

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК І ТЕХНОЛОГІЙ

(повне найменування інституту, факультету)

КАФЕДРА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МАТЕМАТИКИ

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему **Дослідження систем керування в середі MatLab**

Виконав: студент(ка) 4 курсу, групи КНТ-818

Спеціальності 124 – Системний аналіз

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Інтелектуальні технології та прийняття рішень
в складних системах»

Підпис Дорошенко М.С. Підпис _____
(прізвище та ініціали)

Керівник Подковаліхіна О.О. Підпис _____
(прізвище та ініціали)

Рецензент Нечипоренко Н.О. Підпис _____
(прізвище та ініціали)

2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Комп'ютерних наук і технологій

Кафедра Системного аналізу та обчислювальної математики

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 124 – Системний аналіз

(код і найменування)

Освітня програма

(спеціалізація) «Інтелектуальні технології та прийняття рішень в складних

системах»

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Підпис

Г.В.Корніч

« 28 » червня 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Підпис

Дорошенко Марини Сергіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження систем керування в середі MatLab

керівник проєкту (роботи) Подковаліхіна Олена Олександрівна, к.ф.-м.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «11» травня 2022 року №121

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) «20» червня 2022 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Умови задачі зі структурної схеми, перелік літературних джерел за темою дослідження.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) В першому розділі розглядається питання актуальності дослідження систем керування та використання середовища MatLab. В другому розділі відповідно розглянуто приклад задачі з систем керування, знайдена передавальна функція системи та проведено аналіз системи. Наведено математичну постановку задачі та можливості Simulink для її вирішення. Побудовано візуальну комп'ютерну модель та проаналізовано її достовірність на прикладі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Подковаліхіна О.О., к.ф.-м.н., доц.	Підпис	Підпис
2	Подковаліхіна О.О., к.ф.-м.н., доц.	Підпис	Підпис
Нормоконтроль	Широкоград Д.В., к.ф.-м.н., ст. викл.	Підпис	Підпис

7. Дата видачі завдання « 29 » вересня 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Сформулювати мету та основні завдання дипломної роботи	29.09.2021 – 31.10.2021	
2	Опрацювати літературу та існуючі дослідження за темою роботи	01.11.2021 – 19.11.2021	
3	Розробка програмної реалізації для вирішення задачі	19.11.2021 – 17.03.2022	
4	Розрахунки та аналіз даних	18.03.2022 – 28.04.2022	
5	Оформлення пояснювальної записки	29.04.2022 – 20.05.2022	
6	Попередній захист дипломної роботи та отримання рецензій.	16.06.2022 – 19.06.2022	
7	Захист дипломної роботи.	20.06.2022	

Студент

Підпис
(підпис)

Дорошенко М.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

Підпис
(підпис)

Подковаліхіна О.О.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота 44 с., 43 рис., 10 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – системи керування

Предмет дослідження – математичні та графічні моделі систем керування, характеристики систем керування.

Мета роботи – дослідження та аналіз систем керування в середовищі MatLab та Simulink.

Методи дослідження – аналітичні методи, комп'ютерне моделювання.

В дипломній роботі розглянуто задачу дослідження систем керування в середовищі MatLab. Побудовано візуальну комп'ютерну модель та проаналізовано її достовірність на прикладі. Наведено алгоритм аналізу систем керування за допомогою вбудованих функцій MatLab.

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, СТРУКТУРНІ СХЕМИ, MATLAB, SIMULINK,
ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

ЗМІСТ

Реферат	4
Зміст	5
Вступ	6
1.Огляд літератури та останніх досліджень і публікацій.....	7
2Дослідження систем керування	10
2.1 Постановка задачі та можливості Simulink для її вирішення.....	10
2.2 Правила перетворення структурної схеми систем керування.....	11
2.3 Візуальне моделювання систем керування	16
2.4 Аналіз систем керування в MatLab	36
Висновки	43
Перелік посилань.....	44

ВСТУП

Теорія систем керування – це широка область, що охоплює цілий ряд штучних і фізичних явищ. Під системою ми розуміємо сукупність процесів або об'єктів, які взаємодіють один з одним або з навколишнім середовищем і дають певний результат. Метою контролю є маніпулювання певними параметрами системи таким чином, щоб результат роботи системи був бажаним. Отже, як можна інтуїтивно зрозуміти, динамічні системи управління підпорядковуються аксіоматичного принципу причинності, тобто певна дія спричинить вплив на поведінку системи. Системи керування відносяться до дуже широкої області, що охоплює багато дисциплін і явищ.

Для того, щоб мінімізувати ризики та збитки аналітики повинні постійно досліджувати та вдосконалювати системи керування організацією. Їх дослідження та оцінка ефективності дії носить яскраво виражений дисциплінарний характер. Інформатизація, тобто проникнення сучасних інформаційних комп'ютерних технологій у різні сфери людської діяльності, на сьогоднішній день виявляється чи не основним фактором підвищення ефективності діяльності організації, оптимізації технологічних процесів, підвищення якості управління.

За допомогою середовища програмування Matlab та Simulink з'явилась можливість перетворення структурних схем за короткий час навіть для людини, яка не має достатньо знань, щоб зробити це вручну.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Актуальність теми дослідження цієї роботи обумовлена практичною значимістю дослідження систем керування, оскільки в умовах ринку практично кожен господарюючий суб'єкт, з метою виживання та успішної діяльності, змушений проводити дослідження систем керування.

Зростають число методів досліджень та обсяг знань, накопичених у процесі досліджень при розробці цілей, у маркетингу, менеджменті, прогнозуванні, плануванні, контролі та діагностиці систем керування, теорії та практиці експериментальних досліджень.

Зростаюча важливість дослідження систем керування визначається розвитком двох тенденцій у реальній діяльності організацій:

- інтеграцією функцій розвитку, аналітики, менеджменту та контролю в їх діяльності;
- ускладненням технічно-організаційного середовища як системної сукупності методів та технічних засобів управління.

На підвищення ефективності досліджень систем керування слід попередньо визначати ту конкретну функціональну роль, яка може у результаті вплинути як на внутрішнє, і на зовнішнє середовище.

Контакт між механізмами мислення та механізмами управління здійснюється за допомогою функціональних зв'язків. Це зв'язки між посадовими особами, підрозділами та службами організації у процесі здійснення ними своїх функцій. У цілому нині широке використання та реалізація значних результатів досліджень систем керування практично може мати глобальні позитивні наслідки.

Дослідженням систем керування займалися багато науковців, зокрема в роботі [1] авторів Гурко О.Г. та Єрмоєнко І.Ф. аналізували стійкість та якість

систем керування в MalLab, можливості Simulink для їх дослідження, синтезу та побудови.

В роботі [2] автор Ладієва Л.Р. досліджує оптимальну систему керування із зворотнім зв'язком з використанням принципу максимуму. За основу береться лінійна система, що характеризується диференціальним рівнянням

$$\dot{X} = A(t) * X + B(t) * U, X(t_0) = X_0 \quad (1.1)$$

потрібно знайти керування, що мінімізує функцію вартості.

$$J = \frac{1}{2} * X^T(t_f) * S * X(t_f) + \frac{1}{2} * \int_{t_0}^{t_f} [X^T(t) * Q(t) * X(t) * U^T(t) * R(t) * U(t)] dt \quad (1.2)$$

Для рішення використовується метод Гамільтона, який має вигляд:

$$H[X(t), U(t), \lambda(t), t] = \frac{1}{2} * X^T * Q * X + \frac{1}{2} * U^T * R * U + \lambda^T * A * X + \lambda^T * B * U \quad (1.3)$$

В роботі [3] автор Гавриляк М.С. визначав передатні функції замкнутих системи автоматичного керування за їх структурними схемами. Задачі були розв'язані шляхом еквівалентних замін.

В роботі [4] автор Бахрушин В.Є. розглядає розрахунки лінійних систем, у тому числі знаходить передавальну функцію системи за передавальними функціями ланок. В роботі наведені загальні теоретичні відомості стосовно цієї теми, які допомагають зрозуміти принципи роботи та перетворення структурних схем.

В роботі [5] автор Подковаліхіна О.О. знаходить передавальну функцію $W(p)$ лінійної системи

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{1.4}$$

двома способами:

- за допомогою формули $W(p) = C(pE - A)^{-1}B$;
- перетворенням структурної схеми.

В роботі [6] автор Усик В.В. обчислює передавальну функцію системи керування за входом x та виходом y – W_{yx} ; за входом x та виходом e – W_{ex} . Методом перетворення структурних схем автор перетворює багатоконтурну схему в одноконтурну та обчислює її передавальну функцію.

В статті [7] автор Горбунов А.П. досліджує гальмівну систему автомобіля під управління АБС використовуючи структурні схеми на графічному інтерфейсі MatLab в середовищі Simulink. За результатами моделювання автор отримує графічне зображення процесів, таких як гальмування з АБС та без АБС, за часом.

В статті [8] автор Луцька Н.М. розроблює систему керування багатозв'язним об'єктом, який функціонує в умовах невизначеності. Автор використовує інтерфейс MatLab для перевірки результатів дослідження методом математичного моделювання.

В статті [9] автор Крих Г.Б. проаналізував функціонування замкнутих систем керування, були використані методи теорії автоматичного керування. Порівняльний аналіз роботи систем керування з різними структурними схемами застосовані методи імітаційного моделювання в середовищі Simulink. В результаті дослідження підвищені показники якості замкнутої системи керування.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

2.1 Постановка задачі та можливості Simulink для її вирішення

Розглянемо систем керування. Математична постановка має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

де u – вхід системи;

x, y, u – вектори розміром n, p, m відповідно;

$\dot{x}$ – стан системи;

A, B, C – неперервні функції часу;

y – вихід системи.

Математичній постановці (2.1) відповідає графічна модель, що має назву структурної схеми. Для дослідження систем керування та роботою з графічними моделями було вибрано середовище MatLab, а саме редактор  Simulink. Simulink – це інтерактивне середовище для моделювання та аналізу широкого класу динамічних систем. Надає користувачу графічний інтерфейс для побудови систем зі стандартних блоків за допомогою технології «drag-and-drop».

Для побудування структурної схеми в Simulink використовуються модулі, які зберігаються у бібліотеці середовища. Блоки можуть бути пов'язані один з одним, як за інформацією, так і за керуванням. В якості вхідної величини можуть використовуватися наступні блоки:

- Constant – формує постійну величину;
- Step – генерує одиничний дискретний сигнал з потрібними параметрами.

Блоки створені для опису лінійних неперервних систем:

- Gain – лінійний підсилювач;
- State-Space – блок формування стану системи;
- Transfer Fcn – передавальна ланка.

Також є блоки загального використання:

- Integrator – суматор неперервного часу;
- Sum – суматор вхідних сигналів.

2.2 Правила перетворення структурної схеми систем керування

В процесі синтезу та аналізу системи керування необхідно отримати передавальну функцію системи. Передавальною функцією називається відношення зображення за Лапласом вихідної величини до зображення вхідної величини при нульових початкових умовах

$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)}. \quad (2.2)$$

Рішенням задачі є зведення структурної схеми до однієї динамічної ланки з передавальною функцією шляхом перетворення на основі принципів перетворення і складання структурних схем. Ланкою в теорії керування називають математичну модель елемента. Структурна схема – графічне зображення математичної моделі системи керування через з'єднання ланок.

У структурній схемі ланку позначають як прямокутник з вхідним та вихідним сигналами і передавальною функцією, яка розташована всередині.

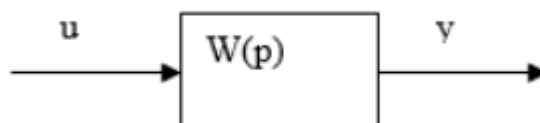


Рисунок 2.1 – Позначення ланки у структурній схемі

Розгалуження в структурній схемі здійснюється за допомогою вузлів.

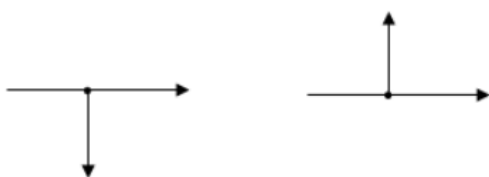


Рисунок 2.2 – Позначення вузлів у структурній схемі

Між собою ланки з'єднуються суматорами (зрівняльними ланками).

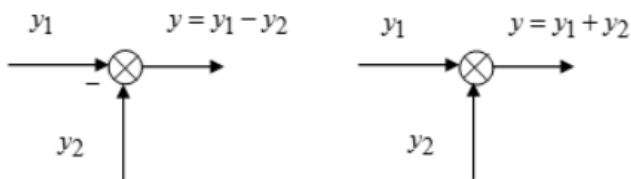


Рисунок 2.3 – Позначення суматорів у структурній схемі

Правила перетворення структурних схем:

1. Паралельне з'єднання ланок.

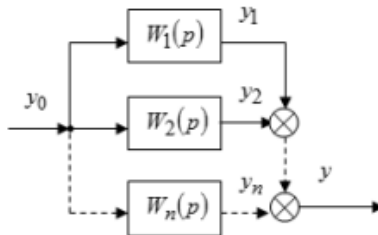


Рисунок 2.4 – Паралельне з'єднання ланок

Ланцюг з паралельно з'єднаних ланок можна замінити однією ланкою передавальної функції

$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (2.3)$$

2. Послідовне з'єднання ланок.

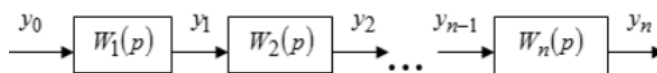


Рисунок 2.5 – Послідовне з'єднання ланок

Ланцюг з послідовно з'єднаних ланок можна замінити однією ланкою з передавальною функцією

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (2.4)$$

3. Ланка, яка охоплена зворотнім зв'язком.

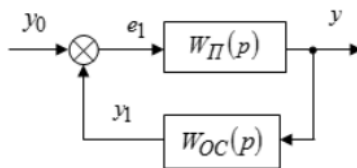


Рисунок 2.6 – Ланка, охоплена зворотнім зв'язком

Якщо вихідний сигнал ланки через будь-яку іншу ланку передається на вхід, тоді вважається, що вона охоплена зворотнім зв'язком.

Передавальною функцією ланки, охопленою зворотнім зв'язком є

$$W(p) = \frac{W_{\Pi}}{1 - W_{\Pi}W_{OC}}. \quad (2.5)$$

4. Перенесення вузла:

- перенесення за ходом сигналу:

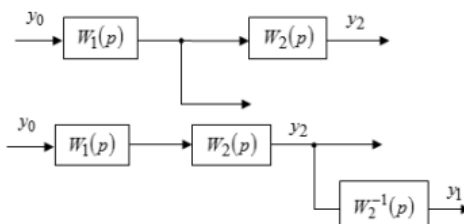


Рисунок 2.7 – Перенесення вузла за ходом сигналу

- перенесення проти ходу сигналу:

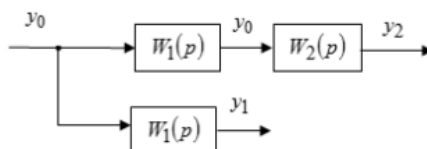


Рисунок 2.8 – Перенесення вузла проти ходу сигналу

5. Перенесення суматора:

- перенесення за ходом сигналу:

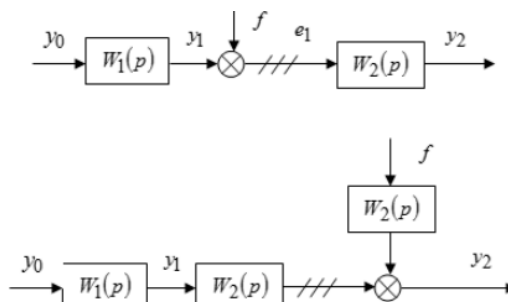


Рисунок 2.9 – Перенесення суматора за ходом сигналу

- перенесення проти ходу сигналу:

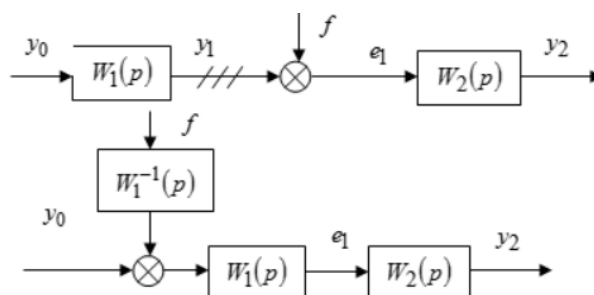


Рисунок 2.10 – Перенесення суматора проти ходу сигналу

6. Перенесення вузлів і суматорів:

- перенесення вузла через суматор:

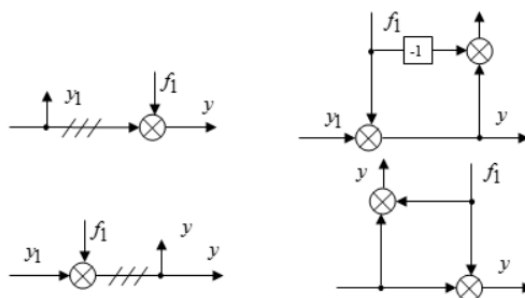


Рисунок 2.11 – Перенесення вузла через суматор

- перенесення суматорів:

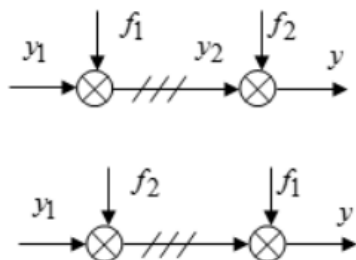


Рисунок 2.12 – Перенесення суматорів

- перенесення вузлів:



Рисунок 2.13 – Перенесення вузлів

2.3 Візуальне моделювання систем керування

Simulink потрібен для побудови графічної моделі системи керування. Розглянемо побудову візуальної комп'ютерної моделі систем керування для наступного прикладу:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 - x_2 + 2x_3 \\ \dot{x}_2 = 2x_1 + 3x_2 + u \\ \dot{x}_3 = 2x_1 + x_3 + 2u \\ y = -2x_1 + x_3 \end{cases} \quad (2.6)$$

де $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3$ – вектори фазових координат;

x_1, x_2, x_3, y – вектори;

u – вхід системи.

Структура системи керування може бути описана у командному вікні програми MatLab, або сформована у конструкторі Simulink. Пакет розширень Control System Toolbox підтримує наступні моделі систем: простір станів (SS), передавальна функція (TF), передавальна функція ланки, яка охоплена послідовним зв'язком (SERIES), зворотнім зв'язком (FEEDBACK), паралельним зв'язком (PARALLEL).

Побудуємо структурну схему:

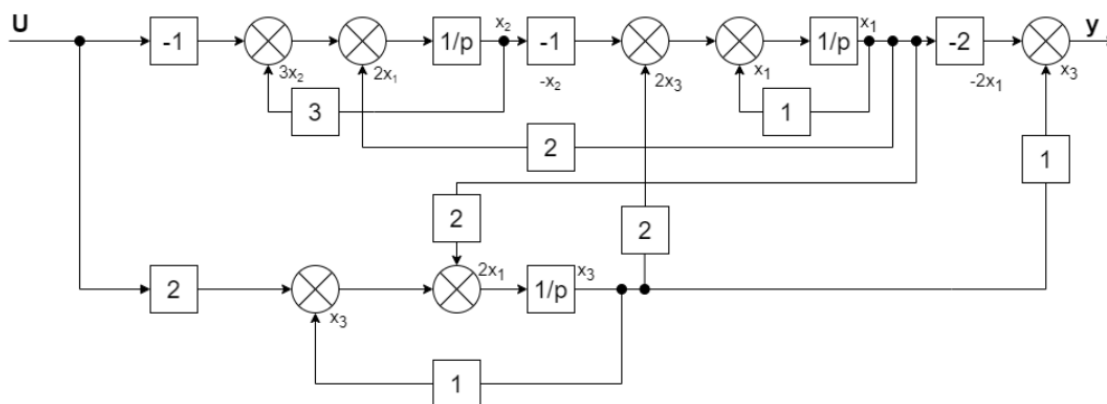


Рисунок 2.14 – Структурна схема

Побудуємо цю структурну схему у середовищі Simulink:

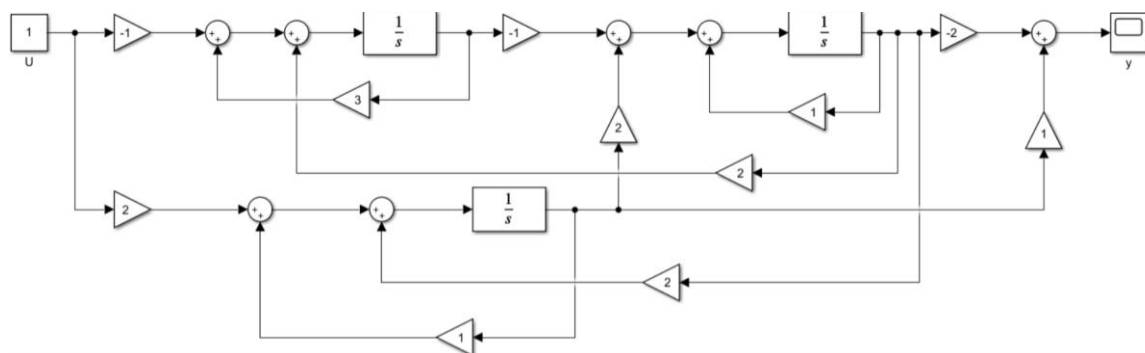


Рисунок 2.15 – Структурна схема у середовищі Simulink

Побудуємо по цій системі графіки вихідного сигналу структурної схеми з часом 5 та 10 мілі секунд. Це необхідно щоб потім порівняти ці графіки з результатами, які отримаємо після знаходження передавальної функції системи керування.

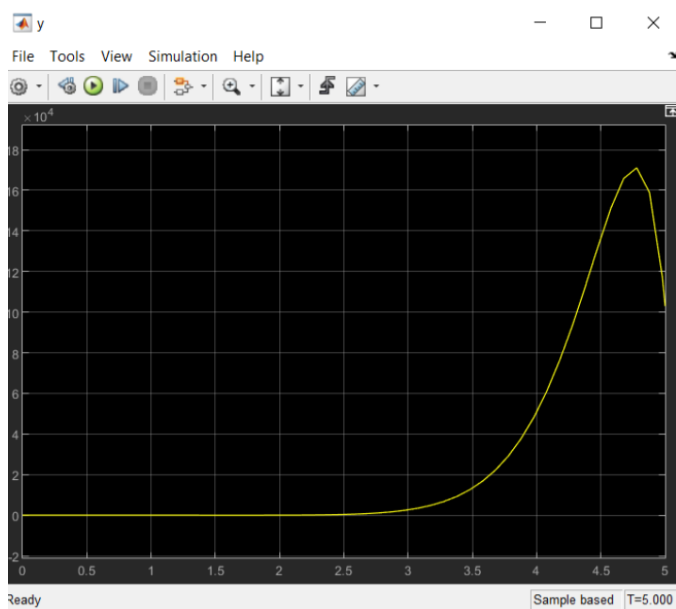


Рисунок 2.16 – Графік вихідного сигналу структурної схеми з часом 5 мілі секунд

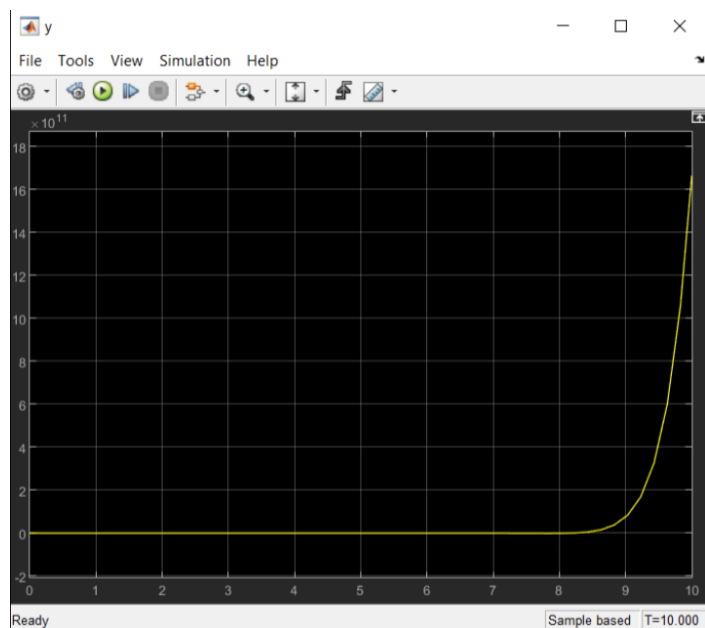


Рисунок 2.17 – Графік вихідного сигналу структурної схеми з часом 10 мілі секунд

Для перевірки достовірності розробленої моделі знайдемо методом перетворення передавальну функцію розглянутої системи.

Обчислимо передавальну функцію ланки, охоплену зворотнім зв'язком та перенесемо суматори, для запобігання перехрещення ланок.

$$W_1 = \frac{\frac{1}{p}}{1 - \frac{1}{p} * 1} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{p-1}{p}} = \frac{1}{p-1} \quad (2.7)$$

Обчислимо передавальну функцію ланки, охоплену зворотнім зв'язком засобами MatLab.

```
>> w1=tf(1, [1 0])
w1 =
    1
    -
    s
Continuous-time transfer function.
>> w2=tf(1, [1])
w2 =
    1
```

```

Static gain.
>> feedback(w1,-w2)
ans =
     1
-----
s - 1
Continuous-time transfer function.

```

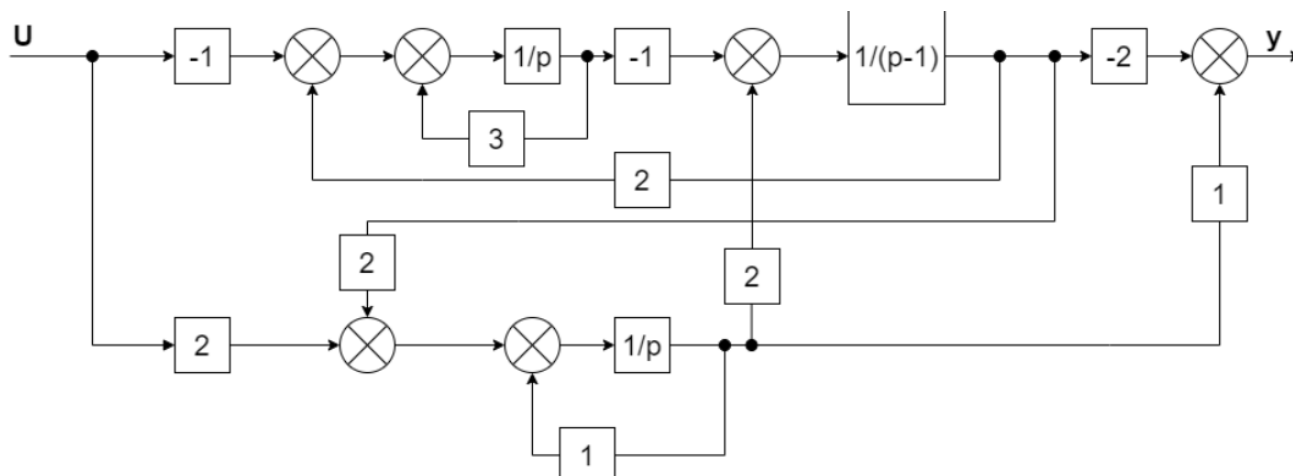


Рисунок 2.18 – Структурна схема

Обчислимо передавальні функції ланок, охоплених зворотнім зв'язком.

$$W_2 = \frac{\frac{1}{p}}{1 - \frac{1}{p} * 3} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{p-3}{p}} = \frac{1}{p-3} \quad (2.8)$$

$$W_3 = \frac{\frac{1}{p}}{1 - \frac{1}{p} * 1} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{p-1}{p}} = \frac{1}{p-1} \quad (2.9)$$

Обчислимо передавальні функції ланок, охоплених зворотнім зв'язком засобами MatLab.

```

>> w1=tf(1, [1 0]);
>> w2=tf(1, [1]);
>> w3=tf(3, [1])
w3 =

```

```

3
Static gain.
>> feedback(w1,-w3)
ans =
    1
-----
s - 3
Continuous-time transfer function.
>> feedback(w1,-w2)
ans =
    1
-----
s - 1
Continuous-time transfer function.

```

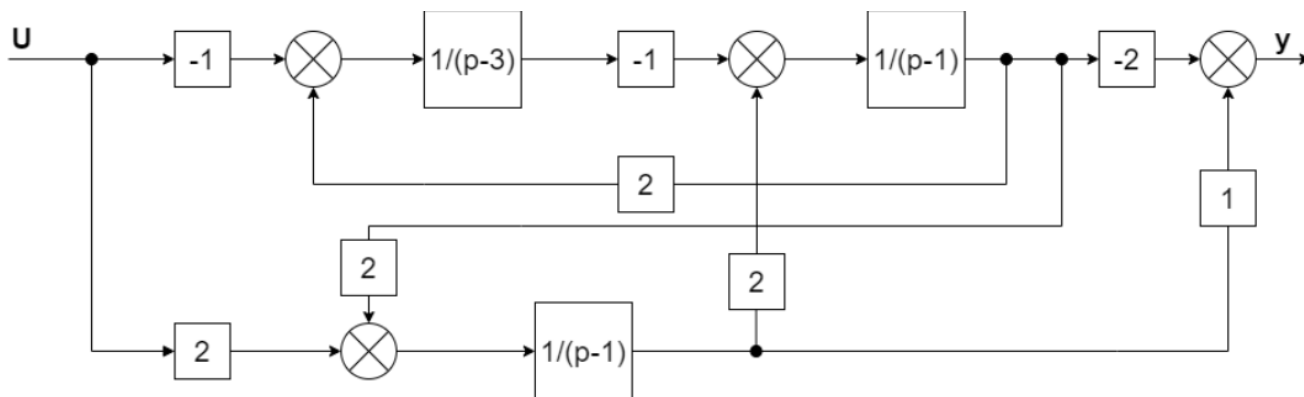


Рисунок 2.19 – Структурна схема

Обчислимо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком.

$$W_4 = \frac{1}{p-3} * (-1) = \frac{-1}{p-3} \quad (2.10)$$

Обчислимо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком засобами MatLab.

```

>> w4=tf(1, [1 -3])
w4 =

```

```

1
-----
s - 3
Continuous-time transfer function.
>> w5=tf(-1, [1])
w5 =
    -1
Static gain.
>> series(w4,w5)
ans =
    -1
-----
s - 3
Continuous-time transfer function.

```

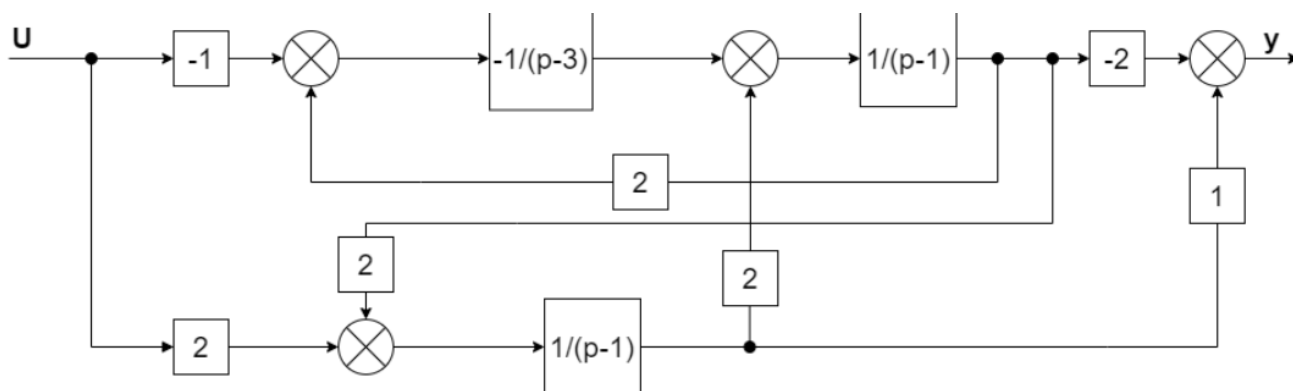


Рисунок 2.20 – Структурна схема

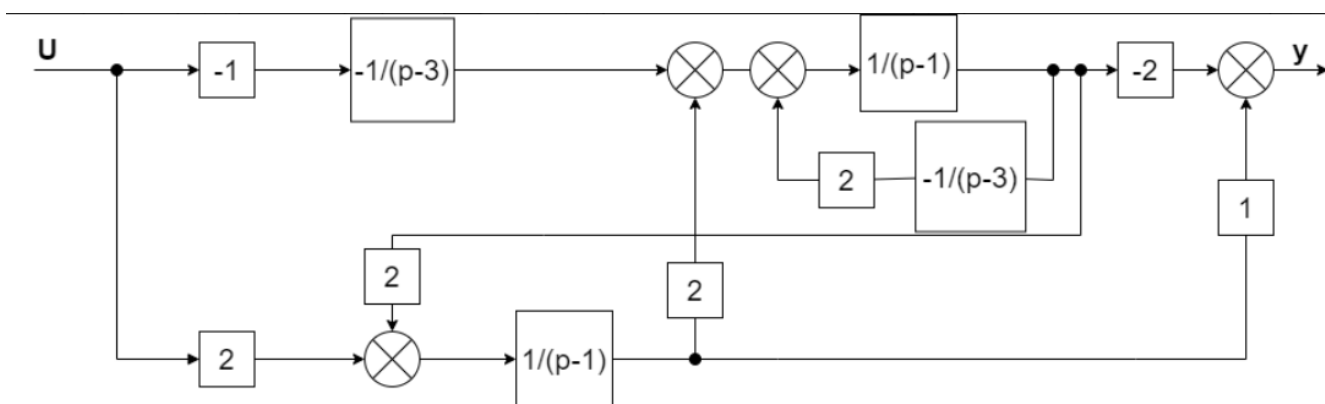


Рисунок 2.21 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену зворотнім зв'язком.

$$W_5 = \frac{\frac{1}{p-1}}{1 - \left(\frac{1}{p-1}\right) * \left(2 * \left(\frac{-1}{p-3}\right)\right)} = \frac{\frac{1}{p-1}}{\left(\frac{p-2}{p-1}\right) * \left(\frac{-2}{p-3}\right)} = \frac{p-3}{(p-3)(p-1)+2} \quad (2.11)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену зворонім зв'язком засобами MatLab.

```
>> w6=tf(1, [1 -1])
w6 =
      1
     ----
    s - 1
Continuous-time transfer function.
>> w7=tf(-2, [1 -3])
w7 =
     -2
     ----
    s - 3
Continuous-time transfer function.
>> feedback(w6, -w7)
ans =
      s - 3
     -----
    s^2 - 4 s + 5
Continuous-time transfer function.
```

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком.

$$W_6 = -1 * \left(\frac{-1}{p-3}\right) = \frac{1}{p-3} \quad (2.12)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w5=tf(-1, [1]);
>> w8=tf(-1, [1 -3])
w8 =
```

```

-1
-----
s - 3
Continuous-time transfer function.
>> series(w5,w8)
ans =
    1
-----
s - 3
Continuous-time transfer function.

```

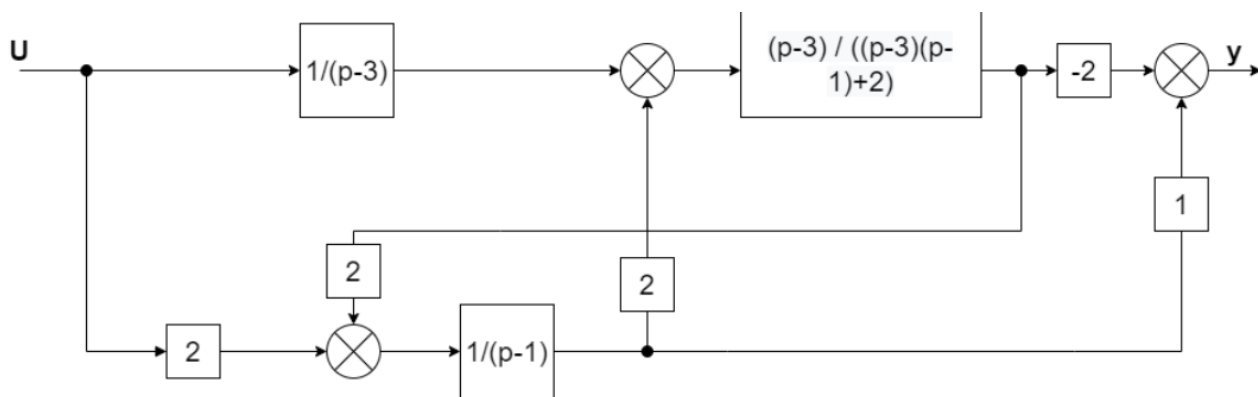


Рисунок 2.22 – Структурна схема

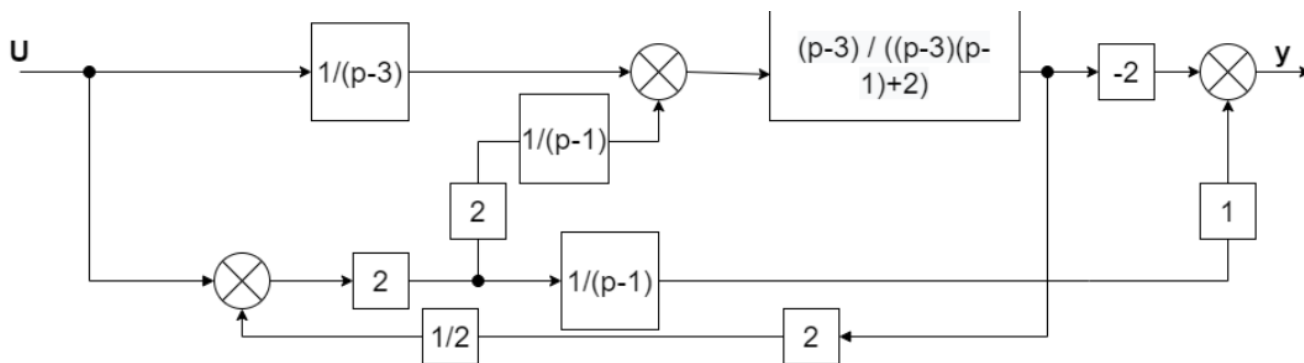


Рисунок 2.23 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланки з послідовним зв'язком.

$$W_7 = \frac{1}{2} * 2 = 1 \quad (2.13)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w9=tf(1/2, [1])
w9 =
    0.5
    Static gain.
>> w10=tf(2, [1])
w10 =
    2
    Static gain.
>> series(w9,w10)
ans =
    1
    Static gain.
```

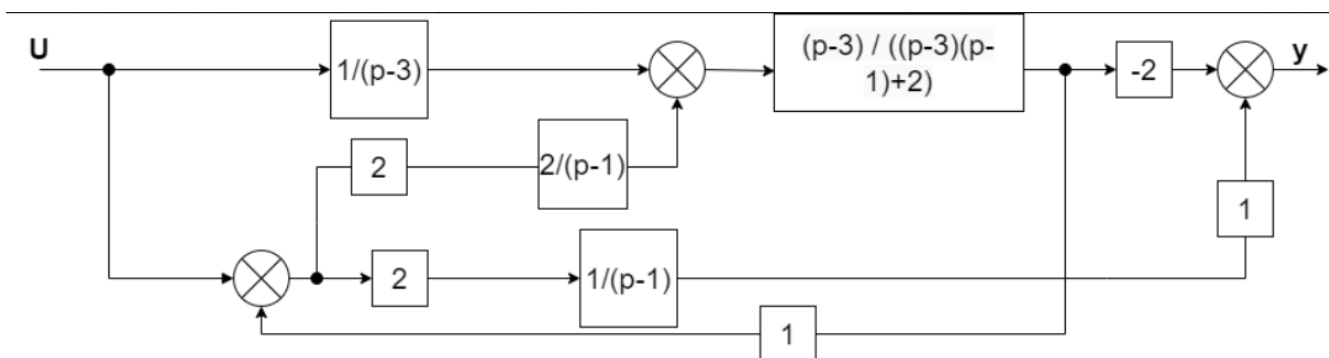


Рисунок 2.24 – Структурна схема

Обчислюємо передавальні функції ланок з послідовним зв'язком.

$$W_8 = 2 * \frac{2}{p-1} = \frac{4}{p-1} \quad (2.14)$$

$$W_9 = 2 * \frac{1}{p-1} = \frac{2}{p-1} \quad (2.15)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w10=tf(2, [1]);
>> w11=tf(2, [1 -1])
w11 =
      2
-----
s - 1
Continuous-time transfer function.
>> w12=tf(1, [1 -1])
w12 =
      1
-----
s - 1
Continuous-time transfer function.
>> series(w10, w11)
ans =
      4
-----
s - 1
Continuous-time transfer function.
>> series(w10, w12)
ans =
      2
-----
s - 1
Continuous-time transfer function.
```

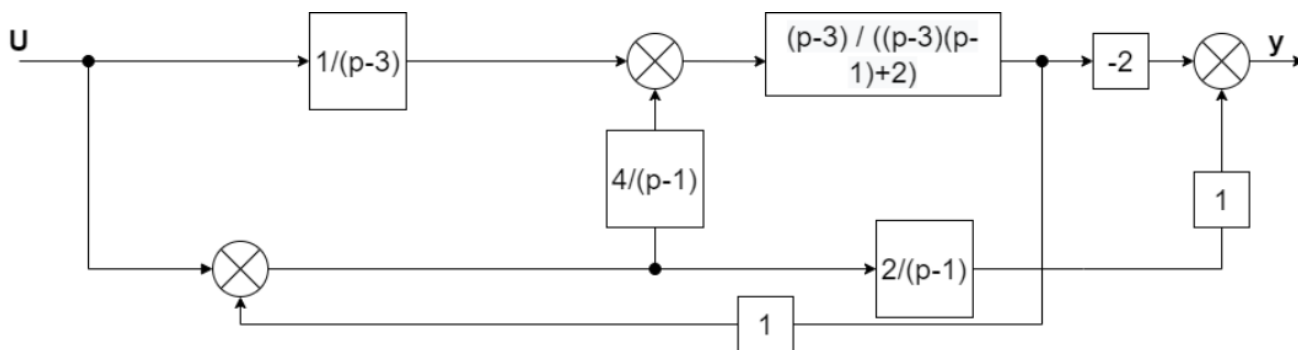


Рисунок 2.25 – Структурна схема

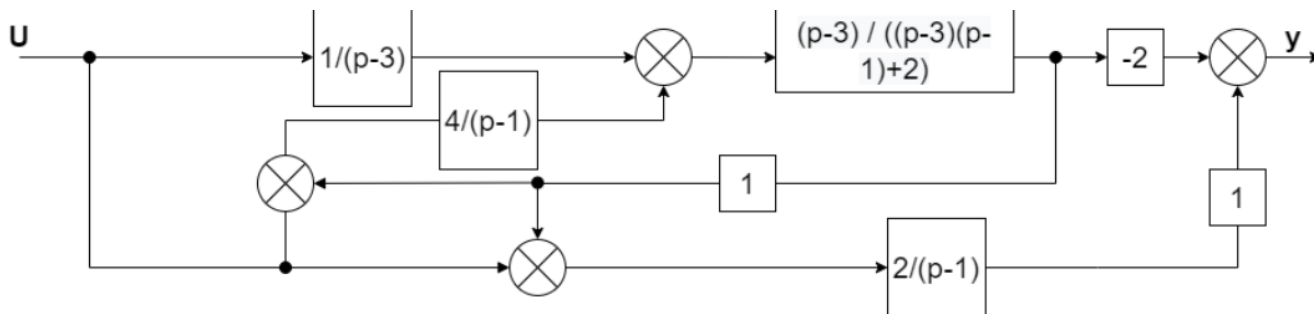


Рисунок 2.26 – Структурна схема

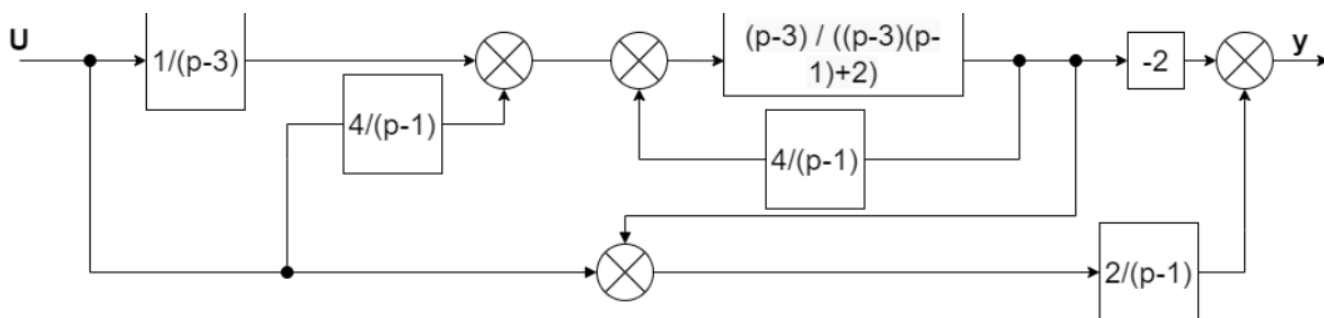


Рисунок 2.27 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену зворотнім зв'язком.

$$W_{10} = \frac{\frac{p-3}{(p-3)(p-1)+2}}{1 - \left(\frac{p-3}{(p-3)(p-1)+2}\right) * \left(\frac{4}{p-1}\right)} = \frac{(p^2-4p+5)(p^2-4p+3)}{(p^2-4p+5)(p^3-5p^2-5p+7)} \quad (2.16)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену зворотнім зв'язком засобами MatLab.

```
>> w13=feedback(w6, -w7)
```

```
w13 =
```

```
      s - 3
```

```
-----
```

```
 s^2 - 4 s + 5
```

Continuous-time transfer function.

```
>> w14=tf(4,[1 -1])
```

w14 =

4

s - 1

Continuous-time transfer function.

```
>> feedback(w13, -w14)
```

ans =

s^2 - 4 s + 3

s^3 - 5 s^2 + 5 s + 7

Continuous-time transfer function.

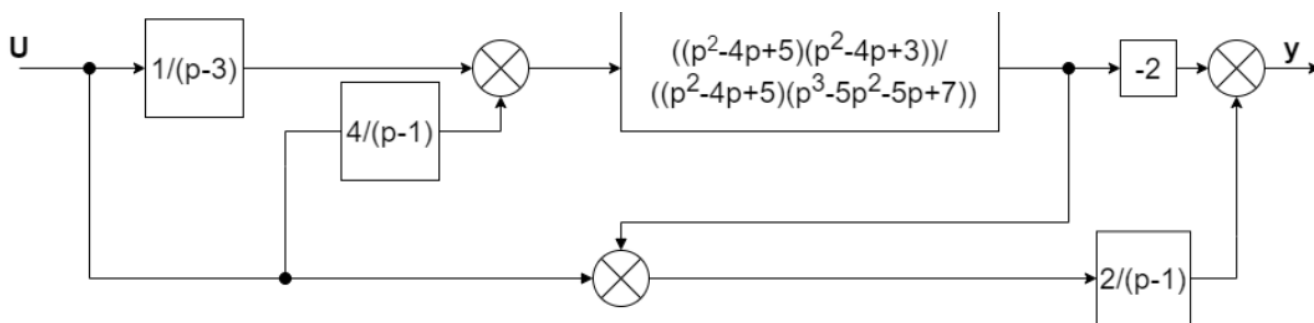


Рисунок 2.28 – Структурна схема

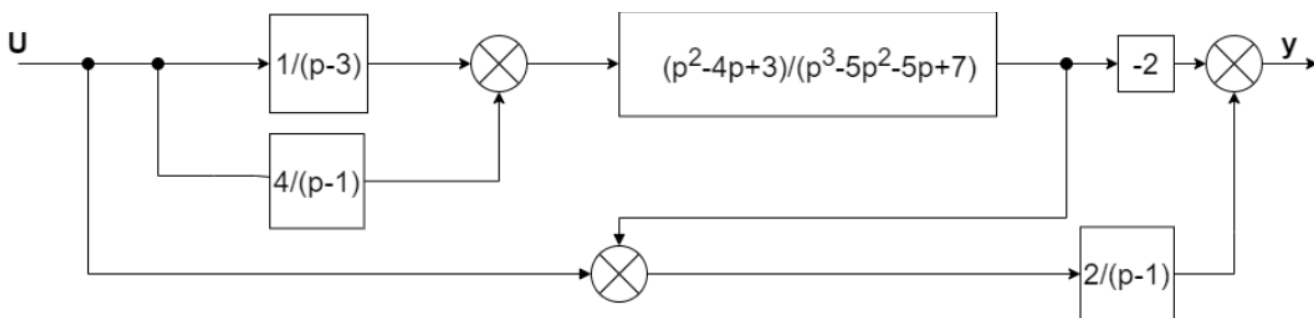


Рисунок 2.29 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену паралельним зв'язком.

$$W_{11} = \frac{1}{p-3} + \frac{4}{p-1} = \frac{(p-1)+4(p-3)}{(p-3)(p-1)} \quad (2.17)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену паралельним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w4=tf(1, [1 -3]);
>> w14=tf(4,[1 -1]);
>> parallel(w4, w14)
ans =
      5 s - 13
      -----
      s^2 - 4 s + 3
Continuous-time transfer function.
```

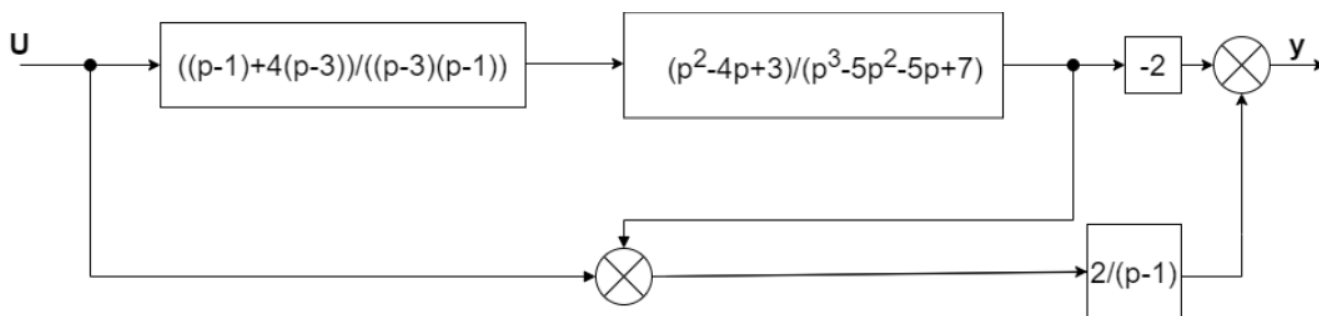


Рисунок 2.30 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком.

$$W_{12} = \frac{(p-1)+4(p-3)}{(p-3)(p-1)} * \frac{p^2-4p+3}{p^3-5p^2-5p+7} = \frac{5p-13}{p^3-5p^2+5p+7} \quad (2.18)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w15=parallel(w4, w14);
>> w16=feedback(w15, -w14);
```

```
>> series(w15, w16)
ans =
      5 s^3 - 33 s^2 + 67 s - 39
-----
    s^5 - 9 s^4 + 28 s^3 - 28 s^2 - 13 s + 21
Continuous-time transfer function.
```

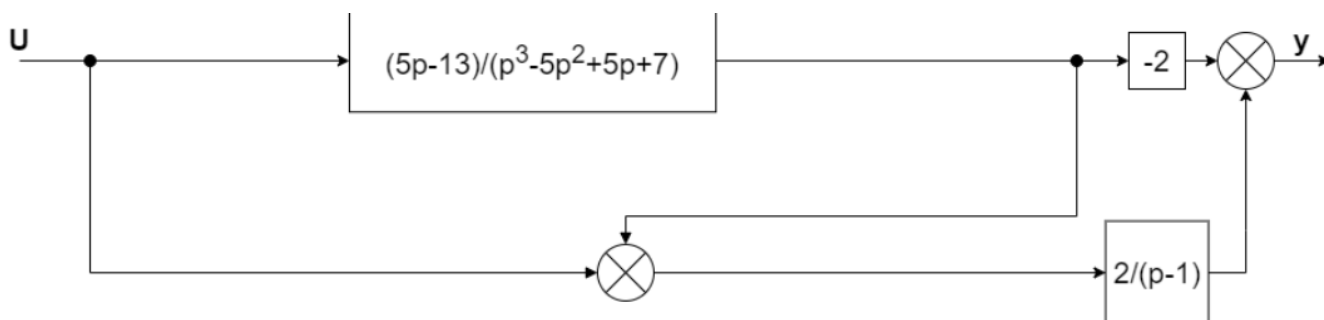


Рисунок 2.31 – Структурна схема

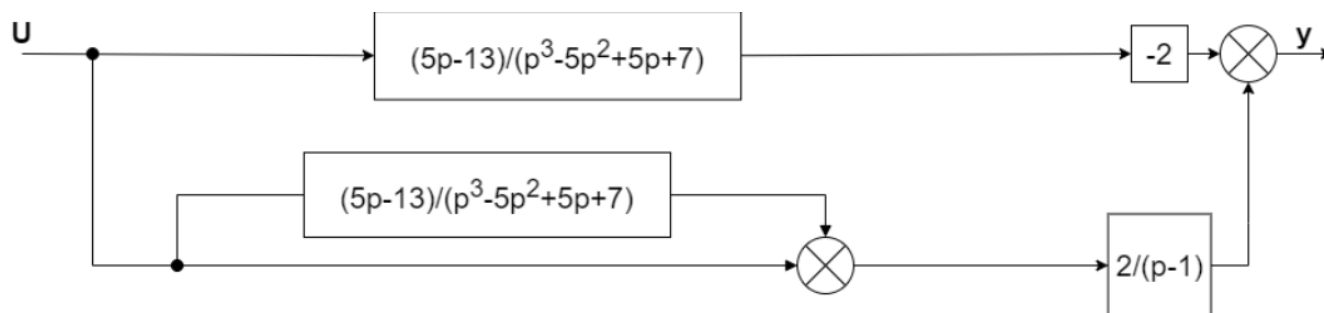


Рисунок 2.32 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланки з паралельним зв'язком.

$$W_{13} = 1 + \frac{5p-13}{p^3-5p^2+5p+7} = \frac{p^3-5p^2+10p-6}{p^3-5p^2+5p+7} \quad (2.19)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену паралельним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w2=tf(1, [1]);
```

```
>> w17=series(w15, w16);
>> parallel(w2, w17)
ans =
    s^5 - 9 s^4 + 33 s^3 - 61 s^2 + 54 s - 18
-----
    s^5 - 9 s^4 + 28 s^3 - 28 s^2 - 13 s + 21
Continuous-time transfer function.
```

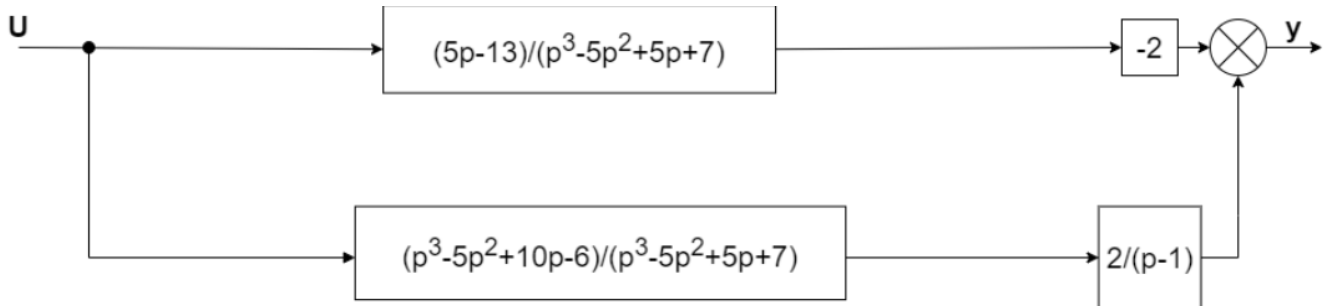


Рисунок 2.33 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланок з послідовним з'єднанням.

$$W_{14} = \frac{5p-13}{p^3-5p^2+5p+7} * (-2) = \frac{-2(5p-13)}{p^3-5p^2+5p+7} \quad (2.20)$$

$$W_{15} = \frac{p^3-5p^2+10p-6}{p^3-5p^2+5p+7} * \frac{2}{p-1} = \frac{2(p^3-5p^2+10p-6)}{(p-1)(p^3-5p^2+5p+7)} \quad (2.21)$$

Обчислюємо передавальну функцію ланки, охоплену послідовним зв'язком засобами MatLab.

```
>> w18=series(w15, w16);
>> w19=tf(-2, [1]);
>> w20=parallel(w2, w17);
>> w21=tf(2, [1 -1]);
>> series(w18,w19)
ans =
    -10 s^3 + 66 s^2 - 134 s + 78
-----
    s^5 - 9 s^4 + 28 s^3 - 28 s^2 - 13 s + 21
```

```

Continuous-time transfer function.
>> series(w20,w21)
ans =
      2 s^5 - 18 s^4 + 66 s^3 - 122 s^2 + 108 s - 36
-----
      s^6 - 10 s^5 + 37 s^4 - 56 s^3 + 15 s^2 + 34 s - 21
Continuous-time transfer function.

```

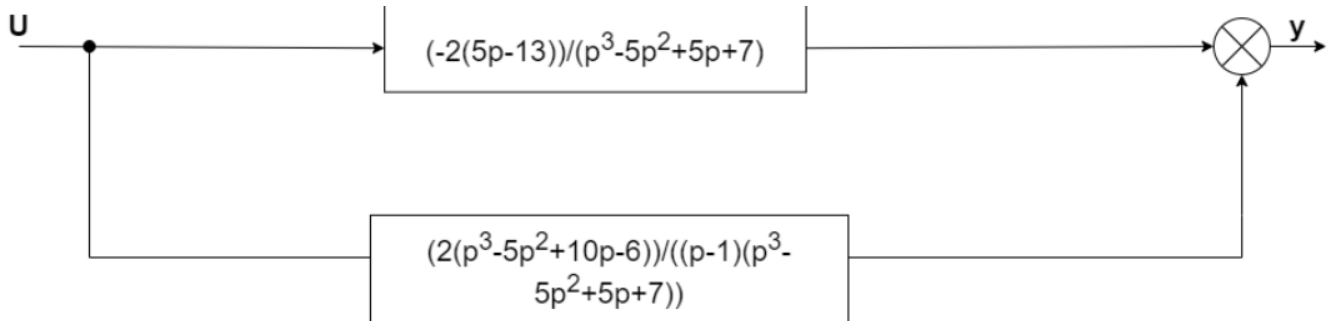


Рисунок 2.34 – Структурна схема

Обчислюємо передавальну функцію ланок з паралельним з'єднанням.

$$\begin{aligned}
 W_{16} &= \frac{-2(5p-13)}{p^3-5p^2+5p+7} + \frac{2(p^3-5p^2+10p-6)}{(p-1)(p^3-5p^2+5p+7)} = \frac{(p-1)(-10+26)+2(p-1)(p^2-4p+6)}{(p-1)(p^3-5p^2+5p+7)} = \\
 &= \frac{2p^2-18p+38}{p^3-5p^2+5p+7}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Обчислюємо передавальну функцію ланок з паралельним з'єднанням засобами MatLab.

```

>> w22=series(w18,w19);
>> w23=series(w20,w21);
>> parallel(w22, w23)
ans =
      2 s^10 - 46 s^9 + 450 s^8 - 2440 s^7 + 7952 s^6 - 15580 s^5 + 16568 s^4 - 4984 s^3
- 7730 s^2 + 8202 s - 2394
-----

```

$s^{11} - 19 s^{10} + 155 s^9 - 697 s^8 + 1822 s^7 - 2554 s^6 + 970 s^5 + 2226 s^4 - 2911 s^3 + 461 s^2 + 987 s - 441$

Continuous-time transfer function.

Передавальна функція системи дорівнює $\frac{2p^2-18p+38}{p^3-5p^2+5p+7}$.

Можливості MatLab дозволяють нам одразу отримати передавальну функцію системи керування одразу після введення умови задачі.

```
>> a=[1 -1 2;2 3 0;2 0 1]
```

```
a =
```

```
    1    -1     2
    2     3     0
    2     0     1
```

```
>> b=[0 -1 2]'
```

```
b =
```

```
    0
   -1
    2
```

```
>> c=[-2 0 1]
```

```
c =
```

```
   -2     0     1
```

```
>> d=0
```

```
d =
```

```
    0
```

```
>> sys=ss(a,b,c,d)
```

```
sys =
```

```
  A =
```

```
      x1  x2  x3
x1    1  -1   2
x2    2   3   0
x3    2   0   1
```

```
  B =
```

```
      u1
x1     0
x2    -1
x3     2
```

```
  C =
```

```
      x1  x2  x3
```

```

y1  -2   0   1
D =
      u1
y1   0
Continuous-time state-space model.
>> w=tf(sys)
w =
      2 s^2 - 18 s + 38
      -----
      s^3 - 5 s^2 + 5 s + 7
Continuous-time transfer function.

```

Побудуємо візуальну модель отриманої системи у Simulink.

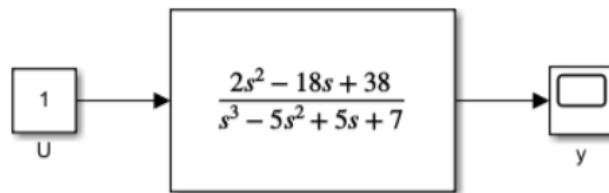


Рисунок 2.35 – Візуальна модель системи, яка побудована у Simulink

Побудуємо для цієї системи графіки вихідного сигналу структурної схеми з часом 5 та 10 мілі секунд.

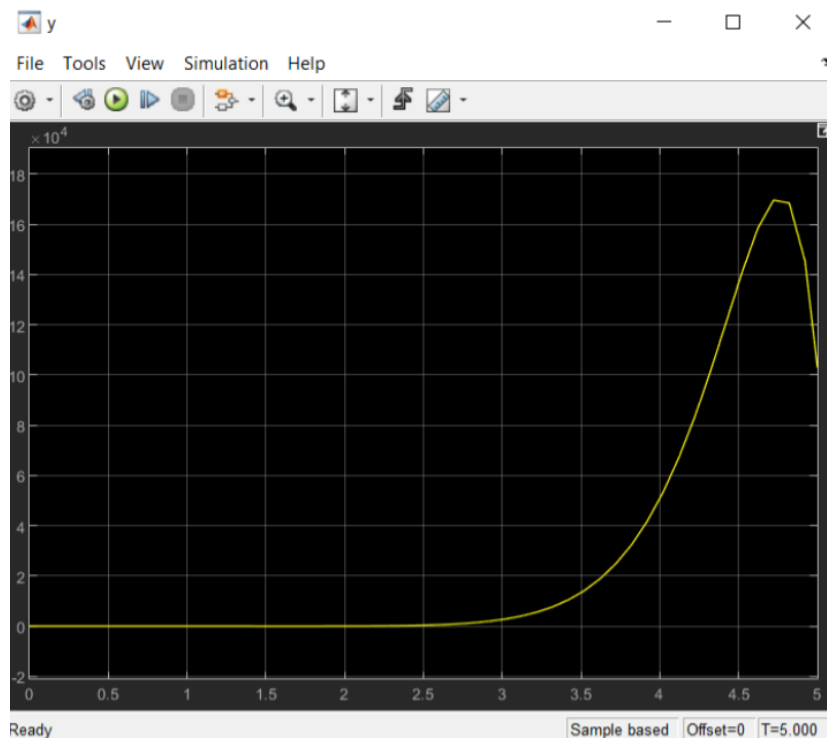


Рисунок 2.36 – Графік вихідного сигналу структурної схеми з часом 5 мілі секунд

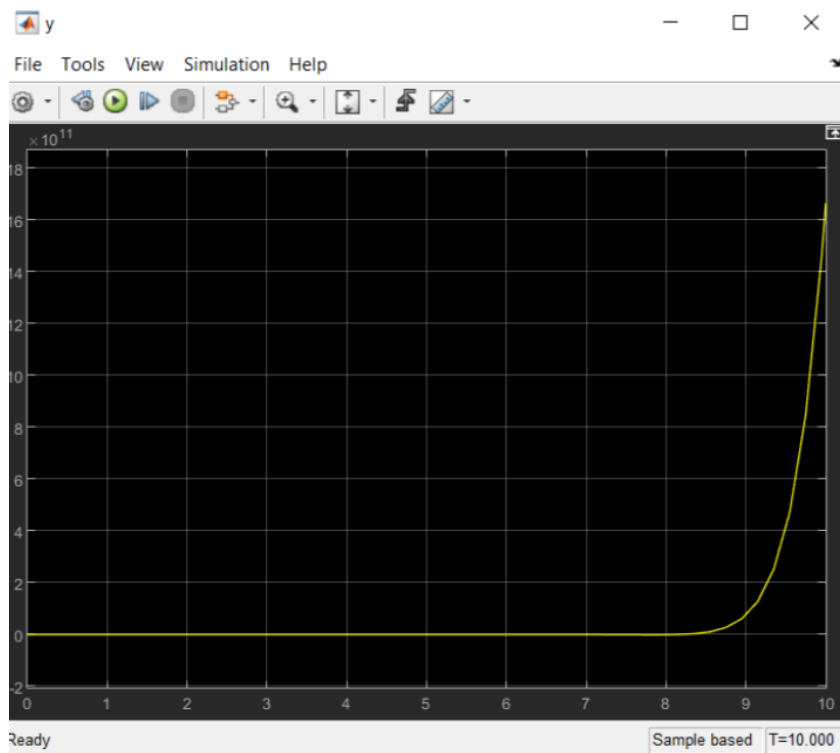


Рисунок 2.37 – Графік вихідного сигналу структурної схеми з часом 10 мілі секунд

Графіки вихідного сигналу системи керування у початку дослідження та після знаходження її передавальної функції шляхом перетворення структурної схеми зійшлися. Отже можемо зробити висновок, що побудована візуальна комп'ютерна модель системи керування є достовірною

2.4 Аналіз систем керування в MatLab

Для опису неперервних і дискретних динамічних моделей систем керування з постійними параметрами при моделюванні електромеханічних систем використовують реалізацію математичного опису елементів у вигляді передавальної функції, tf-форма у середовищі MatLab. Для аналізу системи керування у середовищі Simulink необхідно побудувати модель, в якій не буде джерел та приймачів сигналів. Входи та виходи системи відзначаються блоками in та out. Побудуємо таку систему.

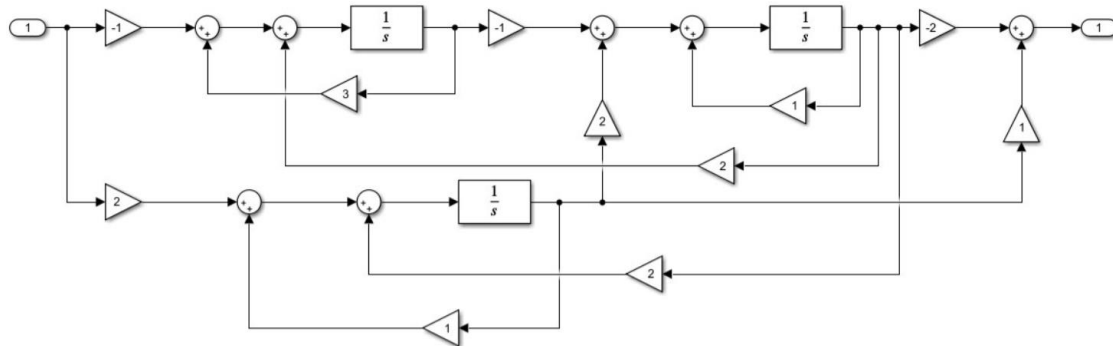


Рисунок 2.38 – Система керування у середовищі MatLab

Далі необхідно отримати параметри простору станів системи за допомогою MatLab.

```
>> simulink
>> [a,b,c,d]=linmod('sxema1')
a =
    1     2    -1
```

```

      2      1      0
      2      0      3
b =
      0
      2
     -1
c =
     -2      1      0
d =
      0

```

Отримана вище матриця дозволяє отримати модель системи в просторі станів.

```

>> sys=ss(a,b,c,d)
sys =
A =
      x1  x2  x3
x1      1   2  -1
x2      2   1   0
x3      2   0   3
B =
      u1
x1      0
x2      2
x3     -1
C =
      x1  x2  x3
y1     -2   1   0
D =
      u1
y1      0

```

Continuous-time state-space model.

Також можна отримати її у вигляді tf-моделі.

```

>> systf=tf(sys)
systf =
      2 s^2 - 18 s + 38
-----
      s^3 - 5 s^2 + 5 s + 7

```

Continuous-time transfer function.

Функція `pole` знаходить полюси одновимірної або багатовимірної lti-моделі. Для одновимірних моделей полюсами є корені знаменника передавальної функції.

```
>> p=pole(sys)

p =

-0.7511 + 0.0000i
 2.8756 + 1.0251i
 2.8756 - 1.0251i
```

Функція `damp` існує для розрахунку власних частот та коефіцієнтів демпфування, відповідних полюсів lti-моделі.

```
>> [Wn,Z]=damp(sys)

Wn =

 0.7511
 3.0528
 3.0528

Z =

 1.0000
-0.9419
-0.9419
```

Функція `dcgain` рахує коефіцієнт передачі k для lti-моделі.

```
>> k=dcgain(sys)

k =

 5.4286
```

Функція `pzmap` (команда `pzmap(sys)`) знаходить полюси та нулі системи на комплексній площині. Для одновимірної lti-моделі виводяться полюси та нулі її

передавальної функції. Для багатовимірної – полюси та передавальні нулі. Полюси зображуються маркером $\times$, а нулі – $\circ$.

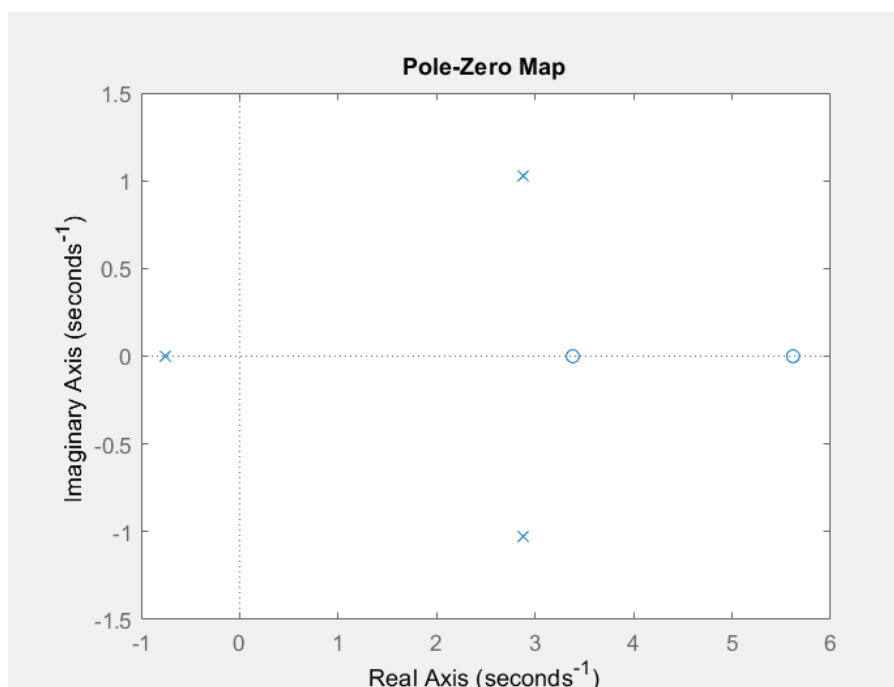


Рисунок 2.39 – Зображення полюсів та нулів на комплексній площині

Функція $[p, z] = pzmap(sys)$ повертає полюси і передавальні нулі у вигляді векторів-стовбців p та z . План розміщення нулів та полюсів на екран не виводиться.

```
>> [p,z] = pzmap(sys)
```

```
p =
```

```
-0.7511 + 0.0000i
```

```
2.8756 + 1.0251i
```

```
2.8756 - 1.0251i
```

```
z =
```

```
5.6180
```

```
3.3820
```

Команда `bode(sys)` будує на екрані графіки логарифмічних частотних характеристик для lti-моделі `sys`.

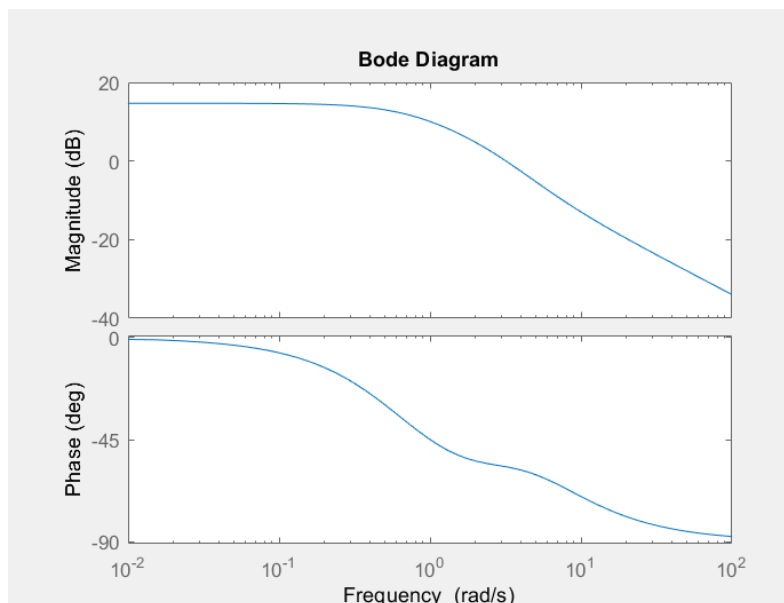


Рисунок 2.40 – Графіки логарифмічних частотних характеристик

Команда `margin(sys)` будує логарифмічні частотні характеристики системи та вказую запаси її стійкості. Команду можна застосовувати як до неперервних, так і до дискретних lti-моделей.

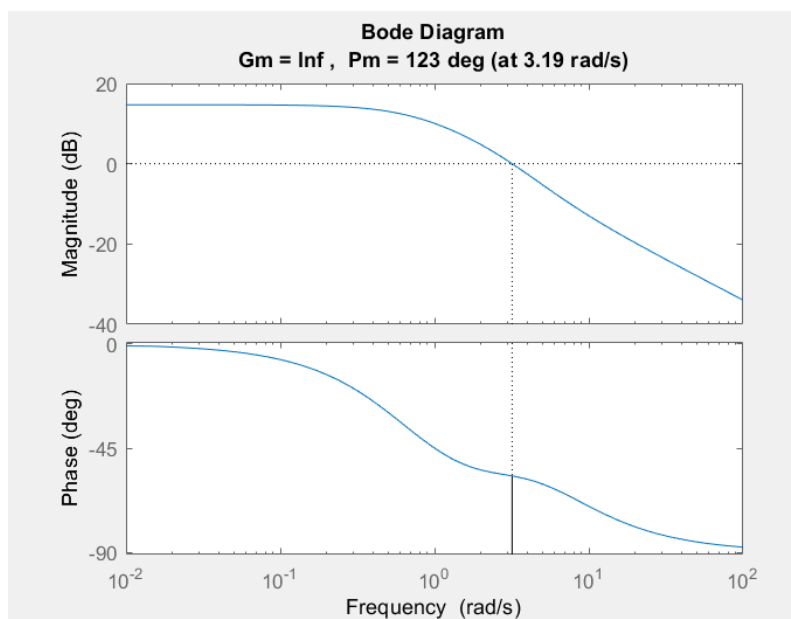


Рисунок 2.41 – Графіки логарифмічної частотної характеристики системи та запасів її стійкості

Команда `impz(sys)` будує графік імпульсної перехідної функції для `lti`-моделі. Тривалість моделювання визначається автоматично так, щоб відобразити основні особливості перехідних процесів.

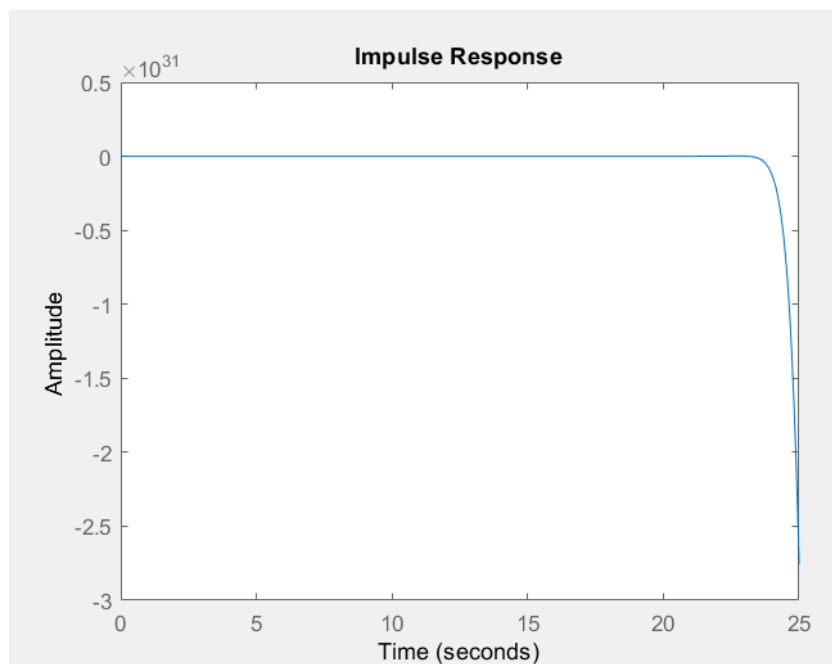


Рисунок 2.42 – Графіки імпульсної перехідної функції

Команда `step(sys)` будує графік перехідної функції для `lti`-моделі.

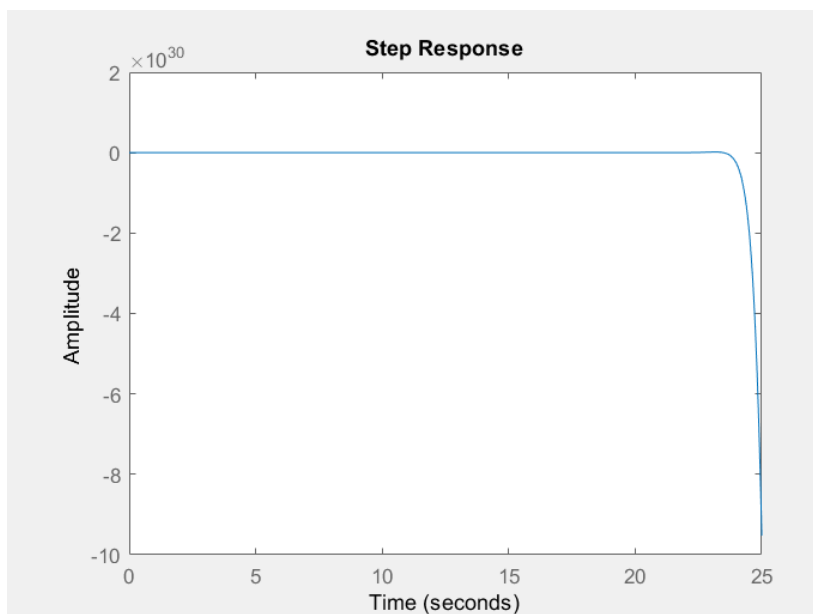


Рисунок 2.43 – Графіки перехідної функції

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі виконано такі завдання:

- Методами комп'ютерного моделювання в середовищі MatLab було досліджено важливі задачі теорії управління – системи керування.
- Побудовано візуальну комп'ютерну модель системи керування та перевірено її достовірність.
- Наведено алгоритм аналізу систем керування за допомогою середовища MatLab.
- Досліджено систему керування за наведеним алгоритмом на прикладі лінійної системи з одним входом та одним виходом.
-

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. **Гурко, О.Г.** Аналіз и синтез систем автоматичного керування в MatLab [Текст] / О.Г. Гурко, І.Ф. Єрьоменко. – Харків : ХНАДУ, 2011. – 286 стр., с илл.
2. **Ладієва, Л.Р.** Оптимальне керування системами [Текст] / Л.Р. Ладієва. – К.: НМЦ ВО, 2000. – 187 стр., с илл.
3. **Гавриляк, М.С.** Основи автоматики та систем управління [Текст] / М.С. Гавриляк – Чернівці: Чернівець. нац. ун-тет, 2022. – 211 стр., с илл.
4. **Бахрушин, В.Є.** Теорія керування [Текст] : навч. посіб. / В.Є. Бахрушин, Т.Ю. Огаренко. – Запоріжжя : КПУ, 2014. – 224 стр., с илл.
5. **Подковаліхіна, О.О.** Методичні вказівки та завдання до виконання курсового проекту з дисципліни «Теорія керування» для студентів усіх форм навчання спеціальності 124 «Системний аналіз» / О.О. Подковаліхіна, А.В. Савранська – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 47 стр., с илл.
6. **Усик, В.В.** Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Системи автоматичного керування відео-, аудіо- та кінотехніки» для студентів і викладачів за напрямом підготовки 6.050803 – «Акустотехніка» [Текст] / Укл. / В.В. Усик, Я. Ю. Корольова. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – 116 стр., с илл.
7. **Горбунов, А.П.** Моделювання гальмівної системи автомобіля під управлінням АБС в середовищі MATLAB SIMULINK [Текст] / А.П. Горбунов // Technology audit and production reserves — 2015 – № 2/5(22) – с. 55 – 59.
8. **Луцька, Н.М.** Дослідження робастно-оптимальних систем керування багатозв'язними технологічними об'єктами [Текст] / Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк // Енергетика і автоматика – 2018 – № 5 – с. 68 – 81.

9. **Крих, Г.Б.** Моделювання системи керування з регулятором на підставі внутрішньої моделі [Текст] / Г.Б. Крих, Г.Ф. Матіко, Б.А. Криль // Науковий вісник НЛТУ України – 2019 – № 9 – с. 161 – 168.