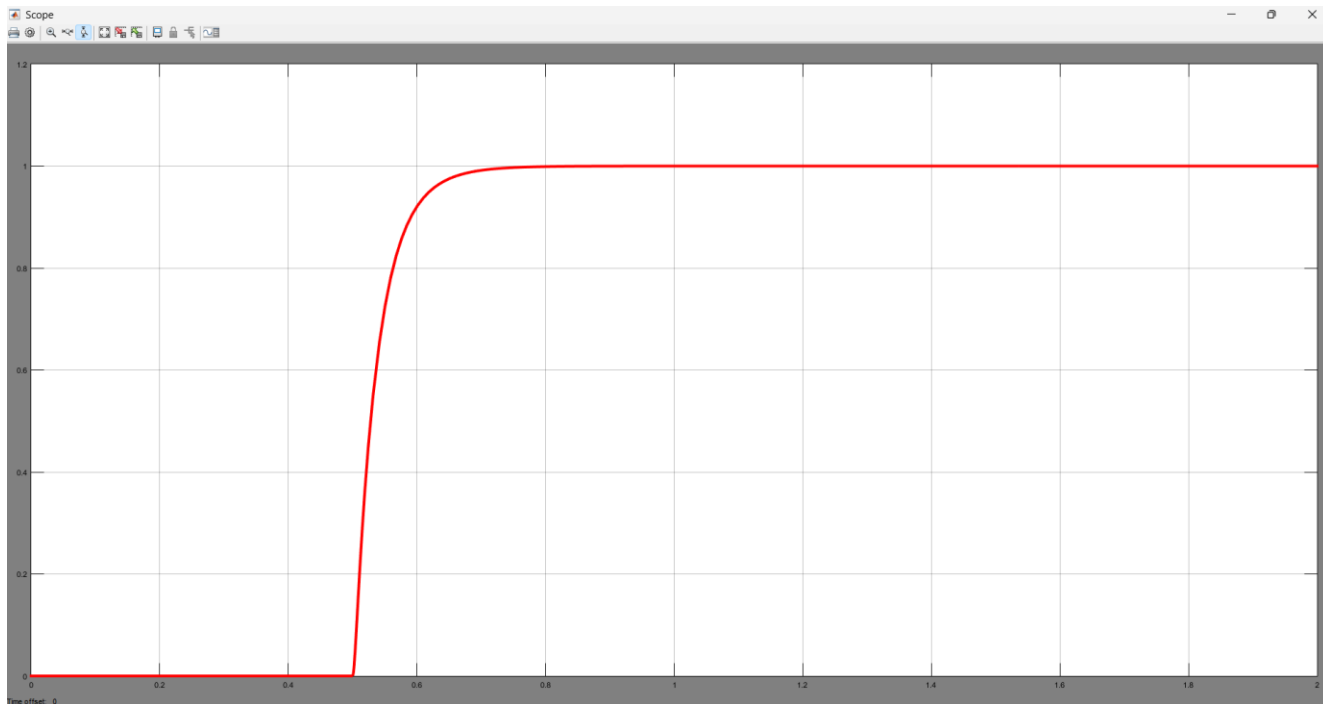


Рисунок 3.66 – Результати моделювання

Тепер можна налаштувати різні параметри входів і блоків та побачити їх вплив на характеристики швидкості та положення.

Регулювання параметрів

Після запуску початкового моделювання можна перейти до експериментального етапу, який передбачає регулювання параметрів вхідних сигналів та налаштування параметрів блоків моделі.

Спробуйте такі опції:

1. Змінити керувальний сигнал, використовуючи блоки Builder, Sine Wave.
2. Змінити параметри коефіцієнтів.

Контрольні запитання

1. Що таке ПІД-регулятор?
2. Які є комбінації регуляторів ?

3. Які головні параметри налаштування вирішувача (Solver) в Matlab для певної моделі?
4. Для чого призначений блок Gain?
5. Що таке Transfer Function та для чого її призначено?
6. Яке призначення блока Integrator?
7. Для чого використовується блок Scope?
8. Яку роль відіграє зворотний зв'язок у системі?
9. Як можна покращити точність роботи регулятора в моделі?
10. Що станеться, якщо видалити один із інтеграторів (Integrator)?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.
3. Опис використовуваних елементів та налаштувань.
4. Модель системи.
5. Налаштування параметрів та їх аналіз:
 - а) змінити керувальний сигнал, використовуючи блоки Builder, Sine Wave;
 - б) змінити параметри коефіцієнтів.
6. Висновки про виконану роботу.
7. Відповіді на контрольні запитання.
8. Файл з моделлю.

Практична робота № 6

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ БЛОКІВ БІБЛІОТЕКИ SIMMECHANICS НА ПРИКЛАДІ СТВОРЕННЯ КІНЕМАТИКИ ТРИЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

Мета роботи: ознайомитися з основними елементами бібліотеки Simmechanics на прикладі побудови простої моделі (кінематики триланкового маніпулятора), навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та виконувати дослідження моделі, змінюючи параметри моделі.

Завдання:

1. Ознайомитись з бібліотекою SimMechanics.
2. Побудувати кінематичну схему триланкового маніпулятора.
3. Налаштувати вхідні сигнали керування, візуалізувати рух маніпулятора, провести дослідження впливу параметрів.
4. Зробити висновки та оформити звіт.

Порядок виконання роботи

Почнемо моделювати просту механічну систему та досліджувати її поведінку за різних умов. Ця робота ілюструє основні етапи побудови фізичної моделі та знайомить з використанням основних блоків Simmechanics.

На рисунку 3.67 показано просту кінематичну схему триланкового маніпулятора, який складається з обертальних ланок. Імітується маса, яку переміщує маніпулятор. Можна змінювати параметри моделі, такі як маса тіла або профіль сили, а також переглядати отримані зміни швидкості та положення тіла.



Рисунок 3.67 – Кінематична схема триланкового маніпулятора

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти для створення моделі маніпулятора

Номер варіанта	l	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	m	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
1	0.785	0.6	5.8	5.8	26	1950	0.275	200	0.05	78
2	0.55	16.5	0.7	16.5	78	2330	2.8	117	0.043	94
3	0.7	9.4	9.4	0.7	46	3880	2.94	96	0.044	156
4	0.875	33.3	33.3	9.1	194	4202	2.97	120	0.055	168

Щоб створити еквівалентну схему Simscape, виконайте такі дії:

1. Відкрийте браузер Simulink® бібліотеки.
2. Створіть нову модель, як у попередніх роботах.
3. Відкрийте бібліотеку Simscape > SimMechanics library (рисунок 3.68). Тут наведено всі основні механічні елементи.
4. Далі зайдіть до бібліотеки SimScape > SimMechanics > SimMechanics First Generation > Joints і виберіть Revolute (обертальне

зчленування). Тут встановлюються параметри 1 – осі обертання та 2 – кількість входів/виходів (рисунок 3.69). Для прикладу встановіть обертання по осі x і два порти входу-виходу.

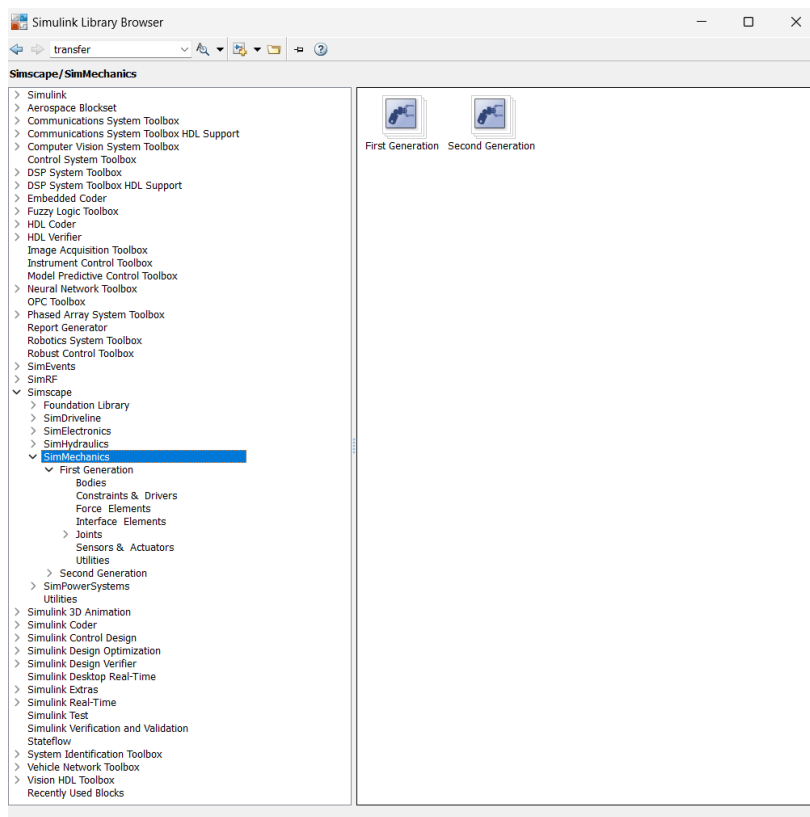


Рисунок 3.68 – Вікно бібліотеки механічних елементів

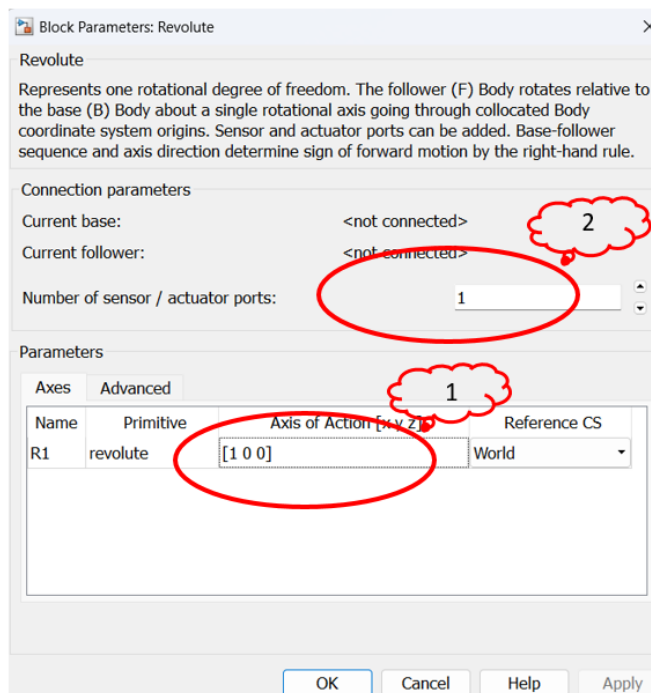


Рисунок 3.69 – Вікно налаштувань блока обертального зчленування

5. Далі зайдіть до бібліотеки SimScape > SimMechanics > SimMechanics First Generation/Bodies та виберіть блок Body (жорстке тіло) (рисунок 3.70). В цьому блоці прописується вага ланки, інерційні параметри, геометричні розміри тіла.

Block Parameters: Body

Body

Represents a user-defined rigid body. Body defined by mass m , inertia tensor I , and coordinate origins and axes for center of gravity (CG) and other user-specified Body coordinate systems. This dialog sets Body initial position and orientation, unless Body and/or connected Joints are actuated separately. This dialog also provides optional settings for customized body geometry and color.

Mass properties

Mass: 78 kg

Inertia: [16.5 0 0; 0 16.5 0; 0 0 0.7] kg*m^2

Position | Orientation | Visualization

Show Port	Port Side	Name	Origin Position Vector [x y z]	Units	Translated from Origin of	Components in Axes of
☐	Left	CG	[0 0 0]	m	World	World
☒	Left	CS1	[0 0 0]	m	World	World
☒	Right	CS2	[0 0 0.55]	m	CS1	CS1

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.70 – Вікно налаштувань елемента Body

Блок Ground (Заземлення) використовується для фіксації одного з тіл до нерухомої опори — тобто для створення базової (неподвижної) точки відліку у механічній системі. (рисунок 3.71).

Block Parameters: Ground

Ground

Grounds one side of a Joint to a fixed location in the World coordinate system.

Parameters

Location [x,y,z]: [0 0 0] m

☐ Show Machine Environment port

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.71 – Вікно налаштувань елемента Ground

Блок Joint Actuator (Двигун) – призначено для надання руху в механічному зчленуванні (рисунок 3.72).

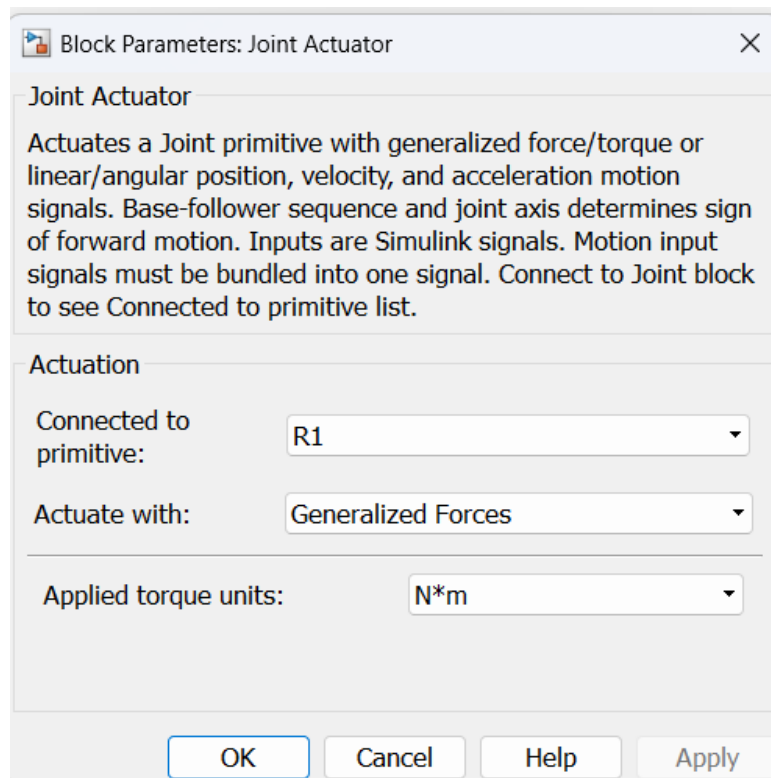


Рисунок 3.72 – Вікно налаштувань блока Joint Actuator

6. З цих елементів створіть модель маніпулятора, послідовно прописуючи розміри ланок та осі обертання ланок (рисунок 3.73).

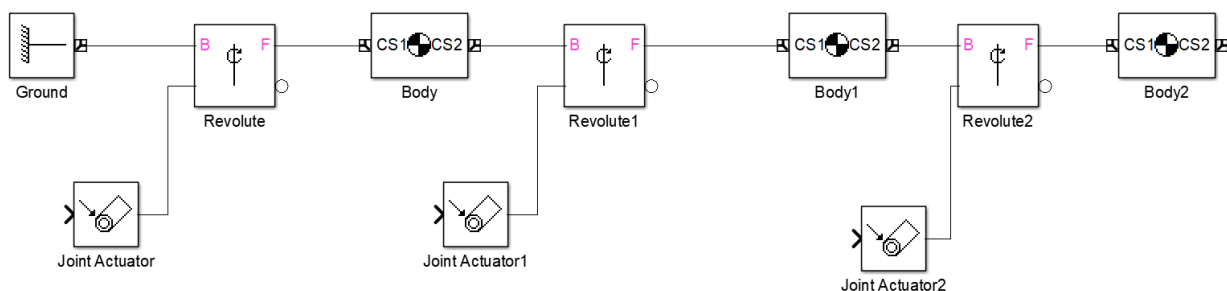


Рисунок 3.73 – Блок-схема трьох ланок маніпулятора

7. Блок-схему маніпулятора завершено. Збережіть її (назву запишіть латиницею).

На початку симуляції необхідно візуалізувати результати моделювання. Для цього слід активувати опцію Show animation during simulation (рисунок 3.74). У розділі SimMechanics 1G знайдіть опцію Show animation during simulation і встановіть біля неї галочку. Потім натисніть

кнопку Apply (Застосувати), щоб зберегти зміни, а далі OK, щоб закрити вікно Model Configuration Parameters.

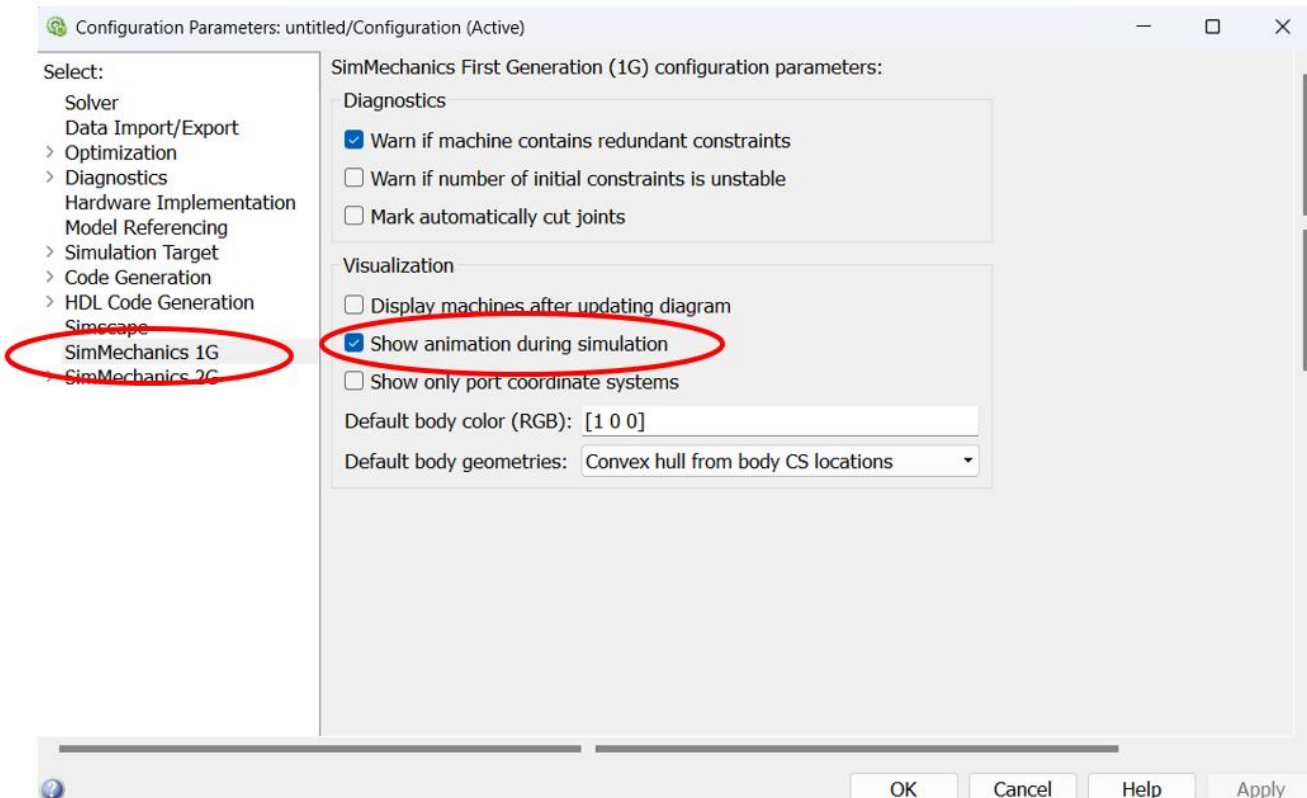


Рисунок 3.74 – Вікно налаштувань SimMechanics 1G

Зміна початкових налаштувань

Після того як зібрано блок-схему моделі, необхідно вибрати вирішувач та забезпечити правильні значення параметрів конфігурації.

Збережіть модель.

Запуск симуляції

Після того як зібрано блок-схему та вказано початкові параметри моделі, можемо запустити симуляцію, як у попередніх роботах. Simscape-вирішувач оцінює модель, розраховує початкові умови і виконує симуляцію. Цей етап може тривати декілька секунд. Хід симуляції відображається у вигляді повідомлень у нижньому лівому кутку вікна моделі — там надається оновлення статусу в реальному часі.

Під час запуску симуляції виконується розрахунок динаміки системи, після чого автоматично відкривається вікно візуалізації руху механічної системи (рисунок 3.75).

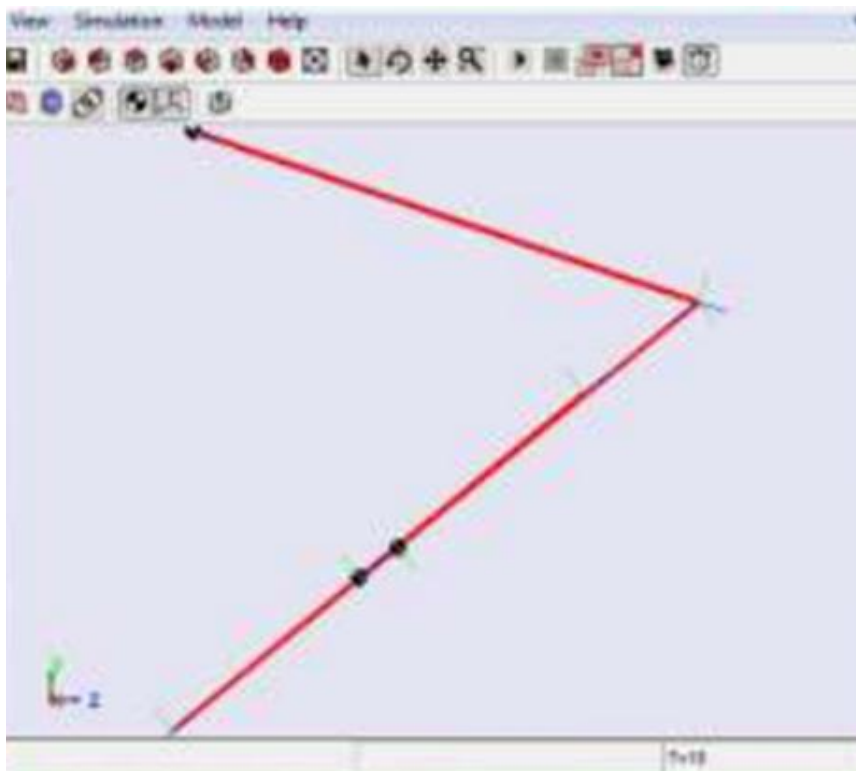


Рисунок 3.75 – Вікно анімації ланок моделі маніпулятора

Маніпулятор перебуває у безконтрольному стані. Для підпорядкування його нашим вказівкам під'єднайте до двигунів маніпулятора керувальні сигнали та задайте бажане положення для кожного зчленування. Наприклад, поставте на кожне зчленування значення 45 градусів (рисунок 3.76).

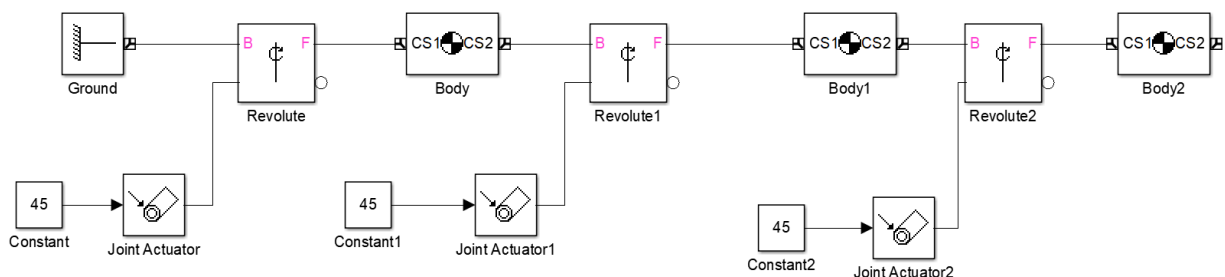


Рисунок 3.76 – Модель дослідження маніпулятора з урахуванням параметрів для обертання ланок

Кожен двигун виконує певне завдання. Задля нормалізації роботи маніпулятора під'єднайте до двигунів регулятори та забезпечте зворотним зв'язком, візьміть датчики. Зайдіть до бібліотеки SimScape > SimMechanics > SimMechanics First Generation > Sensors & Actuators > Joint Sensor (рисунок 3.77).

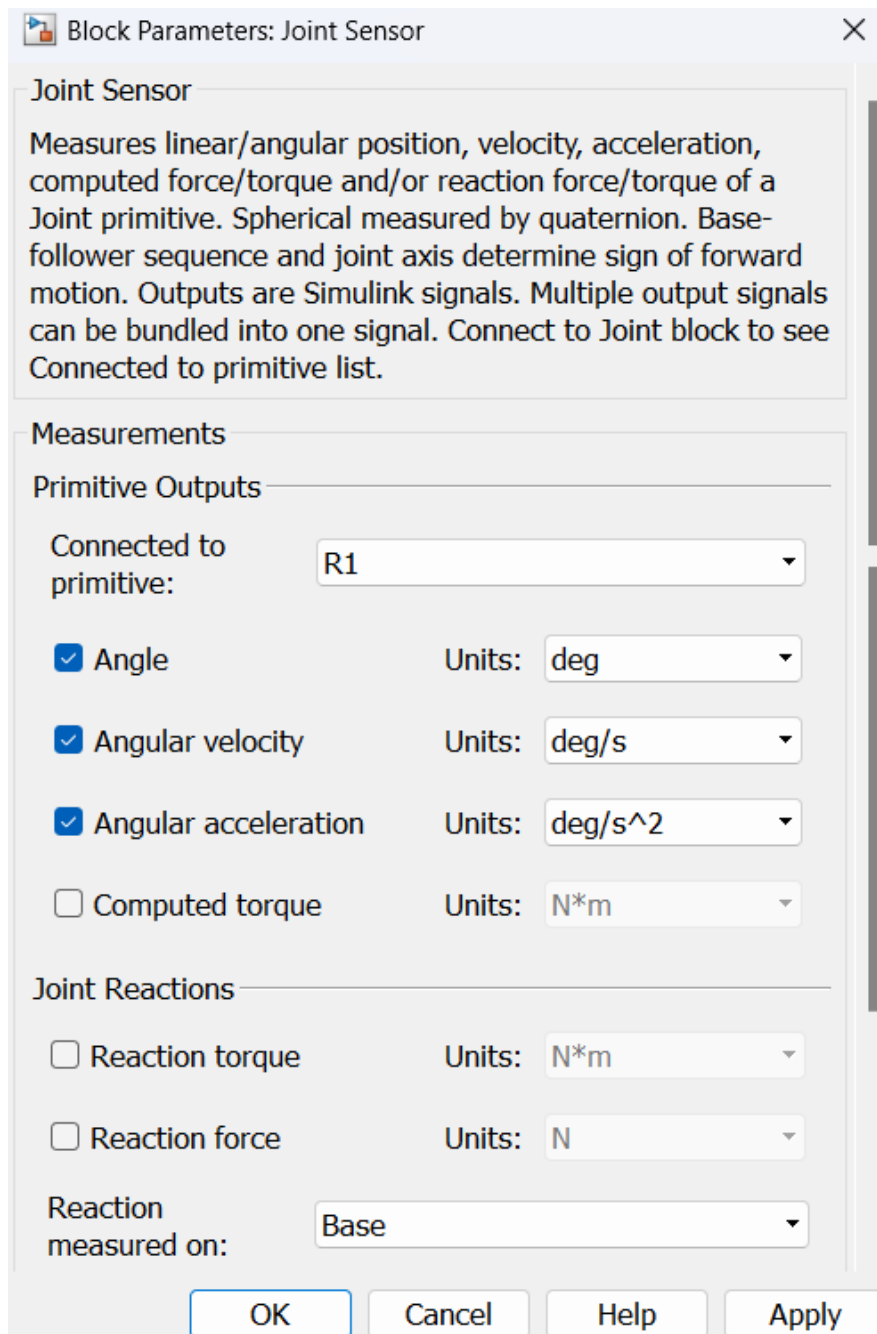


Рисунок 3.77 – Вікно налаштувань сенсора

Виставте необхідні для вимірювання параметри: кут, кутову швидкість та прискорення.

Також під'єднайте регулятор (його створення описано в попередній практичній роботі), тут буде невелика зміна: замість блоків моделі двигуна використовуйте блок Joint Actuator. Відповідно до нашої моделі, блоки параметрів двигуна видаляються. Для адекватної роботи регулятора значення положення, швидкості та прискорення візьміть з блока датчика Joint Sensor та швидкості й прискорення у зворотному зв'язку регулятора. На рисунку 3.78 показано модель блоків регулятора приводу.

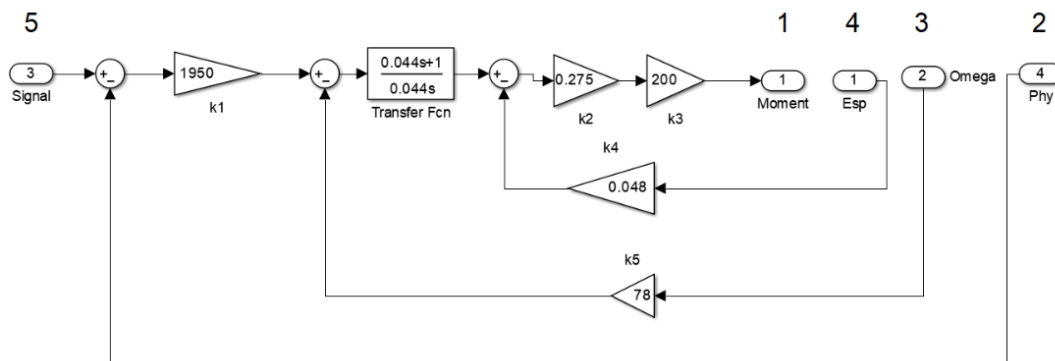


Рисунок 3.78 – Підсистема регулятора двигуна для задання кута повороту кожній ланці: 1 – вихід (Moment); 2 – кут (Phy); 3 – швидкість (Omega); 4 – прискорення (Eps); 5 – вхідний сигнал

Під'єднайте всі елементи так, як показано на рисунку 3.79.

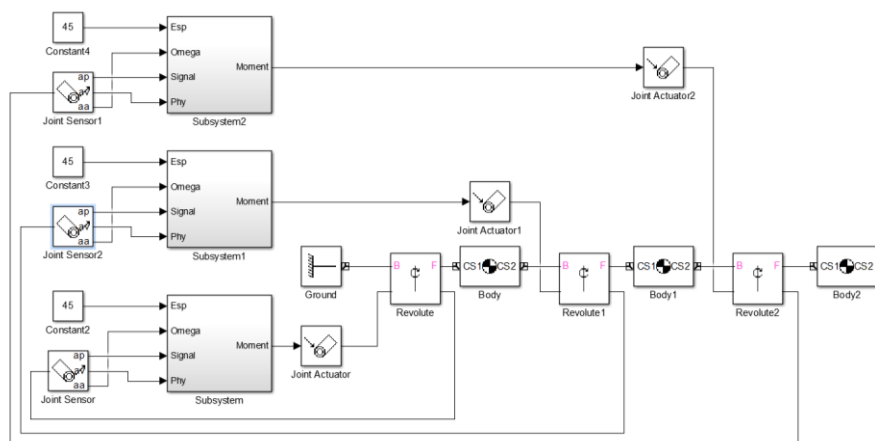


Рисунок 3.79 – Модель маніпулятора з підсистемами керування двигунами кожної ланки

Тепер маніпулятор виконує задану команду та утримує положення.

Регулювання параметрів

Після запуску початкового моделювання можна експериментувати з різним регулюванням входів та параметрами блоків.

Спробуйте такі опції: змініть значення керувального сигналу (по три варіанти для кожного приводу).

Контрольні запитання

1. Що можна зробити за допомогою блока Body?
2. Опишіть блок Joint Actuator, для яких функцій він використовується?

3. Які головні параметри налаштування вирішувача (Solver) в Matlab у певній моделі?
4. Які головні налаштування блока Revolute і яке його призначення?
5. Перелічіть головні елементи моделі.
6. Поясніть методику створення моделі тіл маніпулятора.
7. Чи буде працювати модель без зворотного зв'язку регуляторів?
8. Як змінюється реакція моделі на зміну вхідних значень блоків Constant?
9. Якою буде поведінка моделі, якщо на рисунку 3.76 роз'єднати лінії від Constant до Join Actuator?
10. Як зображено центр маси ланки на анімації моделювання?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.
3. Опис використовуваних елементів та налаштувань.
4. Модель системи.
5. Налаштування параметрів та їх аналіз зміни значення вхідного сигналу для кожного приводу.
6. Висновки про виконану роботу.
7. Відповіді на контрольні запитання.
8. Файл з моделлю.

Практична робота № 7

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЛОКІВ БІБЛІОТЕКИ SIMULINK НА ПРИКЛАДІ ТРИЛАНКОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

Мета роботи: засвоїти основні елементи бібліотеки Simulink на прикладі побудови простої моделі (системи керування триланкового маніпулятора), навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та виконувати дослідження моделі, змінюючи параметри моделі.

Завдання:

1. Ознайомитися з основними блоками бібліотеки Simulink.
2. Створити математичну модель триланкового маніпулятора.
3. Розробити систему керування рухом кожного зчленування маніпулятора.
4. Провести моделювання роботи маніпулятора, проаналізувати поведінку системи.

5. Зробити висновки щодо ефективності побудованої моделі та системи керування і оформити звіт.

Порядок виконання роботи

Дослідження прямої задачі щодо положення

Для знаходження положення та орієнтації ланок маніпулятора використовують спеціальні системи координат ланок. У цій роботі використовується система координат, запропонована Денавітом і Хартенбергом 1955 року. Побудову системи координат Денавіта – Хартенберга для маніпулятора з N ступенями рухливості ($N+1$ ланка) опишіть у вигляді алгоритму, що полягає у виконанні послідовності кроків, зображеної на рисунку 3.80.

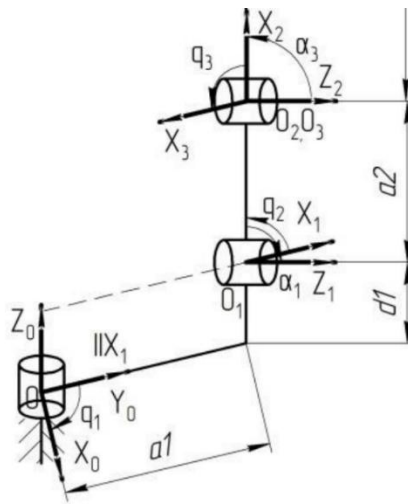
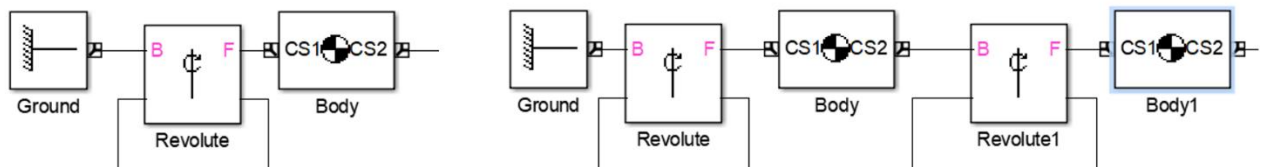


Рисунок 3.80 – Кінематична схема маніпулятора

Створіть кінематичну модель маніпулятора в середовищі Matlab. Для цього використайте програму Simulink Matlab. Створіть першу ланку маніпулятора (рисунок 3.81, а) та під'єднайте другу (рисунок 3.81, б).



а

б

Рисунок 3.81 – Блоки для створення ланок маніпулятора: а – перша ланка; б – перша та друга ланки

Аналогічно під'єднуємо інші ланки. Таким чином, створюємо кінематичну модель робота.

Запустивши моделювання, бачимо умовне зображення маніпулятора з шістьма ланками (рисунок 3.82).

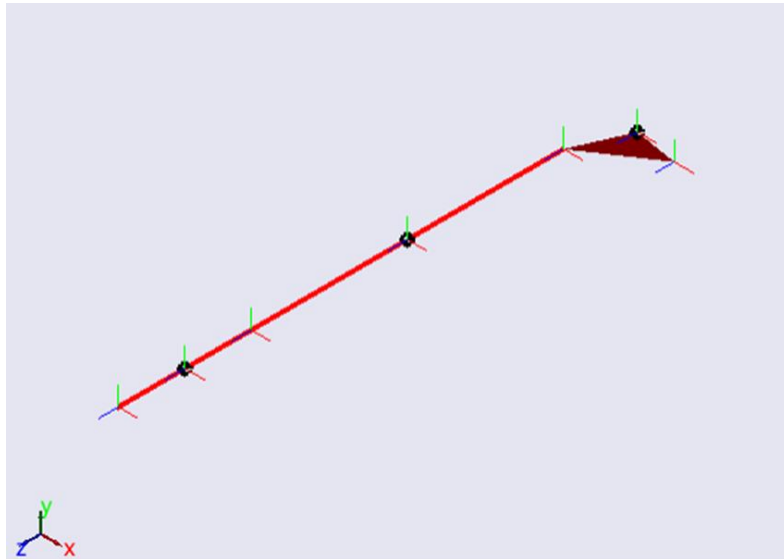


Рисунок 3.82 – Результат моделювання кінематики робота

Для розв'язання прямої та зворотної задачі виконайте такі кроки.

Крок 1. Побудова абсолютної системи координат.

Побудуйте праву ортогональну систему координат $O_0X_0Y_0Z_0$, спрямувавши Z_0 уздовж осі першого зчленування у напрямку схоплення.

Крок 2. Ініціалізація циклу.

Для всіх $i = 1, 2, \dots, N$ виконайте кроки 3–6.

Крок 3. Побудова Z_i .

Спрямуйте вісь Z_i уздовж осі $(i+1)$ -го шарніра. При $i = N$ (тобто для схоплення) виберіть вісь Z_N у напрямку осі Z_{N-1} .

Крок 4. Побудова початку i -ї системи координат.

Виберіть початок i -ї системи координат у точці перетину осей Z_{N-1} та Z_N або в точці перетину осі Z_i та загальної нормалі до осей Z_{N-1} та Z_N (якщо осі Z_{N-1} та Z_N не перетинаються).

Крок 5. Побудова осі X_i .

Спрямуйте вісь X_i уздовж загальної нормалі до осей Z_{i-1} і Z_i (уздовж вектора (z_{i-1}, z_i) , де z_{i-1} та z_i – орти відповідної системи координат).

Крок 6. Побудова осі Y_i .

Спрямуйте вісь Y_i так, щоб отримана внаслідок цього система координат $O_iX_iY_iZ_i$ була правосторонньою.

Крок 7. Знаходження параметрів.

Для всіх $i = 1, 2, \dots, N$ виконайте кроки 8–11.

Крок 8. Знаходження d_i .

Параметр d_i дорівнює відстані від початку $(i-1)$ -ї системи координат до точки перетину осей Z_{i-1} та X_i , вимірюваному у напрямку осі Z_{i-1} . Якщо i -те зчленування телескопічне, то d_i є узагальненою координатою.

Крок 9. Знаходження a_i .

Параметр a_i дорівнює відстані від точки перетину осей Z_{i-1} та X_i до початку i -ї системи координат, вимірюваного у напрямку осі X_i .

Крок 10. Знаходження q_i .

Параметр q_i дорівнює куту повороту осі X_{i-1} навколо осі Z_{i-1} до її збігу з віссю X_i . Якщо i -те зчленування обертальне, q_i є узагальненою координатою.

Крок 11. Знаходження α_i .

Параметр α_i дорівнює куту повороту осі Z_{i-1} навколо осі X_i до її збігу з віссю Z_i .

Крок 12. Кінець [4].

Таблиця 3.3 – Параметри кінематичної схеми маніпулятора

Ланка/Параметр	d	a	α	q
1	250	150	$\pi/2$	q_1
2	0	706	0	q_2
3	0	0	$\pi/2$	q_3

Після визначення положення маніпулятора у робочому просторі необхідно розв'язати основні задачі, пов'язані з визначенням співвідношень між координатами схоплення маніпулятора, заданими в різній формі: з одного боку, положення схоплення однозначно визначається узагальненими координатами багатоланкового механізму, а з іншого – шістьма числами, що задають положення та орієнтацію пов'язаної з ним системи координат. Розв'язано: пряму і обернену задачу щодо положення.

Пряму позиційну задачу формулюють таким чином: за заданим вектором узагальнених координат $q = (q_1, q_2, \dots, q_N)$ знайти положення та орієнтацію схоплення $s = (f)$. Положення та орієнтацію схоплення шукатимемо у формі матриці однорідного перетворення

$$T = \begin{bmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Нехай A_i , $i = 1, 2, \dots, N$ – матриці, що задають перехід від системи координат i -ї ланки до системи координат $(i-1)$ -ї ланки. Тоді, очевидно, матриця (3.4) є розв'язком задачі

$$T_N = A_1 A_2 \dots A_N. \quad (3.4)$$

Вводячи матрицю

$$T_i = A_1 A_2 \dots A_i, \quad (3.5)$$

отримуємо рекурентне співвідношення, наприклад:

$$T_i = T_{i-1} A_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.6)$$

$$T_0 = E. \quad (3.7)$$

Співвідношення (3.6) дає змогу не тільки записати розв'язок прямої задачі про положення схоплення в компактній формі, але також знайти положення та орієнтацію всіх ланок маніпулятора, оскільки матриця T визначає положення та орієнтацію i -ї ланки. Співвідношення (3.7) – одинична матриця. Зрозуміло, що для визначення положення k -ї ланки щодо i -ї ($k < i$) можна використати таке співвідношення:

$$T_K = A_{k+1} A_{k+2} \dots A_i. \quad (3.8)$$

Вид матриць A_i , що входять до матриць 4×4 , залежить від способу вибору систем координат ланок.

Визначте вид матриць у разі використання виразу Денавіта – Хартенберга. Відповідно до способу побудови систем координат, для суміщення $(i - 1)$ -ї системи координат $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$ з i -ю системою координат $O_i X_i Y_i Z_i$ слід виконати таку послідовність операцій.

1. Поворот навколо осі Z_{i-1} на кут q_i (осі X_{i-1} і X_i паралельні).
2. Зсув уздовж осі Z_{i-1} на d_i (осі X_{i-1} та X_i збігаються).
3. Зсув уздовж осі X_{i-1} на a_i (початки координат O_{i-1} та O_i збігаються).
4. Поворот навколо осі X_{i-1} на кут α_i (системи координат $O_i X_i Y_i Z_i$ та $O_{i-1} X_{i-1} Y_{i-1} Z_{i-1}$ збігаються).

Кожну з цих операцій можна подати відповідною однорідною матрицею:

$$Rot_{(z,q_i)} = \begin{pmatrix} R_{zq_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad (3.9)$$

$$Trans_{(z,d_i)} = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_i & 1 \end{pmatrix}; \quad (3.10)$$

$$Trans_{(x,a_i)} = \begin{pmatrix} E & a_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (3.11)$$

$$Rot_{(x,a_i)} = \begin{pmatrix} R_{x_{a_i}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

де матриці повороту R_{x_a} , R_{z_q} визначаються виразами

$$R_{x_\varphi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi & c_\varphi \end{pmatrix}; \quad (3.13)$$

$$R_{y_\varphi} = \begin{pmatrix} c_\varphi & 0 & s_\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\varphi & 0 & c_\varphi \end{pmatrix}; \quad (3.14)$$

$$R_{z_\varphi} = \begin{pmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 \\ s_\varphi & c_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

Тоді маємо: $A_i = Rot(Z_i q_i) Trans(Z_i d_i) Trans(X_i a_i) Rot(X_i \alpha_i)$.

Перемножуючи матриці, що стоять праворуч, остаточно отримуємо

$$A_i(d_i, a_i, q_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c_{q_i} & -c_{\alpha_i} s_{q_i} & s_{\alpha_i} s_{q_i} & a_i c_{q_i} \\ s_{q_i} & c_{\alpha_i} s_{q_i} & -s_{\alpha_i} c_{q_i} & a_i s_{q_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Використовуємо обернену до A_i матрицю (тобто матрицю переходу від $(i-1)$ -ї до i -ї системи координат). Подаємо її у вигляді

$$A_i^{-1}(d_i, a_i, q_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c_{q_1} & s_{q_1} & 0 & -a_i \\ -c_{\alpha_i} s_{q_i} & c_{\alpha_i} c_{q_i} & s_{\alpha_i} & -d_i s_{\alpha_i} \\ s_{\alpha_i} s_{q_i} & -s_{\alpha_i} c_{q_i} & c_{\alpha_i} & -d_i c_{\alpha_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

Таким чином, співвідношення (3.7) та (3.8) є розв'язком прямої позиційної задачі. Знайдемо матриці переходу.

$$A_i(d_1, a_1, q_1, \alpha_1) \rightarrow \begin{pmatrix} c_{q_1} & 0 & s_{q_1} & 150 * c_{q_1} \\ s_{q_1} & 0 & -c_{q_1} & 150 * s_{q_1} \\ 0 & 1 & 0 & 250 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (3.18)$$

$$A_i(d_2, a_2, q_2, \alpha_2) \rightarrow \begin{pmatrix} c_{q_2} & -s_{q_2} & 0 & 706 * c_{q_2} \\ s_{q_2} & c_{q_2} & 0 & 706 * s_{q_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (3.19)$$

$$A_i(d_3, a_3, q_3, \alpha_3) \rightarrow \begin{pmatrix} c_{q_3} & 0 & s_{q_3} & 0 \\ s_{q_3} & 0 & -c_{q_3} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.20)$$

Для визначення матриці T_3 запишемо її так:

$$T_3 = A_1 A_2 A_3. \quad (3.21)$$

Записуємо матрицю T_3 як

$$T_3 = \begin{pmatrix} x_{3_x} & y_{3_x} & z_{3_x} & p_x \\ x_{3_y} & y_{3_y} & z_{3_y} & p_y \\ x_{3_z} & y_{3_z} & z_{3_z} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

Далі розв'язуємо пряму кінематичну задачу щодо визначення положення блоків у середовищі Matlab Simulink. Для цього необхідно відкрити браузер бібліотеки Simulink®. За потреби можна скористатися раніше створеною моделлю. У бібліотеці Simulink подано всі основні елементи, необхідні для побудови моделі (рисунок 3.83).

Для дослідження адекватності роботи побудованої моделі створіть модель розв'язання прямої кінематичної задачі в середовищі Matlab. Реалізуйте обчислення однорідних матриць переходу між системами координат, наприклад, від першої системи координат до нульової (рисунок 3.86).

Використовуйте елементи Мультіплексор (Multiplexer) із такими параметрами, як показано на рисунку 3.84.

Також використаємо блок з'єднувача вхідних сигналів з такими параметрами, як показано на рисунку 3.85.

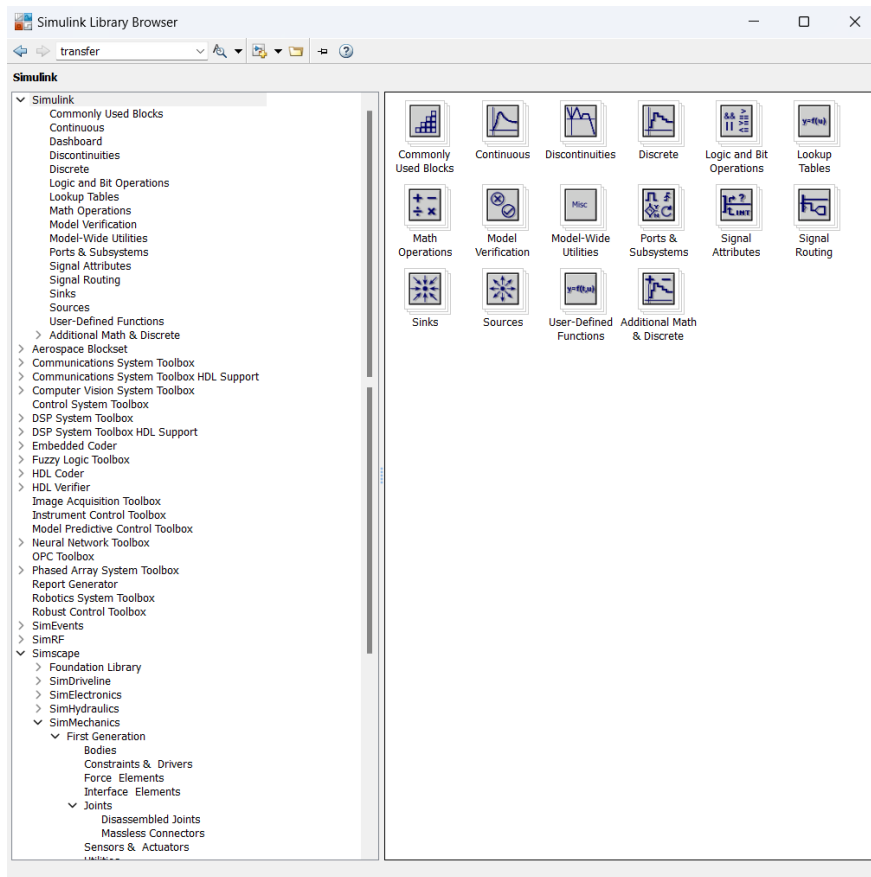


Рисунок 3.83 – Бібліотеки з елементами для збирання досліджуваної схеми

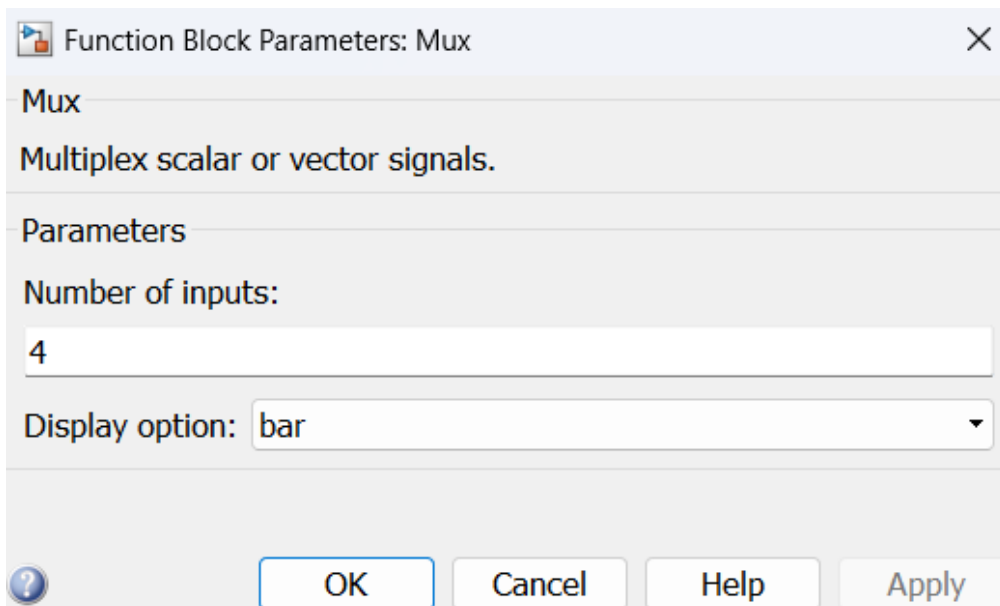


Рисунок 3.84 – Вікно налаштувань блока Мультимплексор

Таким чином, чотири рядки по чотири елементи об'єднуються в один сигнал, який надалі трансформується у матрицю розміром 4x4 за допомогою блока Transpose.

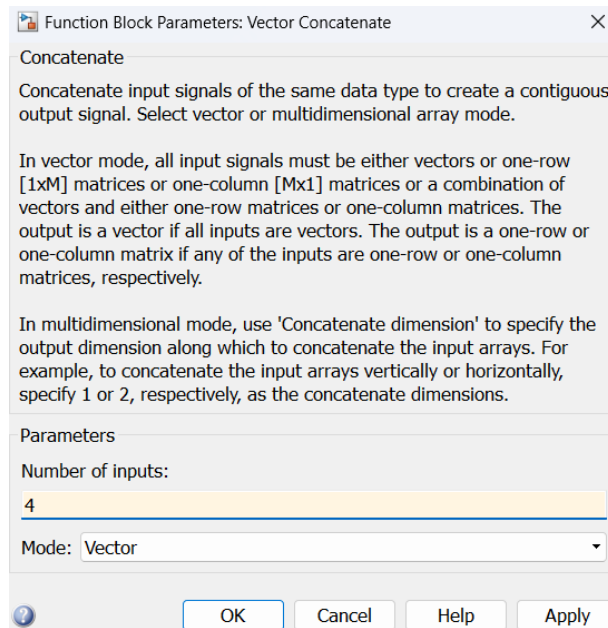


Рисунок 3.85 – Вікно налаштувань блока З'єднувач

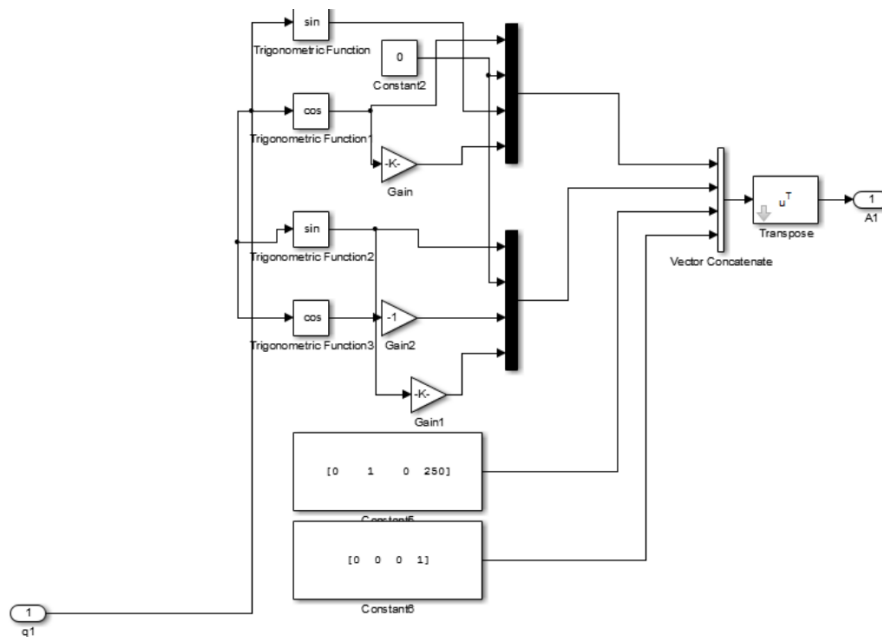
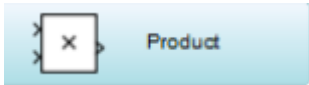


Рисунок 3.86 – Однорідна матриця переходу від першої до абсолютної системи координат

Аналогічно виконайте побудову однорідних матриць переходу для наступних ланок кінематичного ланцюга. Після цього сформуєте матриці, які визначають положення кожної ланки в абсолютній (глобальній) системі координат. Матриця T_3 (однорідна матриця перетворення) розв'язується так, як показано на рисунку 3.87.

Виберіть елемент для множення , зайдіть у налаштування та виберіть вид множення – матричний (у полі Multiplication).

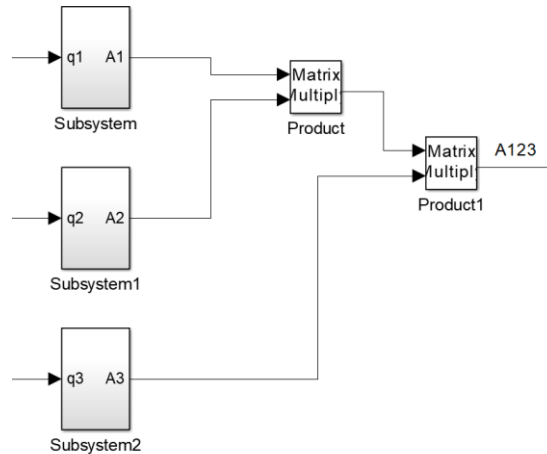


Рисунок 3.87 – Матриця T_3 , що визначає положення третьої ланки

Результати блока розв'язання прямої задачі занесіть до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення щодо кутів повороту ланок

q_1	q_2	q_3	T_3
0	0	0	
20	20	20	
45	45	45	
70	70	70	
90	90	90	
20	70	35	
80	35	50	

Дослідження оберненої задачі про положення

Обернена задача щодо положення формулюється в такий спосіб. При заданому положенні та орієнтації схоплення $s = s^*$ або при заданій однорідній матриці перетворення $T_N = T_N^*$ необхідно знайти узагальнені координати $q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_N^*)^T$.

Якщо позначити

$$s = f_s(q) \quad (3.23)$$

або

$$T_N = f_T(q), \quad (3.24)$$

то шукані кути q^* будуть задаватися співвідношенням

$$q^* = f^{-1}_T(T^*_N) \quad (3.25)$$

або

$$q^* = f^{-1}_T(T^*_N). \quad (3.26)$$

Таким чином, у загальному випадку розв'язання оберненої позиційної задачі зводиться до розв'язання нелінійної тригонометричної системи з шести рівнянь при N невідомих – узагальнених координатах маніпулятора. Відомо, що такого роду системи можуть мати різну кількість розв'язків:

- не мати розв'язку. Це означає, що заданих положень та орієнтації схоплення системи не можна досягти жодним вибором кутів (переміщень) у зчленуваннях;

- мати єдиний розв'язок. Це означає, що існує лише одна конфігурація узагальнених координат, яка забезпечує задане положення ефектора.

- мати більше одного розв'язку. Це означає, що існує кілька (або нескінченно багато) конфігурацій маніпулятора, які забезпечують задане положення та орієнтацію схоплення.

Вміння розв'язувати обернену задачу про положення є надзвичайно важливим для керування маніпулятором. Справді, якщо програмний рух маніпулятора задано у вигляді траєкторії його схоплення $s(t)$ (або $T_N(t)$, що еквівалентно), то для керування зчленуваннями слід забезпечити такі $q(t)$, щоб у кожний момент часу виконувалось співвідношення (3.21). Однак, на жаль, не існує загального методу розв'язання цієї системи у явному вигляді (не існує універсальної формули, яка б дозволила обчислити узагальнені координати), а саме це і є бажаним, оскільки керування маніпулятором здійснюється в режимі онлайн (втім, і застосування чисельних методів також пов'язано з деякими труднощами, пов'язаними з можливою розбіжністю відповідних ітераційних схем).

Є три методи розв'язання оберненої задачі про положення: метод обернених перетворень, тригонометричний підхід, ітераційний метод. Вибір одного з наведених методів розв'язання оберненої задачі положення здійснюється з урахуванням особливостей кінематичної структури конкретного маніпулятора.

Наприклад, метод обернених перетворень розв'язується за таким алгоритмом.

Матриця T_N , що визначає положення та орієнтацію схоплення, має вигляд

$$T_N = A_1 A_2 \dots A_{N-1} A_N, \quad (3.27)$$

де $A = A_i(q_i)$ – матриці переходу від i -ї до $(i-1)$ -ї системи координат маніпулятора.

Тоді, помножуючи співвідношення (3.4) на A_1^{-1} (нагадаємо, що матриця A_i невироджена), маємо

$$A_1^{-1}(q_1)T_N = A_2 \dots A_{N-1} A_N. \quad (3.28)$$

Через те що матриця T_N відома, нам вдалося дозволити співвідношення (3.28) щодо q_1 . Якщо структура така, що вдається знайти q_1 , цей процес повторюємо для $q_2, q_3, \dots, q_N$. Зрозуміло, що, помножуючи (3.27) праворуч на A_N^{-1} , аналогічно, можна знайти q_N . Цей метод був використаний у роботі [3] під час розв'язання оберненої позиційної задачі для маніпулятора PUMA.

Використовуємо тригонометричний підхід до розв'язання оберненої задачі про положення.

Визначивши матрицю $T_3 = A_1 A_2 A_3$ та прийнявши її останній стовпець вектора, отримаємо

$$\begin{aligned} P_{x3} &= (706 \cdot \cos(q_2) + 150)\cos(q_1); \\ P_{y3} &= (706 \cdot \cos(q_2) + 150)\sin(q_1); \\ P_{z3} &= 706 \cdot \cos(q_2) + 250. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Ці співвідношення є системою трьох тригонометричних рівнянь із трьома невідомими q_1, q_2, q_3 .

Розв'яжіть систему рівнянь (3.29). Помножуючи перше рівняння системи на s_1 , друге рівняння на c_1 і підсумовуючи їх, отримуємо

$$p_{x3}s_1 - p_{y3}c_1 = 0. \quad (3.30)$$

Оскільки $p_{x3}^2 - p_{y3}^2 > 0$, рівняння (3.30) має розв'язок.

Для розв'язання (3.30) скористаємося відомими тригонометричними співвідношеннями. Розв'язуючи квадратне рівняння, отримуємо

$$q_1 = \arctan \left[\frac{p_{y3}}{p_{x3}} \right]. \quad (3.31)$$

І так далі, розв'язуючи системи рівнянь, знаходимо всі кути.

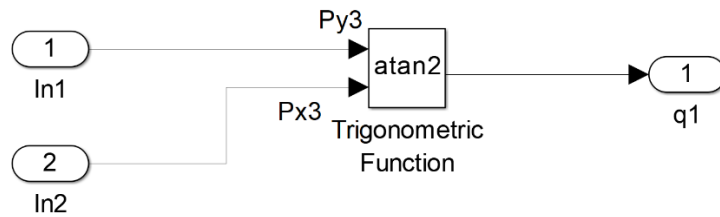


Рисунок 3.88 – Розв’язання рівняння (4.33)

Запишемо результати дослідження у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати дослідження блока розв’язання оберненої задачі про положення

q_1	q_2	q_3	Результат
0	0	0	
20	20	20	
45	45	45	
60	60	60	
90	90	90	

+ – задане положення кутів приводу досягнуто.

Контрольні запитання

1. Що таке пряма задача про положення?
2. Що таке обернена задача про положення?
3. Яку матрицю називають транспонованою?
4. Яку матрицю називають оберненою?
5. Яка система координат використовується для розв’язання задач про положення?
6. Якщо ланка маніпулятора має форму зі зміщеннями, схожими на цифру сім (7), чи можна таку форму змодельовати і яким чином?
7. Які є узагальнені координати і як вони позначаються?
8. Опишіть правило правої руки для побудови системи координат.
9. Яке призначення блока Ground?
10. Які є вісі систем координат?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.
3. Опис використовуваних елементів та налаштувань.
4. Модель системи.
5. Налаштування параметрів та їх аналіз:

- а) написати матрицю T_3 (Результат після перемноження матриць переходу у символічному вигляді);
- б) заповнити таблицю 3.5.
- 6. Висновки про виконану роботу.
- 7. Відповіді на контрольні запитання.
- 8. Файл з моделлю.

Практична робота № 8

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Мета роботи: засвоїти основні елементи побудови мереж Петрі на прикладі побудови простої моделі у програмному продукті YASPER. Навчитися створювати модель, налаштовувати основні параметри, моделювати та виконувати дослідження моделі, змінюючи її параметри.

Завдання:

1. Ознайомлення з основами теорії мереж Петрі.
2. Навчитися будувати та аналізувати просту модель мережі Петрі за допомогою програмного продукту YASPER.
3. Поглибити розуміння того, як ці елементи взаємодіють і як змінюється система в процесі виконання переходів.

Порядок виконання роботи

Побудова моделі у YASPER

YASPER – інструмент для моделювання ступінчастих процесів [5].

YASPER був розроблений, щоб полегшити моделювання та аналіз типових процесів потоку операцій (рисунок 3.89).

YASPER використовує розширені мережі Петрі як метод моделювання. Мережі Петрі описують процес моделювання шляхом переходів (кроки у процесі) та позиції (умови, які містяться до та після кроків). Це дозволяє ефективно аналізувати та моделювати процеси.

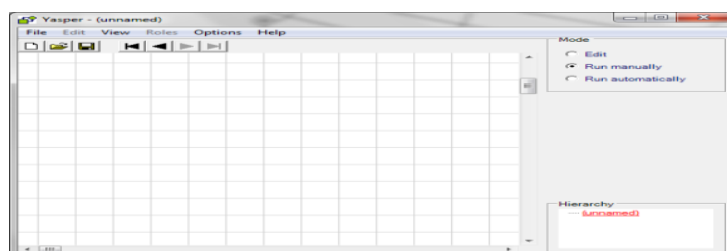


Рисунок 3.89 – Вікно середовища YASPER

Для прикладу побудуємо імітаційну модель функціонування маніпулятора, як показано на рисунку 3.90.

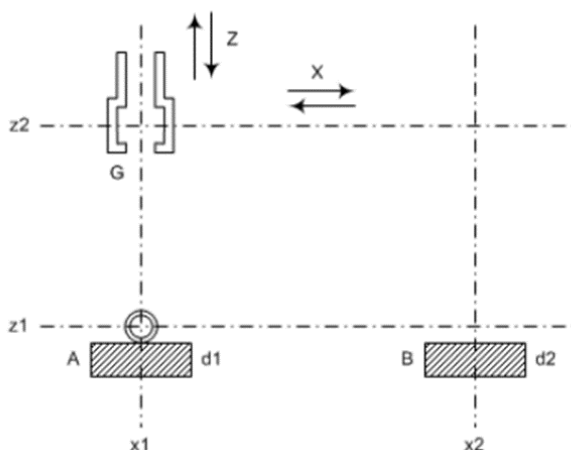


Рисунок 3.90 – Схема зони маніпулювання

Двигун Z після пуску вниз або вгору працює до повної зупинки в положеннях z_2 або z_1 . Одним із варіантів моделі, що описує його функціонування, є мережа Петрі, зображена на рисунку 3.91.

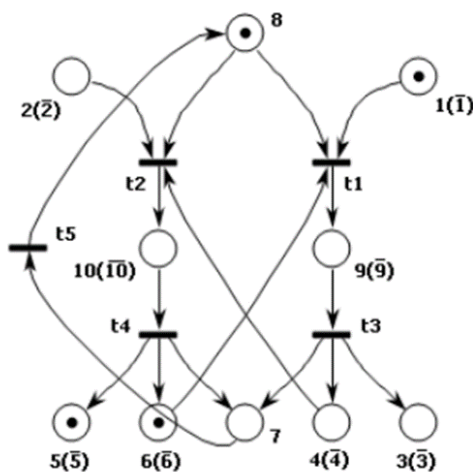


Рисунок 3.91 – Модель двигуна Z

Позиції 1, 2 описують умови запуску двигуна вниз та вгору відповідно. Наявність фішок у позиціях 3 та 4 позначає замкнутість контакту z_1 , а в позиціях 5 і 6 – контакту z_2 . Фішка у позиції 7 позначає замкнутість z_1 або z_2 . Позиція 8 моделює зупинку двигуна, а позиції 9, 10 – рух униз або вгору відповідно. Цим позиціям приписано час затримки фішки, що дорівнює часу переміщень між крайніми положеннями. Нехай фішки знаходяться у позиціях 5, 6, 8. Запуск двигуна (вниз) може бути виконано лише після появи фішки у позиції 1. При спрацюванні переходу t_1 фішка з'являється у позиції

9, що означає рух захоплювального пристрою вниз. Після спрацювання переходу t_3 (замикання контакту z_1) і переходу t_5 фішки надходять у позиції 3, 4, 8. Отримане маркування є вихідним для запуску двигуна вгору. Позиції 4, 6, 7 введено для імітації власне процесів керування двигуном Z, а позиції 3 та 5 – для імітації процесу керування маніпулятором.

Роботу двигуна X також може бути змодельовано мережею, зображеною на рисунку 3.91. При цьому позиції 1, 9, 4, 3 моделюють рух праворуч, а позиції 2, 10, 5, 6 – ліворуч. Принцип функціонування цієї мережі під час моделювання роботи двигуна X є аналогічним до вже розглянутого функціонування мережі при моделюванні двигуна Z.

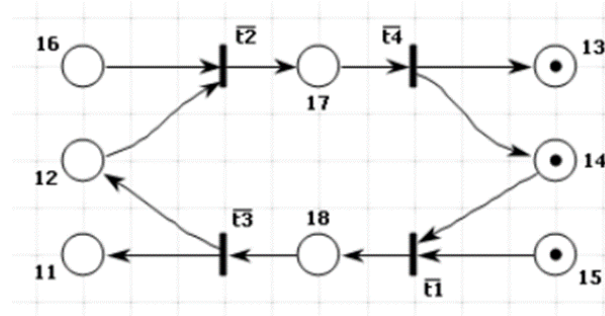


Рисунок 3.92 – Модель роботи двигуна G

Модель роботи двигуна G зображено на рисунку 3.92. Позиції 11, 12 моделюють стан «захоплювальний пристрій закритий», а позиції 13, 14 – «захоплювальний пристрій відкритий». Фішки у позиціях 15, 16 – команди на виконання одного з цих станів. Позиції 17, 18 відповідають перехідним режимам з одного стану до іншого. Цим позиціям приписано час затримки, що дорівнює часу знаходження захоплювального пристрою у відповідних станах. Перехід фішки у позицію 15 змусить спрацювати перехід t_1 , що моделює початок захоплення. Унаслідок спрацювання t_1 фішка з'являється в позиції 18 (перехід з відкритого стану в закритий). Потім спрацьовує перехід t_3 і переводить захоплювальний пристрій у закритий стан (фішки в позиціях 11, 12). Це маркування є вихідним для запуску двигуна, відкриває захоплювальний пристрій. Позиції 12, 14 необхідні для імітації власне процесів керування двигуном G, а позиції 11, 15 – для імітації процесу керування маніпулятором.

Модель функціонування маніпулятора зображено на рисунку 3.93. Початкове маркування мережі відповідає початковому стану маніпулятора (x_1, z_2, g_2) та таким умовам: деталь знаходиться на майданчику A, майданчик B вільний. З вихідного положення робота маніпулятора здійснюється за циклом: униз за деталлю, взяти деталь, угору з деталлю, вправо з деталлю, вниз із деталлю, відкрити захоплювальний пристрій, угору без деталі тощо. Повторення циклу здійснюється в тому випадку,

якщо на місці А з'явиться нова деталь, а з місця В буде прибрано деталь, перенесену туди раніше. Мережа Петрі, зображена на рисунку 3.94, є ієрархічною.

Двигуни Z, X, G у мережі моделюються наборами переходів, позначених відповідними символами. Будь-який з переходів Z, X, G з інцидентними йому вхідними та вихідними позиціями інтерпретується як процес, що відбувається в двигунах Z, X, G. Тому за необхідності зазначені переходи можна замінити моделями, зображеними на рисунках 3.92 та 3.93. Шляхом композиції будуватиметься спільна модель.

Описана модель маніпулятора є базовою основою для розроблення імітаційних моделей виробничих систем, що містять маніпулятори.

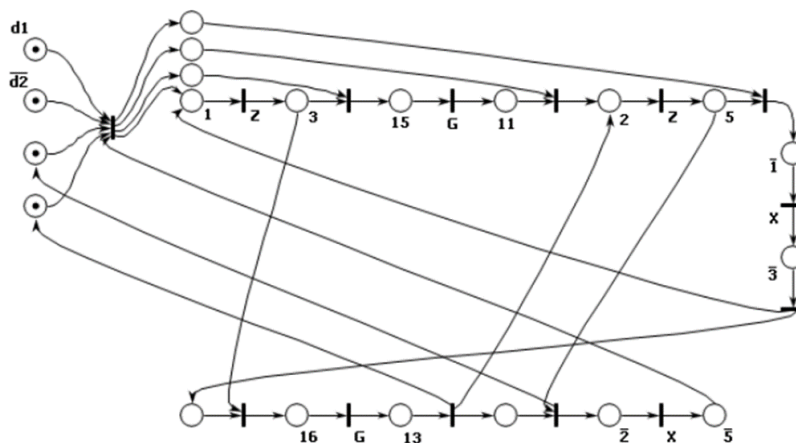


Рисунок 3.93 – Модель функціонування маніпулятора

Для побудови мережі Петрі встановимо позиції та переходи до робочої області програми (рисунок 3.94).

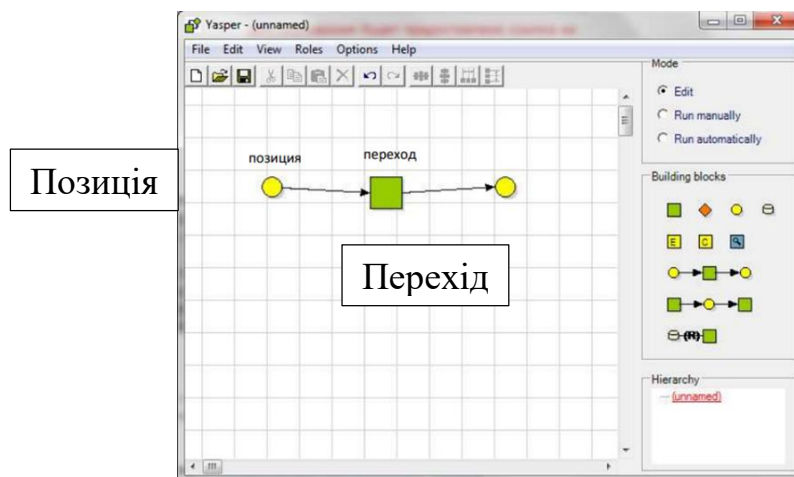


Рисунок 3.94 – Дослідження елементів Позиція та Перехід

У позиції викликаємо правою кнопкою меню та прибираємо галочку case sensitive, далі за потреби додаємо маркер add a token (рисунок 3.95).

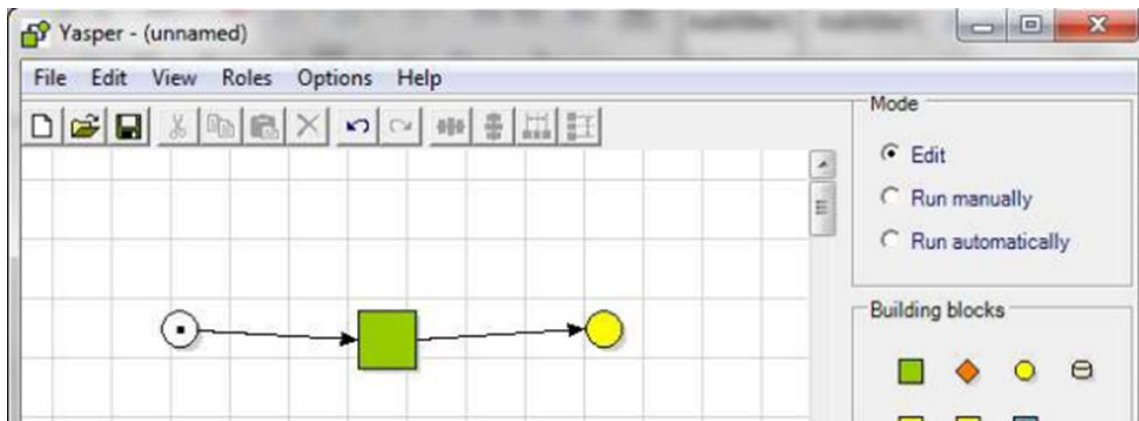


Рисунок 3.95 – Додавання tokenів

Зібрану схему запускаємо у покроковому режимі, щоб наочно відстежити послідовність роботи моделі. Ставимо галочку Run manually. Активні переходи позначено червоним кольором. Далі клацаємо на них і спостерігаємо роботу системи.

Контрольні запитання

1. Що таке мережі Петрі?
2. Якими елементами описують процес у мережах Петрі?
3. Чи можна побудувати імітаційну модель функціонування маніпулятора?
4. Що таке позиція?
5. Що таке перехід?
6. Які процеси моделюються за допомогою середовища YASPER?
7. Наведіть приклади систем, крім двигуна та маніпулятора, які можна моделювати в середовищі YASPER?

Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета та завдання.
3. Опис використовуваних елементів та налаштувань, що використовуються в програмному продукті YASPER.
4. Моделі системи на рисунках 3.91, 3.93 та 3.94.
5. Налаштування параметрів та їх аналіз.
6. Висновки про виконану роботу.
7. Відповіді на контрольні запитання.
8. Файл з моделлю.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

- 1 Matlab [Electronic resource] // Mathworks. – Mode of access: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav (24.09.2024)
- 2 Лазарев, Ю. В. Довідник з MATLAB [Електронний ресурс] : навч. посіб. з курсового і дипломного проектування / Ю. В. Лазарев. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 132 с.
- 3 Островерхов, М. Я. Моделювання електромеханічних систем в Simulink : навч. посіб. для студ. ВНЗ / М. Я. Островерхов, В. М. Пижов. – Київ : Стилос, 2008. – 528 с.
- 4 Siciliano, B. Springer Handbook of robotics / Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds). – Berlin, Heidelberg, 2008. – 1611 p.
- 5 Yet Another Smart Process Editor [Electronic resource] // Yasper. – Mode of access: <https://www.yasper.org/> (24.09.2024)
- 6 Використання математичного пакета MATLAB для розв'язування прикладних задач / Б. П. Довгий, Є. С. Вакал, Ю. Є. Вакал, А. В. Попов. – Київ : Фітосоціоцентр, 2012. – 77 с.
- 7 Чисельні методи в комп'ютерних науках : навч. посіб. / В. А. Андруник, В. А. Висоцька, В. В. Пасічник, Л. Б. Чирун, Л.В. Чирун – Львів : Новий світ – 2000, 2020. – 470 с.
- 8 Шахно, С. М. Практична реалізація чисельних методів лінійної алгебри : навч. посіб. / С. М. Шахно, А. Т. Дудикевич, С. М. Левицька. – Львів : ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2009. – 137 с.
- 9 Вовкодав, Н. І. Інформаційні технології : навч. посіб. / Н. І. Вовкодав, В. О. Овчарук, І. В. Ющук. – Київ : НУХТ, 2019. – 115 с.

Навчальне видання

**Степаненко Денис Романович
Торосян Олена Василівна
Бреус Андрій Олександрович**

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Редактор Н. В. Мазепа

Зв. план, 2025

Підписано до друку 2025

Формат 60 × 84 1/16. Папір офс. Офс. друк.

Ум. друк. арк. 4,9. Обл.-вид. арк. 5,5. Наклад ____ пр.

Замовлення Ціна вільна

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001