

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ
З КУРСУ “ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ”
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
151 – АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ЧАСТИНА 1 – МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСР

Затверджено на засіданні
кафедри КІТ і М
Протокол № 12 від 25.03.2018

Дніпро ДВНЗ УДХТУ 2018

Методичні вказівки до лабораторних занять з курсу “Теорія автоматичного керування” для студентів спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології. Частина 1 – Математичне моделювання АСР / Укл. Швачка О.І. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. – 33 с.

Укладач О.І. Швачка, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск Ю.К. Тараненко, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних занять
з курсу “Теорія автоматичного керування” для студентів спеціальності
151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології.
Частина 1 – Математичне моделювання АСР

Укладач ШВАЧКА Олександр Іванович

Технічний редактор В.П. Синицька
Комп’ютерна верстка В.П. Синицька

Підписано до друку 02.08.18. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 1,51. Обл.-вид. арк. 1,57. Тираж 100 прим. Зам. № 31.
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015

ДВНЗ УДХТУ, просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 5, 49005

Редакційно-видавничий відділ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АСП В MATLAB SIMULINK

Мета роботи – знайомство з призначенням, графічним інтерфейсом, принципами побудови моделей і важливими блоками (віртуальними моделями реальних пристроїв та їх елементів) програми Matlab Simulink, а також придбання навиків створення простих моделей, текстове і графічне оформлення діаграм.

1.1 Загальна характеристика створення моделі АСП у Matlab Simulink

Simulink є додатком до пакету Matlab і призначений для моделювання лінійних і нелінійних, дискретних і безперервних систем, які можуть працювати як в режимі обчислення, так і в режимі реального часу. У Simulink реалізований принцип візуального програмування відповідно до якого вся модель будується зі стандартних бібліотечних блоків і блоків модернізованих або розроблених користувачем.

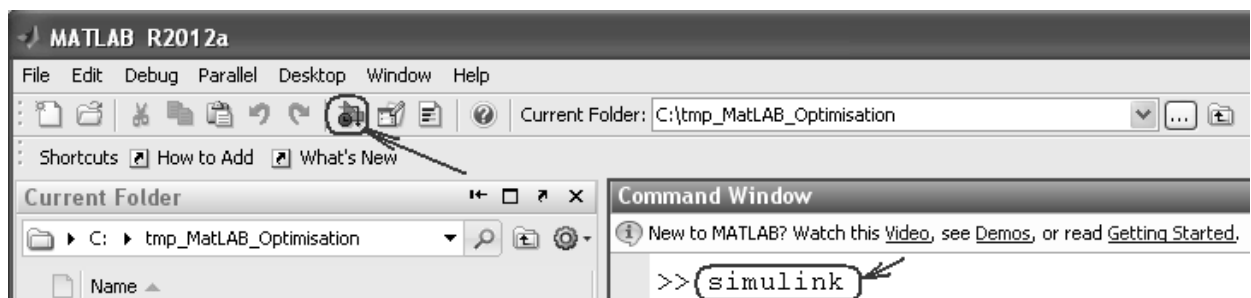
Кожен блок реалізує свою математичну функцію. Блоки мають входи і виходи і з'єднуються в моделі лініями зв'язку за якими аргументи надходять на вхід функцій.

Крім секцій з типовими блоками, бібліотека Simulink має додаткові розділи з блоками для різних областей застосування, наприклад, для моделювання електромеханічних пристроїв, каналів передачі даних і т.д.

Багато функцій (команди m-файлів) та інструменти Matlab можуть використовуватися в середовищі Simulink.

1.1.1 Створення та запуск моделі

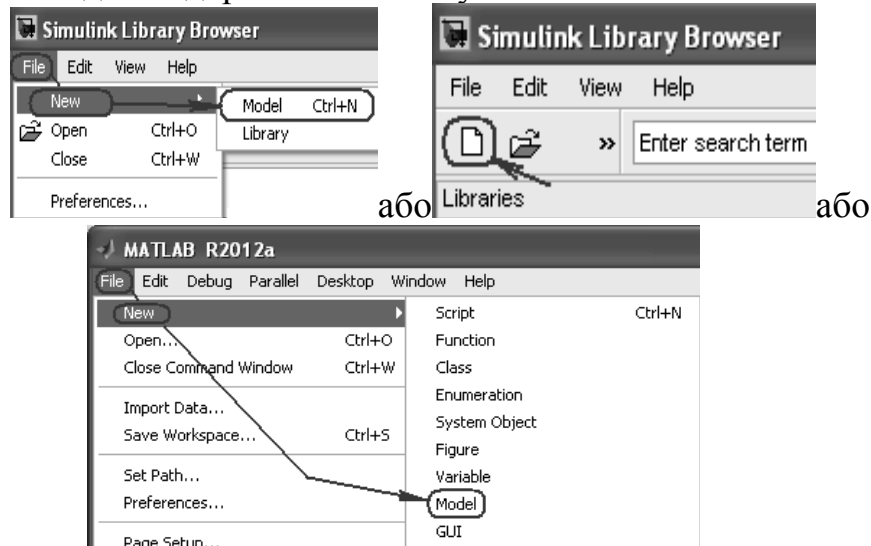
Для запуску Simulink необхідно попередньо запустити Matlab, а потім натиснути на кнопку або ввести в командному рядку Simulink:



Для створення нової моделі необхідно:

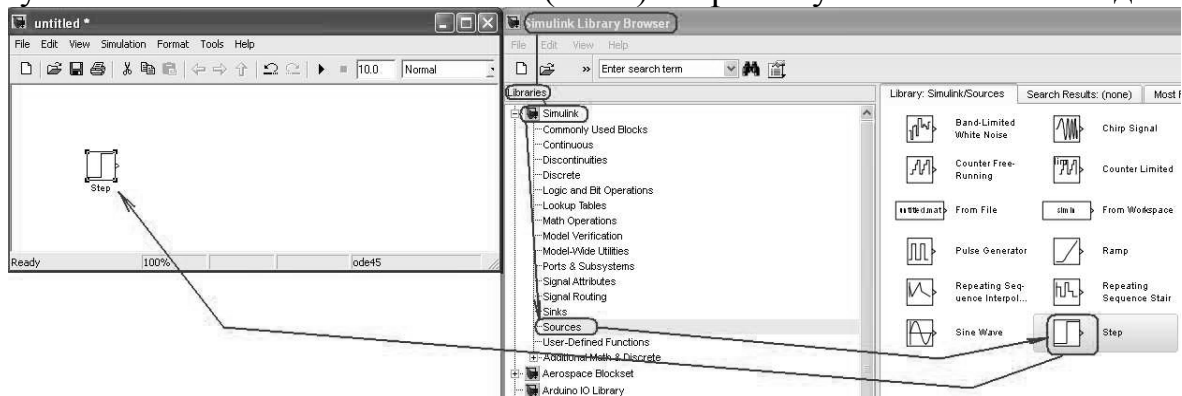
1. Відкрити вікно моделі;
2. Перенести у вікно необхідні блоки з Simulink бібліотеки;
3. З'єднати блоки лініями зв'язку.

Вікно нової моделі відкривається наступним чином:



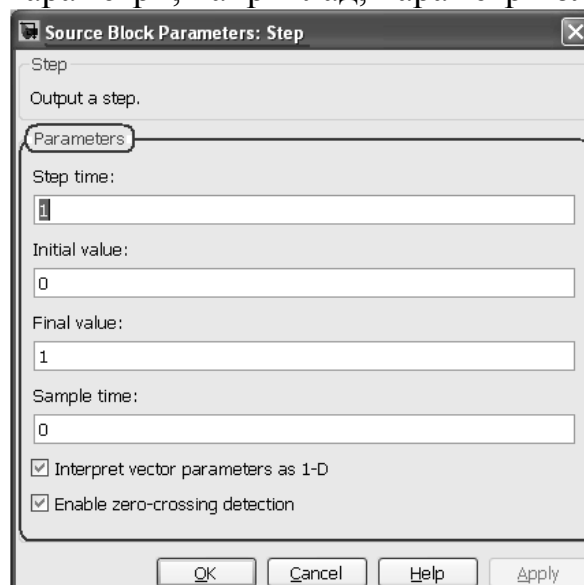
1.1.2 Робота з блоками

Для перенесення в вікно моделі блоку необхідно знайти блок в бібліотеці натиснути на блок лівою кнопкою миші (ЛКМ) і перетягнути блок в вікно моделі:



Щоб скопіювати блок (або виділені блоки) треба перетягнути його, утримуючи праву кнопку миші (ПКМ).

Для зміни параметрів блоку треба двічі клацнути на блоці і в діалоговому вікні змінити відповідні параметри, наприклад, параметри блоку Step:



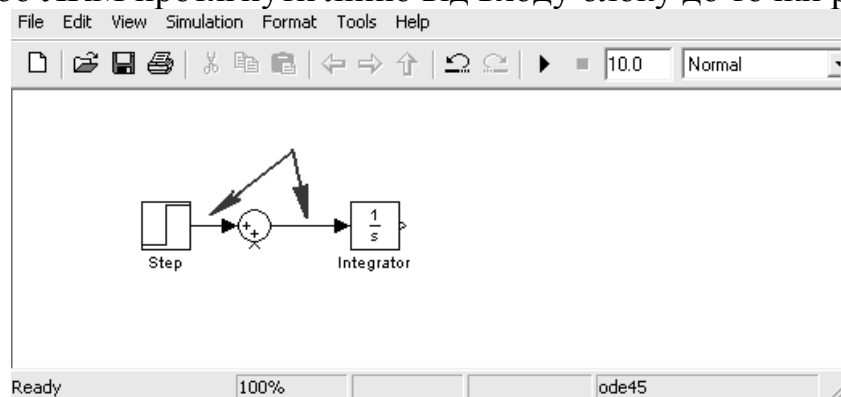
Щоб змінити назву блоку треба клацнути по назві блоку ЛКМ і відредагувати текст.

З виділеними блоками можна виконувати наступні дії:

- змінити розташування і розміри блоку;
- змінити колір контуру і самого блоку;
- змінити орієнтацію блоку;
- вирівняти розташування блоків;
- створити з декількох блоків підгрупу (subsystem), яка відображається одним блоком (команди для роботи з блоками знаходяться в розділі меню>Format вікна моделі).

Для з'єднання блоків можна протягнути мишкою лінію зв'язку між потрібними виходом (входом) і входом (виходом) або клацнути ЛКМ по блоку з потрібним виходом, потім натиснути на клавішу клавіатури Ctrl і клацнути ЛКМ по блоку з потрібним входом.

Щоб подати один сигнал на два блоки (зробити «розвилку»), треба спочатку створити одну лінію звичайним способом. Для створення другої лінії, слід натиснути ПКМ на точку передбачуваної розвилки і протягнути лінію до другого блоку або ЛКМ протягнути лінію від входу блоку до точки розвилки:



Для виділення об'єкта моделі (блоку або сполучної лінії) треба клацнути по ньому ЛКМ. Для видалення об'єкта або групи необхідно спочатку їх виділити клацанням або оконтуровуванням, а потім видалити командою Delete – пов'язаної з об'єктом або групою об'єктів.

Користувач може підібрати оптимальні для конкретної моделі.

Вхідні сигнали (розділ бібліотеки Sources) і змінні стану моделі можна спостерігати в процесі моделювання за допомогою блоків розділу (Sinks). Наприклад, блок Scope в залежності від його налаштувань показує графіки зміни вхідних сигналів як в одному вікні, так і в декількох, відображаючи заданий число точок. Масштаби графіків можна змінювати, а їх дані - зберігати в робочій області Matlab (workspace). Час моделювання задається у вікні:



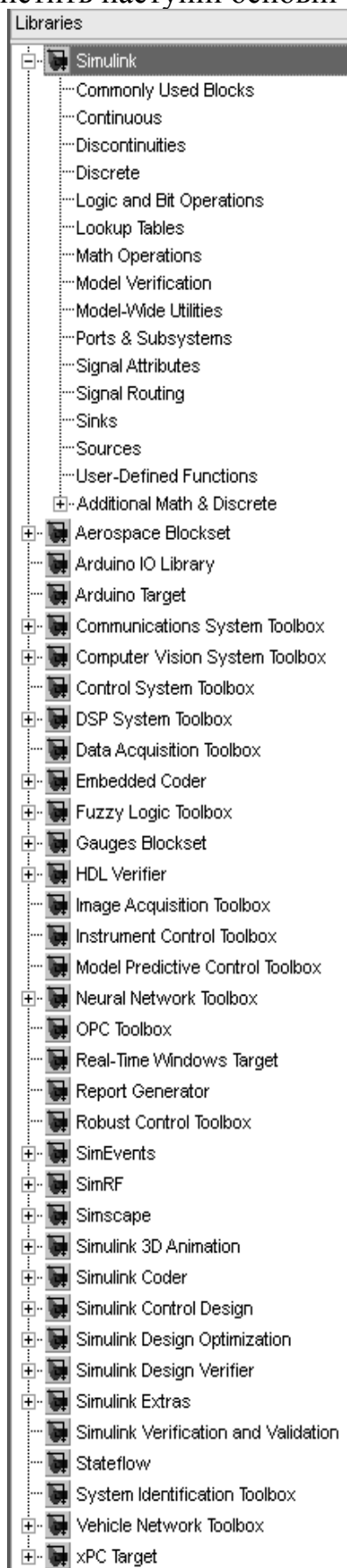
Для установки нескінченного часу моделювання в відповідне вікно необхідно ввести значення:

inf

Для запуску моделювання необхідно клацнути по кнопці Start simulation.



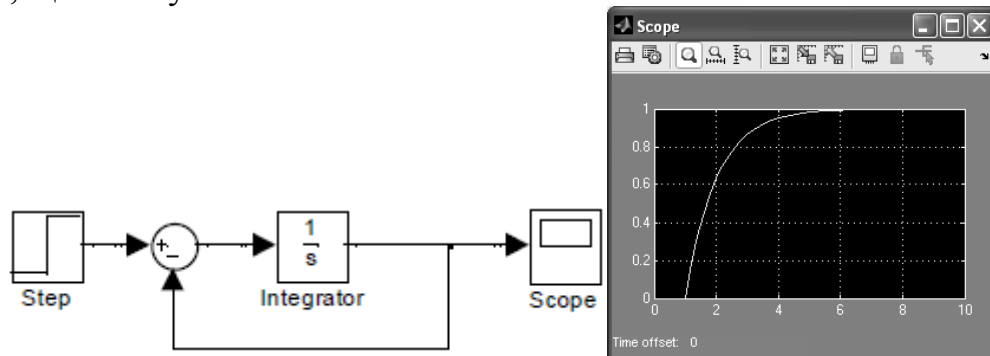
Бібліотека Simulink містить наступні основні розділи:



Кнопки:



припиняють і зупиняють моделювання. Копіювання моделі в буфер обміну вигляді растрового малюнка виконується командою меню вікна моделі >Edit – Copy Model to Clipboard. Попередньо краще зменшити розміри вікна моделі до мінімальних, щоб не було білих полів:



Модель включає джерело ступеневого впливу, суматор, інтегратор охоплений негативним зворотним зв'язком і осцилограф для спостереження за реакцією системи.

Commonly Used Blocks – найбільш часто використовувані блоки різних розділів бібліотеки (впливу, суматор, інтегратор, підсилювач, осцилограф і т.д.).

Continuous – бібліотека безперервних елементів (інтегратор, диференціатор, лінійна система і т.д.).

Discontinuities – нелінійні елементи (насичення, реле, перемикач і т.д.).

Discrete – бібліотека дискретних елементів (інтегратор, фільтр, затримка і т.д.).

Logicand Bit Operations – логічні операції (порівняння, здвигання, інверсія, AND і т.д.).

LookupTables – блоки завдання в табличній формі функції змінних з використанням лінійної інтерполяції (функції однієї змінної, двох змінних і т.д.).

MathOperations – математичні функції (абсолютне значення, комбінаторна логіка, виділення речової і уявної складової комплексного числа і т.д.).

Model Verification – блоки перевірки проектованої системи на відповідність вимогам в частотній і тимчасовій областях (границі значення сигналу, обмеження по амплітуді ЛАЧХ, обмеження на відгук на одиничний поетапний вплив, запаси стійкості по амплітуді і фазі і т.д.).

Model-Wide Utilities – бібліотека додаткових утиліт (опис моделі, інформація про тип даних використовуваних блоків Simulink і т.д.).

Ports&Subsystems – блоки підсистем (порти, синхронізація підсистем, виклик функцій і т.д.)

Signal Routing – сигнали і системи (складовий блок, вхідний сигнал, вихідний сигнал, мультиплексор, демультимплексор і т.д.).

Sinks – засоби відображення (тимчасова діаграма, виведення результатів в файл, зупинка виконання моделі і т.д.).

Sources – джерела сигналів (генератор імпульсних/синусоїдальних сигналів, генератор випадкових чисел, генератор пилкоподібних сигналів, годинник і т.д.).

User-Defined Function – функції користувача (s-функції, m-функції, табличні функції і т.д.).

Additional Math&Discrete – додаткові математичні і дискретні функції (затримки, інкрементування і т.д.).

Крім Simulink є цілий ряд спеціальних бібліотек для розрахунків, моделювання систем, обміну даними, управління ресурсами комп'ютера та ін. (див. рис. вище).

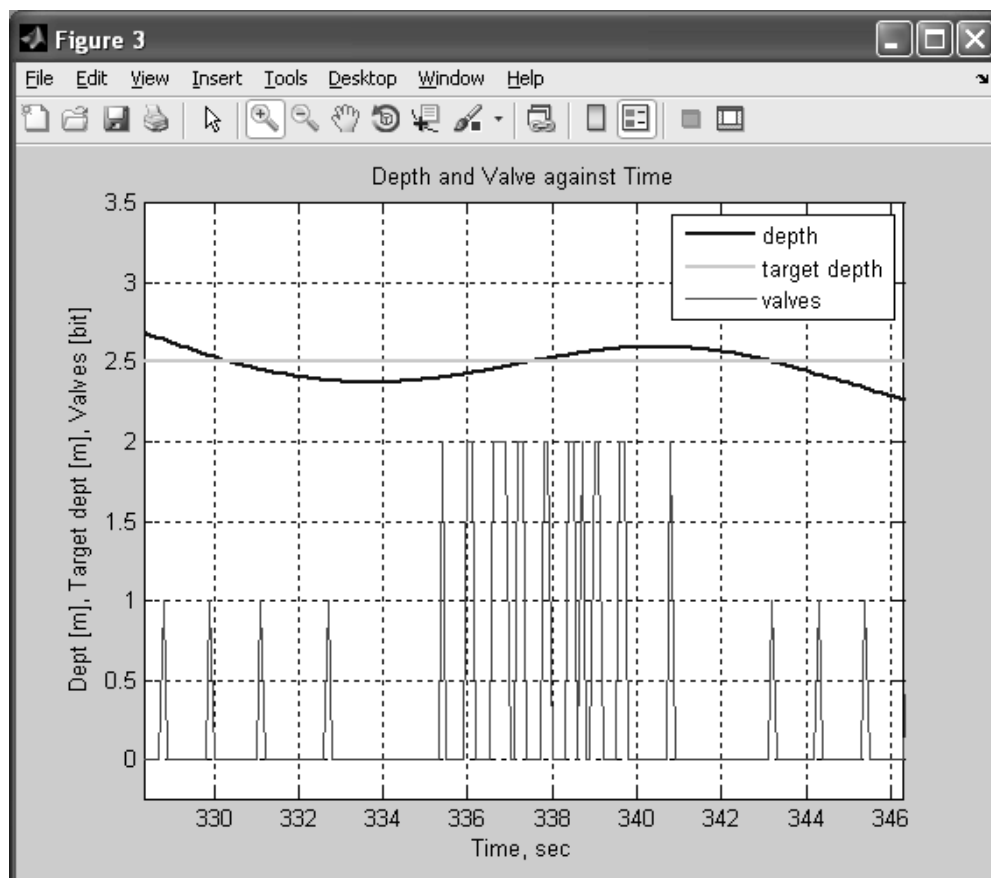
1.1.3 Оформлення графіків

Для графічного відображення змінних станів Simulink моделі збережених в робочій області (workspace) можна використовувати такі функції Matlab.

Команда, параметр	Опис
figure; figure(N рисунка: 1,2,...);	Відкриття вікна графіка
plot(y);	Побудова графіка змінної y
plot(t, y);	Побудова графіка змінної y (t)
plot(t, y, 'xb', i, z, 'g', 'line width',2);	Побудова блакитного ('b') графіка y (t) з x точок і зеленого ('g') графіка z (i) лінією подвійної товщини ('Line width', 2) в одній зоні вікна. Кольорове позначення ліній графіків: b- синій (blue), g- зелений (green), r- червоний (red), c- блакитний (cyan), m- фіолетовий (magenta), y- жовтий (yellow), k- чорний (black), Позначення типу лінії: (-)- суцільна, (:)- точкова, (x) - позначення точок масиву Позначення товщини лінії: 'Linewidth', 3; 'Linewidth', 2
subplot (N рядка, N стовпчика, N активного графіка);	Активізація однієї з зон вікна для побудови в ній графіка
title('xxx')	xxx заголовок графіка
xlabel('xxx')	xxx назва осі абсцис
ylabel('xxx')	xxx назва осі ординат
legend ('назва 1', 'назва 2', 'назва ')	виведення типу ліній графіків і їх назв в окремий список вікна графіків

Приклад коду m-файлу Matlab і його графік:

```
if 1
    figure
    plot(time, depth, 'b', 'linewidth', 2);
hold on
plot(time, set_depth, 'c', 'line width', 2);
hold on
plot(time, valves, 'm', 'line width', 1);
grid on
legend('depth','target depth','valves');
xlabel('Time, sec');
ylabel('Dept [m], Targetdept [m], Valves [bit] ');
title('Depth and Valve against Time');
end
```

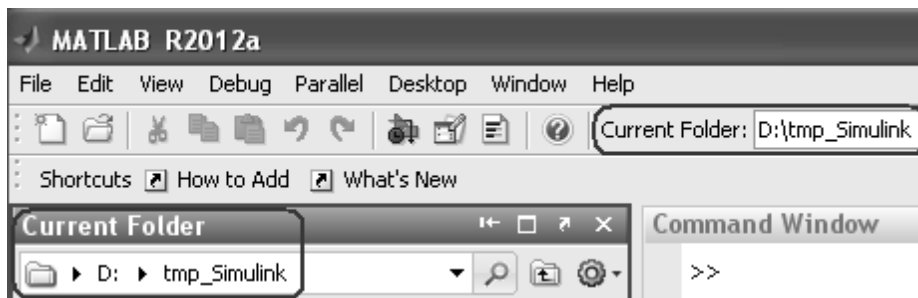


1.2 Порядок проведення роботи

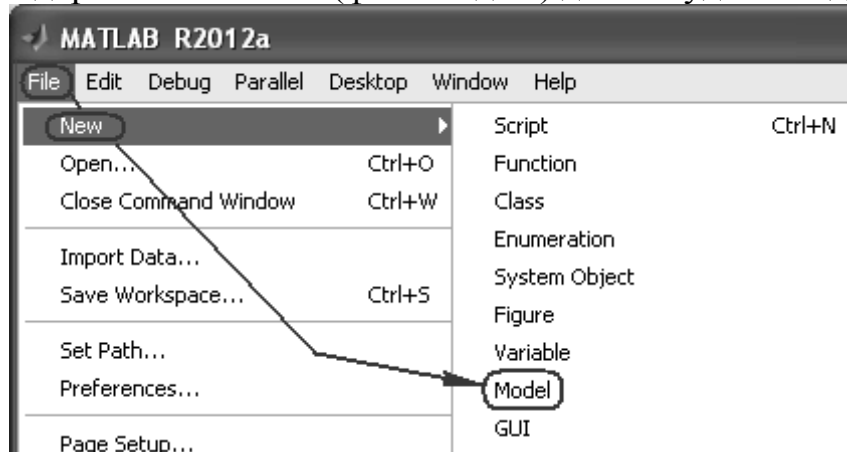
1.2.1 Завдання 1. Побудова залежності виходу від входу стандартного блоку бібліотеки Simulink.

1.2.1.1 Запустити Matlab.

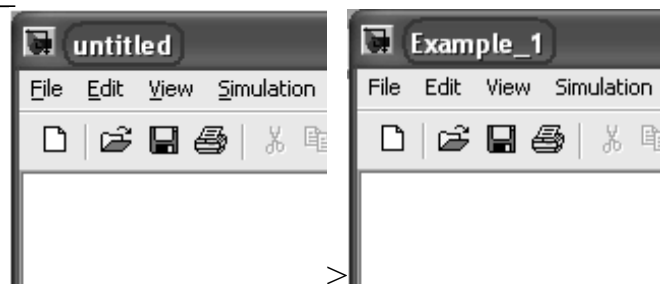
1.2.1.2 Налаштувати Matlab на свій робочий каталог:



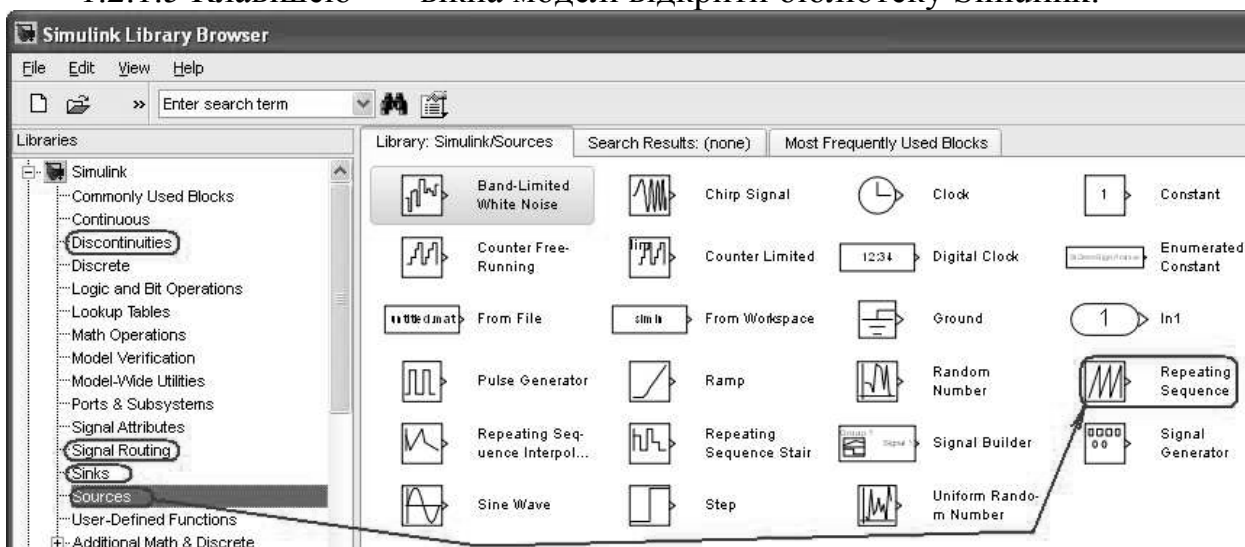
1.2.1.3 Відкрити нове вікно (файл моделі) для побудови моделі:



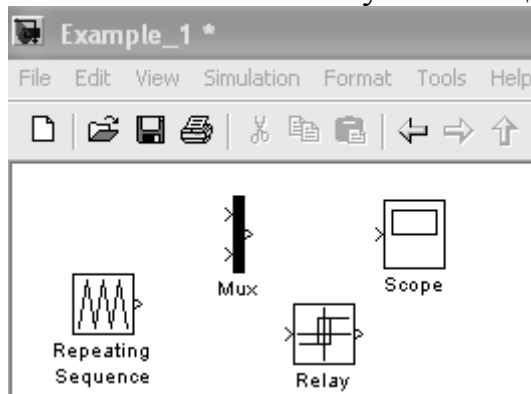
1.2.1.4 Командою меню >File>SaveAs перейменувати файл моделі untitled, наприклад, в Example_1.



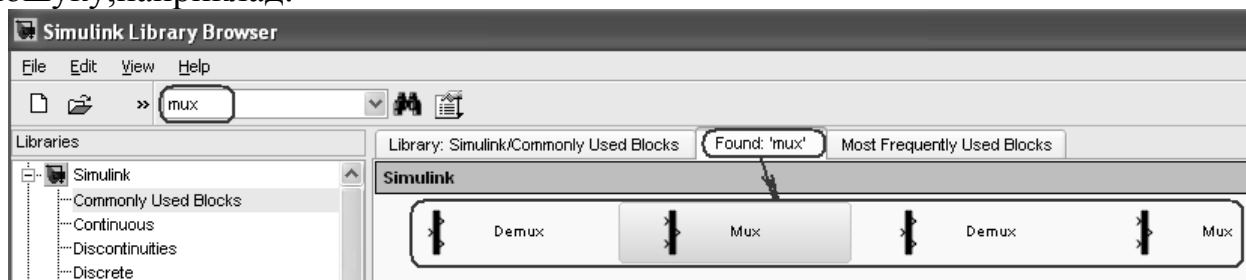
1.2.1.5 Клавішею  вікна моделі відкрити бібліотеку Simulink:



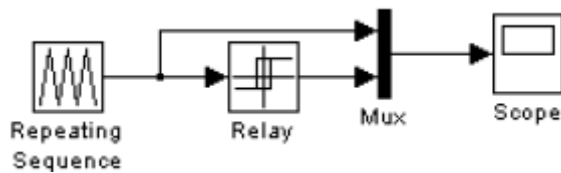
1.2.1.6 Перенести з бібліотеки Simulink у вікно моделі наступні блоки:



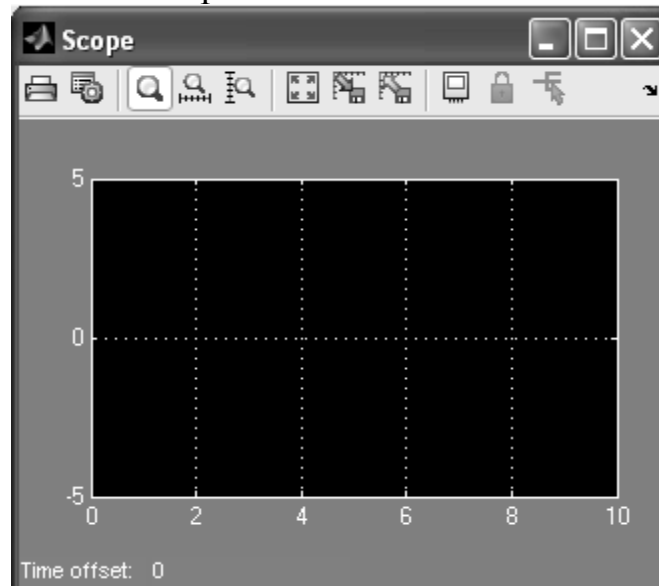
Потрібний блок в бібліотеці можна також знайти ввівши ім'я блоку у вікні пошуку, наприклад:



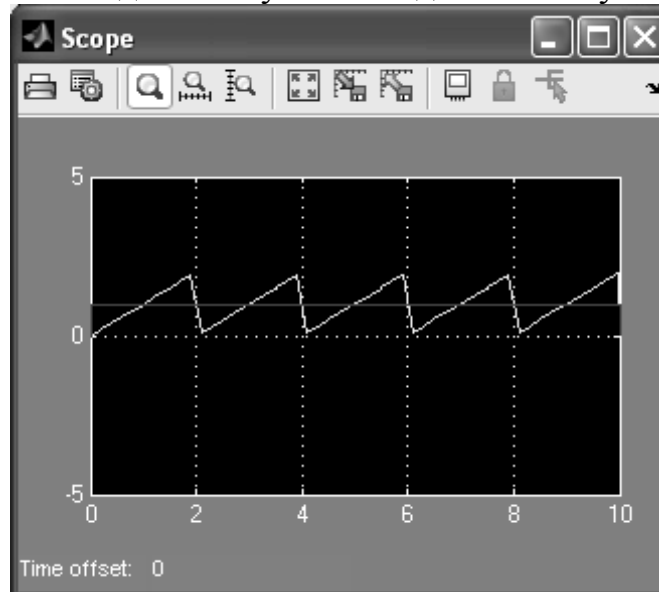
1.2.1.7 Знайти блоки як показано нижче:



1.2.1.8 Відкрити блок Scope:



1.2.1.9 Запустити модель. Результат моделювання у вікні Score:



1.2.1.10 Командою  блоку Score зафіксувати розміри вікна для майбутніх графіків.

1.2.1.11 Відкривши вікно з параметрами реле встановить опції, наприклад, як показано нижче:

The 'Function Block Parameters: Relay' dialog box is shown. It has two tabs: 'Main' and 'Signal Attributes'. The 'Main' tab is active. The text description reads: 'Output the specified 'on' or 'off' value by comparing the input to the specified thresholds. The on/off state of the relay is not affected by input between the upper and lower limits.' The parameters are as follows:

- Switch on point: 0.5
- Switch off point: -0.5
- Output when on: 1
- Output when off: -1
- Input processing: Elements as channels (sample based)
- ☒ Enable zero-crossing detection
- Sample time (-1 for inherited): -1

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help, Apply.

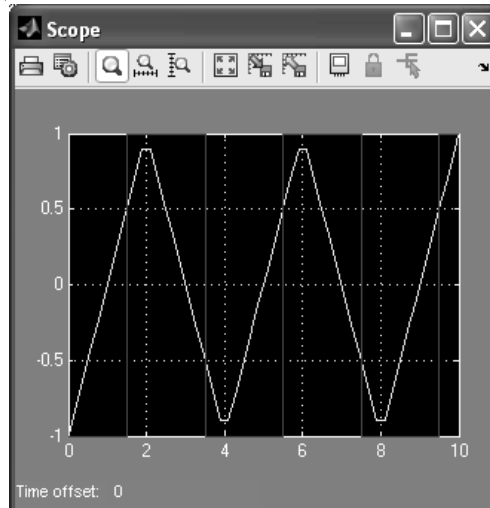
1.2.1.12 Задати параметри вихідного сигналу блоку розгортки (Repeating Sequence) так, щоб він перекривав точки перемикання реле (-0.5 і 0.5).

The 'Source Block Parameters: Repeating Sequence' dialog box is shown. It has a text description: 'Output a repeating sequence of numbers specified in a table of time-value pairs. Values of time should be monotonically increasing.' The parameters are as follows:

- Time values: [0 2 4]
- Output values: [-1 1 -1]

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help, Apply.

Побудувати графіки моделі:



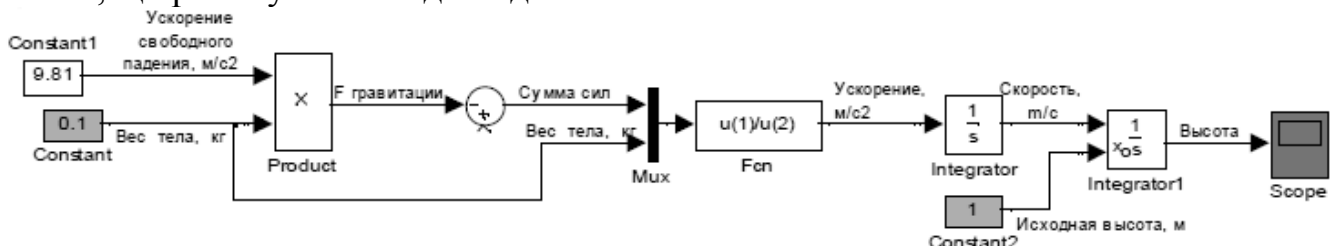
Графіки показують, що реле перемикається в 1 коли вхідний сигнал перевищує 0.5 і перемикається в -1 коли вхідний сигнал стає менше -0.5.

1.2.2 Завдання 2. Побудова моделі стрибаючого м'яча.

Опис процесу. На заданій висоті, наприклад, 1м відпускають м'яч вагою 100г, який летить до поверхні, і відскакує від неї на висоту $\sim 80\%$ від початкової точки. Необхідно побудувати модель польоту і відскоків м'яча і визначити основні параметри моделі.

Складемо список відношень які, впливають на поведінку м'яча: сила гравітації дорівнює добутку маси тіла на прискорення вільного падіння, прискорення тіла дорівнює відношенню сил діючих на тіло до маси тіла, зміна швидкості відповідає інтегралу від прискорення, зміна відстані відповідає інтегралу від швидкості.

1.2.2.1 У новому вікні набрати модель польоту м'яча, які складається з блоків, що реалізують вихідні відношення:



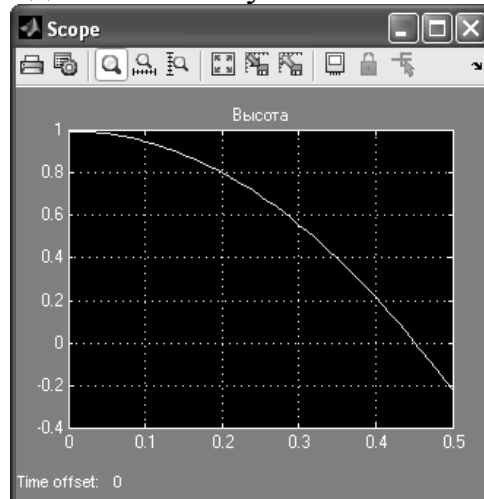
1.2.2.2 Вибрати з наступного моделювання (меню моделі>Simulation>ConfigurationParameters (Ctrl + E)>Solver):

Solver options

Type: Fixed-step Solver: ode8 (Dormand-Prince)

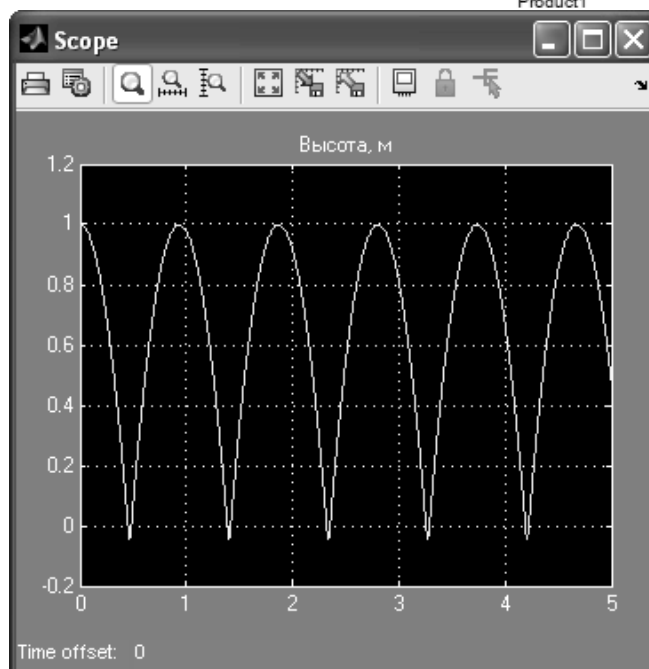
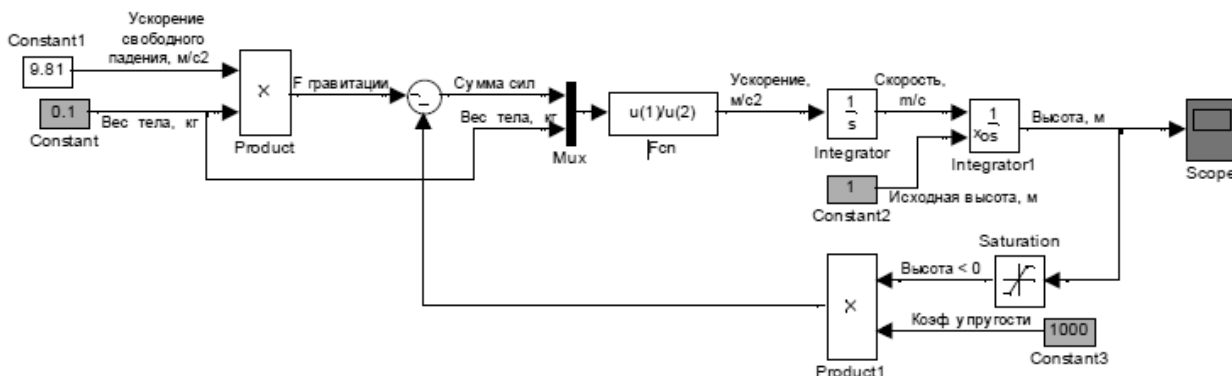
Fixed-step size (fundamental sample time): 0.001

1.2.2.3 Запустити модель. Розглянути політ м'яча:



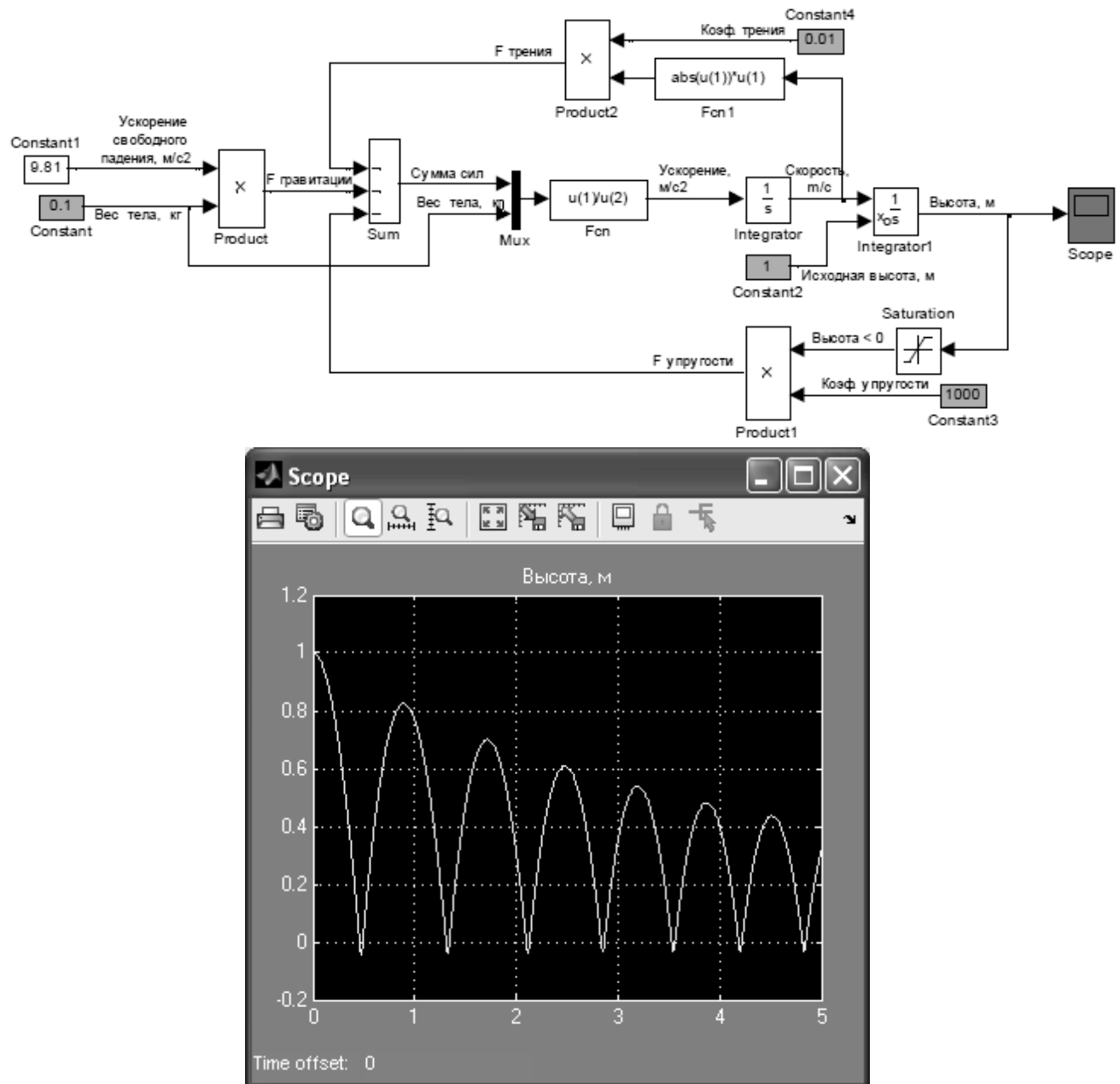
Видно, що політ до поверхні з висоти одного метра під дією гравітації займає 0.45 секунд. Далі м'яч пролітає поверхню без відскоку. Передусім потрібно увімкнути в модель опис відскоку. Додамо до списку відношень нове: сила стиснення тіла дорівнює добутку стиснення тіла на коефіцієнт пружності. Стиснення починає діяти коли м'яч досяг поверхні, а висота змінює знак.

1.2.2.4 Доповнити модель функціями, що описують відскік і перевірити роботу допрацьованої моделі. Підібрати коефіцієнт пружності, який відповідає стисненню м'яча на 4.5 см:



Видно, що політ з відскоками не загасає. Процес не втрачає енергію. Ця модель не відповідає стрибкам м'яча, що часто спостерігаються. Додамо до списку нове відношення: сила тертя м'яча об повітря пропорційна квадрату швидкості м'яча.

1.2.2.5 Доповнити модель блоками, які описують тертя м'яча об повітря і перевірити роботу допрацьованої моделі. Підібрати коефіцієнт тертя при якому м'яч злітає на 80% вихідної висоти:



Цей політ м'яча найбільш повно відповідає умовам завдання. Надалі, параметри моделі можна уточнювати за експериментальними даними.

1.3 Контрольні питання

1. Загальна характеристика моделювання АСР в Matlab Simulink.
2. Опис графічного інтерфейсу Simulink.
3. Принципи побудови моделей в середовищі Simulink.

4. Принципи управління моделлю та отримання результатів моделювання.
5. Основні поняття про принципи функціонування програми Simulink.
6. Вставка, настройки та з'єднання блоків у програмі Simulink.
7. Методика набору блок-схеми моделі в Simulink.
8. Методика режиму імітаційного моделювання.
9. Як передати результати моделювання в робочу область Matlab?
10. Яке розширення мають файли Simulink моделі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВИХ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК

Мета роботи – за допомогою математичного пакету Matlab дослідити основні характеристики типових динамічних ланок автоматичної систем регулювання.

2.1 Представлення математичного опису АСР у формі передаточної функції

В теорії автоматичного керування зручною і найбільш наочною формою визначення закономірностей перетворення вхідних сигналів є передаточна функція. В операторному вигляді – це відношення оператора дії до власного оператора, причому кількість передаточних функцій дорівнює кількості вхідних сигналів:

$$W_1(p) = \frac{R_1(p)}{D(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}, \quad (2.1)$$

$$W_2(p) = \frac{R_2(p)}{D(p)} = \frac{c_l p^l + c_{l-1} p^{l-1} + \dots + c_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}, \quad (2.2)$$

тобто

$$W_1(p) = \frac{x(p)}{U(p)}, W_2(p) = \frac{z(p)}{z(p)} \quad (2.3)$$

Передаточні функції мають нулі (корені рівняння $R(p)=0$) і полюси (корені рівняння $D(p)=0$). На основі виразів (2.1)-(2.3) визначається фундаментальна залежність:

$$x(p) = W_1(p) \cdot U(p) + W_2(p) \cdot z(p), \quad (2.4)$$

Таким чином, передаточні функції мають чіткий фізичний зміст: показують як перетворюється вхідний сигнал (передається з входу на вихід). Передаточні функції зручно отримувати з диференціальних рівнянь в операторному вигляді, наприклад:

$$(Tp + 1)x(p) = K_U U(p) + K_Z z(p), \quad (2.5)$$

тоді

$$W_1(p) = \frac{K_U}{Tp + 1}; W_2(p) = \frac{K_Z}{Tp + 1}, \quad (2.6)$$

Передаточні функції можуть бути також в формі зображень Лапласа: це відношення зображення вихідної величини до зображення вхідної за нульових початкових умов. Формально це можна отримати підстановкою в (2.1)-(2.3) $p = s$ (s – комплексне число), але це справедливо лише для стаціонарних систем, тоді

$$x(s) = W_1(s)U(s) + W_2z(s), \quad (2.7)$$

2.2 Аналіз поведінки АСР за часовими характеристиками

Часові характеристики - це реакція елемента чи системи на типові вхідні сигнали – стрибкоподібний чи імпульсний (рис. 2.1).

Часові функції є наочними, за їх видом можна оцінити загальні властивості елемента чи системи, які визначають їх динамічні особливості. З математичної точки зору часові характеристики є розв'язком диференціального рівняння, яке описує поведінку елемента чи системи в залежності від виду зовнішнього сигналу (це визначається правою частиною диференціального рівняння) та початкових умов, як правило нульових.

Перехідна функція $h(t)$ (рис. 2.1,а) – зміна вихідної величини з часом при подачі на вхід одиничного ступінчатого сигналу за нульових початкових умов.

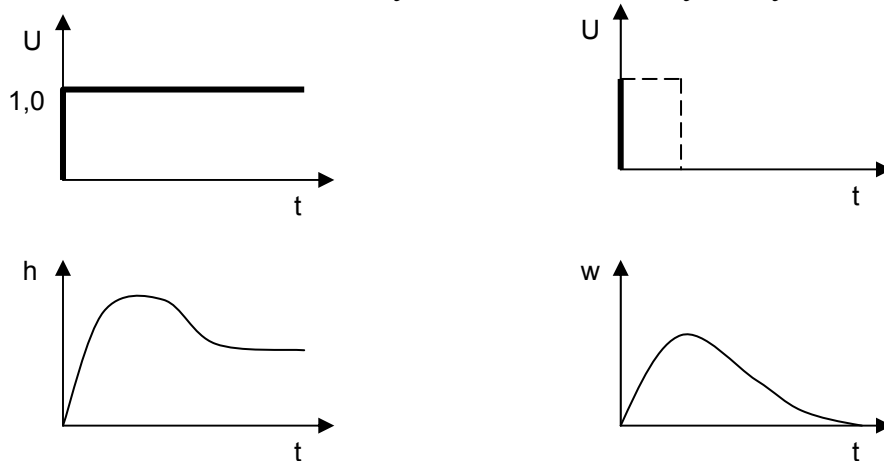


Рисунок 2.1 – Часові характеристики:
а – перехідна функція $h(t)$; б – імпульсна перехідна функція $w(t)$

Імпульсна перехідна функція $w(t)$ (рис. 2.1,б) – зміна вихідної величини з часом після подачі на вхід сигналу у вигляді δ -функції. Цю характеристику називають також ваговою функцією, або функцією ваги.

В задачах аналізу та синтезу використовуються різні динамічні характеристики, тому важливо знати і зв'язок між ними, який є однозначним тому, що фактично – це відображення одних і тих же властивостей елемента чи системи в різній формі. В той же час це дає можливість використовувати в конкретній задачі саме такі характеристики, які є найбільш зручними. Вище вже вказувалось, що перехідна функція $h(t)$ – розв'язок диференціального

рівняння. Враховуючи, що δ -функція та одиничний стрибок зв'язані між собою залежністю

$$\delta(t) = 1'(t), \quad (2.8)$$

справедливі також залежності:

$$w(t) = h'(t), h(t) = \int_0^t w(t)dt, \quad (2.9)$$

зображення за Лапласом одиничного стрибка

$$L[1(t)] = \frac{1}{s}, \quad (2.10)$$

тому

$$L[h(t)] = \frac{W(s)}{s}, \quad (2.11)$$

$$h(t) = L^{-1}\left[\frac{W(s)}{s}\right], \quad (2.12)$$

де L^{-1} – символ зворотного перетворення Лапласа.

Приймаючи до уваги, що:

$$L[\delta(1)] = 1, \quad (2.13)$$

можна записати:

$$L[w(t)] = W(s), W(t) = L^{-1}[W(s)]. \quad (2.14)$$

Реакція елемента чи системи на довільний вхідний сигнал визначається за допомогою інтеграла згортки (інтеграл Дюамеля):

$$x(t) = h(t)U(0) + \int_0^t h(t-\tau)U'(\tau)d\tau, \quad (2.15)$$

$$x(t) = h(0)U(t) + \int_0^t w(t-\tau)U(\tau)d\tau. \quad (2.16)$$

2.3 Типові елементарні ланки та їх характеристики

В автоматичних системах використовуються різні функціональні елементи (автоматичні регулятори, датчики, перетворювачі та ін.), які мають різну природу і конструкцію, але їх поведінка описується однаковими математичними залежностями, що дає можливість виділити порівняно невелику кількість типових ланок. Кожній такій ланці відповідає математична модель як залежність між вхідною та вихідною величинами, при цьому ця залежність є достатньо простою, і ланки називають елементарними. Елементарна ланка (ЕЛ) – це виділена ділянка (частка, елемент), яка має однонаправлену дію з відомою залежністю $Y = f(U)$ (рис. 2.2).

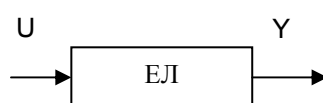


Рисунок 2.2 – Елементарна ланка

В теорії автоматичного керування введені такі ЕЛ, щоб з їх допомогою можна було представити та описати систему різної природи та призначення. Використовуються такі елементарні ланки: аперіодична, підсилювальна, коливальна, інтегральна, диференціююча, із запізнюванням. Всі ці ЕЛ є мінімально-фазовими елементами. При аналізі властивостей елементарних ланок необхідно знати: рівняння, передаточну функцію, часові та частотні характеристики, а також реальні об'єкти, властивості яких описуються конкретною елементарною ланкою.

Підсилювальна ланка. Рівняння ланки має вигляд:

$$x = kU, \quad (2.17)$$

де k – коефіцієнт передачі.

Рівняння ланки в операторному вигляді:

$$x(p) = kU(p), \quad (2.18)$$

звідки передаточна функція:

$$W(p) = \frac{x(p)}{U(p)} = k. \quad (2.19)$$

Частотні характеристики отримують підстановкою: $p = j\omega$, звідки амплітудно-фазова характеристика:

$$W(j\omega) = k, \quad (2.20)$$

дійсна частина $U(\omega)=k$, уявна $V(\omega)=0$, амплітудно-фазова характеристика $\varphi(\omega)=0$ (рис. 2.3).

Перехідна функція підсилювальної ланки

$$h(t) = k \cdot 1(t). \quad (2.21)$$

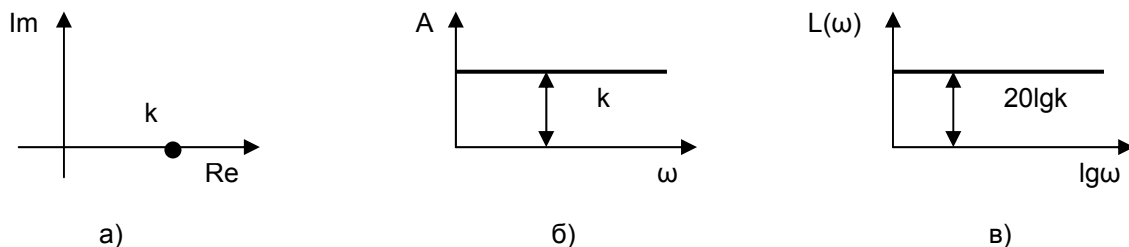


Рисунок 2.3 – Частотні характеристики підсилювальної ланки:

а – амплітудно-фазова (АФХ); б – амплітудно-частотна (АЧХ);

в – логарифмічна амплітудно-частотна (ЛАЧХ)

а імпульсна характеристика:

$$w(t) = k \cdot \delta(t), \quad (2.22)$$

Таким чином, підсилювальна ланка є безінерційною, і сигналу будь-якої частоти ($\omega=0; \infty$) проходять з однаковим відношенням амплітуд вхідної і вихідної змінної, яке дорівнює k .

Прикладом об'єкта, який описується підсилювальною ланкою, є електронний операційний підсилювач.

Аперіодична ланка. Диференціальне рівняння ланки:

$$T \frac{dx}{dt} + x = kU, \quad (2.23)$$

де T – постійна часу; k – коефіцієнт передачі.

В операторному вигляді рівняння записується так:

$$(Tp + 1)x(p) = kU(p), \quad (2.24)$$

звідки передаточна функція ЕЛ:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad (2.25)$$

Амплітудно-фазова характеристика відповідає виразу при $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{k}{T(j\omega) + 1}. \quad (2.26)$$

Домножуючи вираз на $(T(j\omega) - 1)$, отримуємо:

$$W(j\omega) = \frac{k - jTk\omega}{(T\omega)^2 + 1} = U(\omega) + jV(\omega), \quad (2.27)$$

де

$$U(\omega) = \frac{k}{1 + (T\omega)^2}, V(\omega) = -\frac{kT\omega}{1 + (T\omega)^2}, \quad (2.28)$$

Амплітудно-частотна характеристика:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}}. \quad (2.29)$$

Фазочастотна характеристика

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = -\arctg T\omega. \quad (2.30)$$

Ці характеристики показані на рис. 2.4.

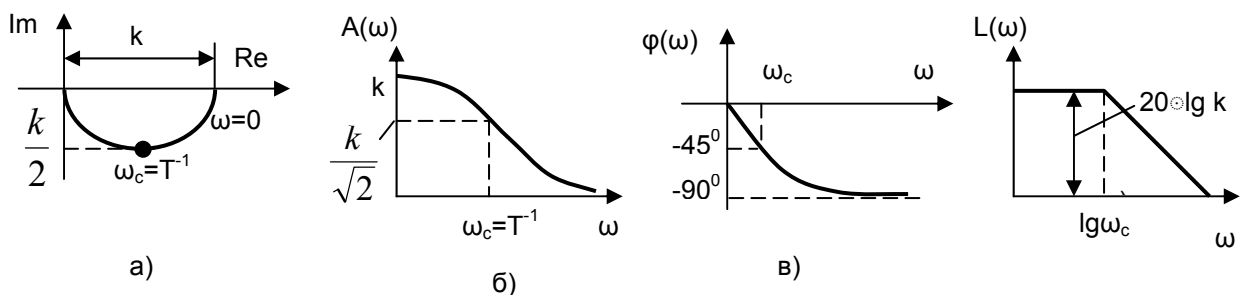


Рисунок 2.4 – Частотні характеристики аперіодичної ланки:
а – АФХ; б – АЧХ; в – ФЧХ; г – ЛАЧХ

Перехідна функція аперіодичної ланки знаходиться як сума загального та частинного розв'язків рівняння (2.23):

$$h(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \cdot 1(t). \quad (2.31)$$

Імпульсна характеристика ланки визначається диференціюванням $h(t)$:

$$w(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}} \cdot 1(t). \quad (2.32)$$

Часові характеристики аперіодичної ланки показані на рис. 2.5.

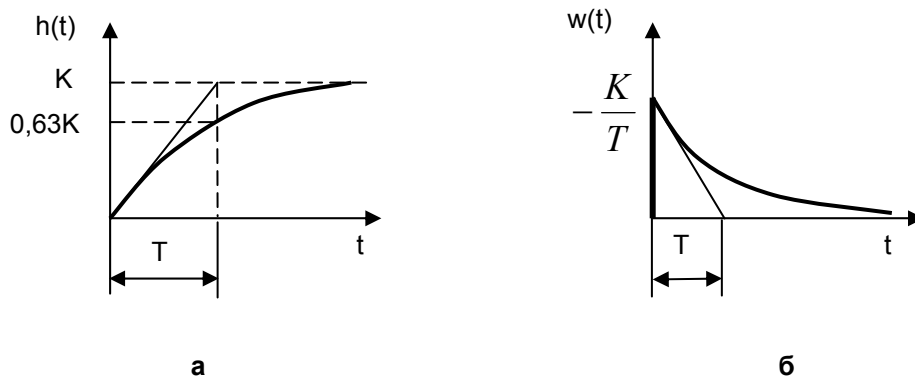


Рисунок 2.5 – Часові характеристики А-ланки: а – перехідна; б – імпульсна

З аналізу частотних характеристик ланки випливає, що гармонійний сигнал малої частоти ($\omega < \omega_c$) пропускається добре, про що свідчить відношення амплітуд вихідного і вхідного сигналів. При збільшенні частоти ($\omega > \omega_c$) зменшується коефіцієнт передачі і при $\omega \rightarrow \infty$ $K \rightarrow 0$. Аперіодична ланка є мінімально-фазовою, тому що створює менший фазовий зсув ніж інші ланки з такою характеристикою. Наприклад, нестійка ланка, частотна характеристика якої:

$$W(j\omega) = \frac{K}{Tj\omega - 1}, \quad (2.33)$$

створює зсув за фазою:

$$\varphi(\omega) = -180^\circ + \arctg \omega T. \quad (2.34)$$

Часові характеристики аперіодичної ланки (рис. 2.5) дають можливість оцінити постійну часу T , яка визначає інерційність ланки.

Аперіодичною ланкою можна описувати різні елементи, які можуть накопичувати та передавати енергію чи речовину: конструктивні, електричні, гідравлічні збірники та ін.

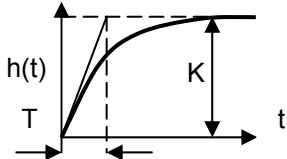
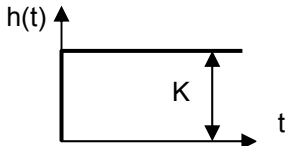
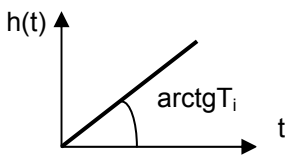
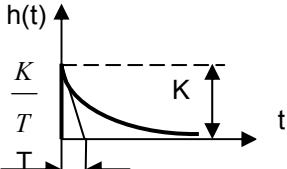
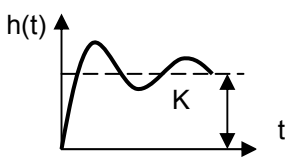
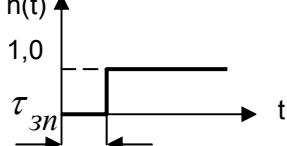
В задачах аналізу та синтезу амплітудно-фазова характеристика аперіодичної ланки визначаються формулою:

$$W(j\omega) = \frac{K}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}} e^{-\arctg T \omega}. \quad (2.35)$$

Властивості інших ланок вивчаються самостійно за наведеною схемою, а їх характеристики в загальному вигляді надані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Характеристика типових елементарних ланок

№ п/п	Ланка	Рівняння	Передаточна функція	Перехідна функція
1.	Аперіодична	$T \frac{dx}{dt} + x = KU$	$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}$	
2.	Підсилювальна (пропорційна, безінерційна)	$x = KU$	$W(p) = K$	
3.	Інтегрувальна	$x = \frac{1}{T_i} \int_0^t U dt$	$W(p) = \frac{1}{T_i p}$	
4.	Диференцію-вальна	$x = K \frac{dU}{dt}$	$W(p) = Kp$	
5.	Коливальна	$T_1^2 \frac{d^2x}{dt^2} + T_2 \frac{dx}{dt} + x = KU$	$W(p) = \frac{K}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$	
6.	Із запізнюванням	$x = U(t - \tau_{zn})$	$W(p) = e^{-p\tau_{zn}}$	

2.4 Використання пакета Matlab для дослідження динамічних ланок

У пакеті Matlab є два основних варіанти для дослідження передаточних функцій і моделювання АСР:

- використання команд пакета розширення Control System Toolbox;
- використання пакета Simulink.

Control System Toolbox призначений для роботи з LTI моделями (Linear Time Invariant Models – лінійні моделі з постійними параметрами) систем керування.

Команда, що створює LTI – систему з одним входом і одним виходом у вигляді передавальної функції, має наступний синтаксис:

$$TF([b_m, \dots, b_1, b_0], [a_n, \dots, a_1, a_0]),$$

де $b_m, \dots, b_1, b_0$ і $a_n, \dots, a_1, a_0$ – значення коефіцієнтів поліномів чисельника та знаменника передаточної функції.

Наприклад, якщо потрібно описати передаточну функцію (ПФ) виду:

$$W(p) = \frac{3p + 1}{2p^2 + 8p + 1}$$

і визначити значення її нулів і полюсів, то потрібно ввести у вікні команд:

```
>> w=tf([3 1],[2 8 1])
```

```
>> zero(w)
```

```
>> pole(w)
```

Досліджувати реакцію LTI-моделі на типові входні впливи можна за допомогою команд:

```
>> step(w)
```

```
>> impulse(w)
```

Можна одержати на одному графіку реакцію відразу декількох динамічних ланок, якщо використати команди виду:

```
>> step(w, w1, w2)
```

```
>> impulse(w, w1, w2)
```

У наведених прикладах час моделювання обирається автоматично. При необхідності його можна явно вказати в команді:

```
>> step(w, w1, w2, t),
```

де t – час моделювання в секундах.

На рис. 2.6 показаний приклад моделювання динаміки коливальної ланки при різних параметрах:

```
>> w = tf ([1],[2 0.3 1]);
```

```
>> w1 = tf ([1],[2 0.5 1]);
```

```
>> w2 = tf ([1],[2 0.1 1]);
```

```
>> step (w,w1,w2,50).
```

В Simulink ПФ можна описати за допомогою блоку Transferfcn у розділі бібліотеки Continuous. Для подачі типових дій треба використати блок Step з розділу Sources (рис. 2.7). Імпульсну перехідну характеристику ланки можна одержати, подаючи на вхід імпульс маленької тривалості й великої амплітуди (наближення δ -функції) при нульових початкових умовах.

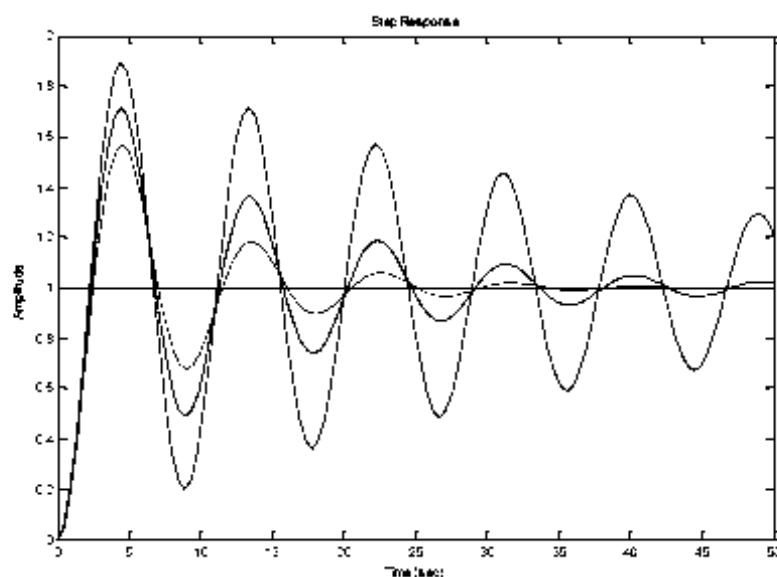


Рисунок 2.6 – Реакція системи регулювання на ступінчастий вплив

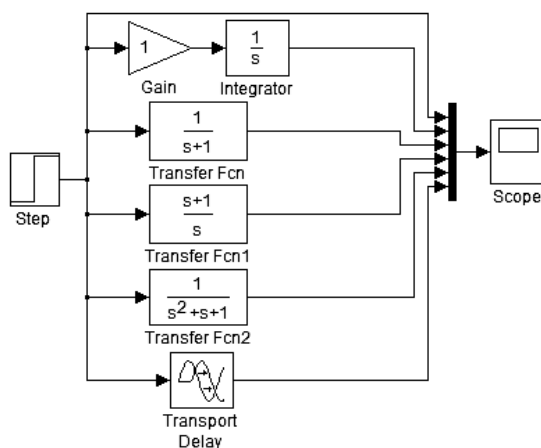


Рисунок 2.7 – Схема моделі в Simulink

2.7 Порядок проведення роботи

За допомогою пакета Matlab побудувати реакцію кожної типової ланки (див. табл. 2.1) на ступінчасту та імпульсну вхідну дію. Визначити вплив коефіцієнтів, що входять в опис кожної ланки на параметри перехідного процесу. Необхідно зробити висновки, що узагальнюють проведені експерименти по кожній ланці.

Таблиця 2.2

Вихідні данні для моделювання динамічних властивостей ланок

Ланка	Параметри ланки														
	K					T					d				
	Варіант (1-5)														
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Підсилювальна	3,5	2	1,5	3	4										
Диференціальна реальна	1	1,5	1,5	5	3	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2					
Інтегруюча	0,5	1	4	0,8	6										
Аперіодична 1 порядку	3,5	10	5	2	8	10	5	8	6	9					
Коливальна	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	0,2	0,5	0,4	0,1	0,6
Аперіодична 2 порядку	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	1,1	1,2	1,05	1,06	1,01
Консервативна	1	1,5	2	1	2,5	5	6	4	5	6	0	0	0	0	0
Ланка	Варіант (6-10)														
	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
Підсилювальна	4,5	3	2,5	3	5										
Диференціальна реальна	2,5	3	3	6,5	4,5	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4					
Інтегруюча	1,5	2	5	1,8	7										
Аперіодична 1 порядку	4,5	12	7	4	10	12	7	10	8	11					
Коливальна	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	6	6	6	6	6	0,3	0,7	0,5	0,4	0,8
Аперіодична 2 порядку	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	6	6	6	6	6	1,2	1,3	1,07	1,02	1,03
Консервативна	1,5	3	2,5	1,5	3	6	7	5	6	7	0	0	0	0	0

Збурення – $x(t)=1,0$. Крок рахунку – 0,1.

2.5 Контрольні питання

1. Що таке типова ланка?
2. Властивості типових ланок.
3. Перерахуйте статичні й астатичні типові ланки, інерційні і безінерційні.
4. Запишіть рівняння руху кожної типової ланки.
5. Зобразити графік перехідної функції кожної типової ланки.
6. Отримати передаточну функцію кожної типової ланки за її рівнянням.
7. Визначити динамічні характеристики аперіодичної ланки 1-го порядку за графіком перехідного процесу.
8. Визначити динамічні характеристики аперіодичної ланки 2-го порядку за графіком перехідного процесу.
9. Визначити динамічні характеристики коливальної ланки за графіком перехідного процесу.
10. Визначити динамічні характеристики інтегруючої ланки за графіком перехідного процесу.
11. Визначити динамічні характеристики диференціальної ланки за графіком перехідного процесу.
12. Яка відзнака реальної та ідеальної ланки?
13. Як визначена точність апроксимації у роботі?
14. Навести приклади реалізації типових ланок.
15. Яка різниця між ідеальною та реальною ланкою?
16. Що таке статична модель, навести приклад.
17. Що таке динамічна модель навести приклад.
18. Що таке постійна часу, що вона характеризує?
19. Як провести процедуру апроксимації отриманих результатів?
20. Що таке коефіцієнт демпфірування, що він характеризує?
21. З математичного опису якої ланки можуть бути отримані інші динамічні ланки?
22. Чому об'єкти різної природи можуть бути описані однаковими динамічними ланками?
23. Навести приклади реалізації типових ланок.
24. Що таке одиничний ступінчатий вплив, його характеристики.
25. Що таке перехідна характеристика?
26. Чим відрізняється перехідна характеристика від кривої розгону?
27. Перелічити види перехідних характеристик.
28. Які типові впливи вам відомі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВИХ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК

Мета роботи – ознайомитися з методами експериментального і теоретичного одержання частотних характеристик, засвоїти методику експериментального одержання частотних характеристик ланок.

3.1 Поняття частотних характеристик

3.1.1 Загальні положення

При розв'язанні задач аналізу та синтезу необхідно оцінювати також властивості елементів та систем в частотній області, при різних частотах вхідних сигналів. Частотні характеристики – це реакція елемента чи системи на гармонійний сигнал при змінюванні частоти від 0 до ∞ . Вихідний сигнал відрізняється від вхідного амплітудою та фазою:

$$x = x_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.1)$$

Динамічні властивості досліджуваних елементів чи систем визначаються амплітудно-частотною $A(\omega)$, фазочастотною $\varphi(\omega)$ та амплітудно-фазовою характеристиками (рис. 3.1).

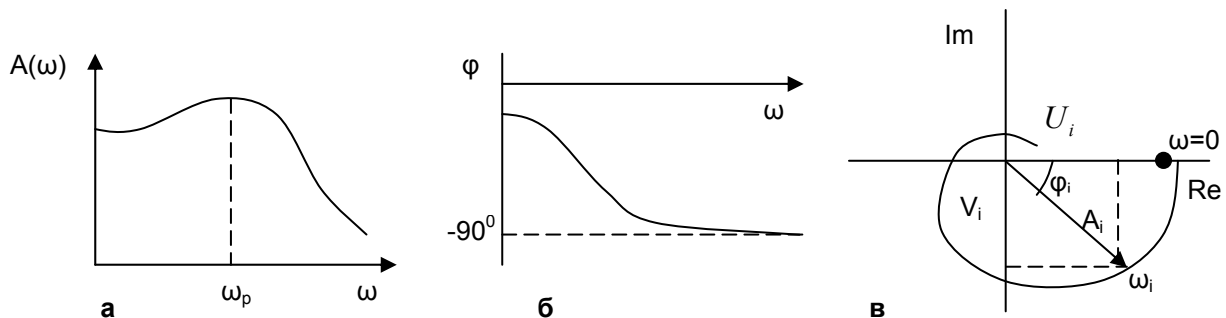


Рисунок 3.1 – Частотні характеристики: а – амплітудно-частотна (АЧХ); б – фазочастотна (ФЧХ); в – амплітудно-фазова (АФХ)

При збільшенні ω амплітудно-фазова характеристика $A(\omega) \rightarrow 0$, тобто проявляються інерційні властивості елемента та системи. Чим менша інерційність, тим ширша $A(\omega)$, тобто більша смуга (діапазон) пропускаємих частот. Часто існує резонансна частота, коли $A(\omega_p)$ має максимальне значення.

Фазочастотна характеристика $\varphi(\omega)$ від'ємна, тобто вихідні коливання відстають від вхідних за фазою.

На комплексній площі $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ об'єднуються в одну - амплітудно-фазову характеристику (АФХ) – рис. 3.1,в. Це крива (годограф), яку описує кінець вектора A при зміні частоти від 0 до ∞ . Проекції вектора на дійсну (Re) та уявну (Im) осі – дійсна $U(\omega)$ та уявна $V(\omega)$ частотні характеристики.

Важливою особливістю лінійних систем є те, що частота вхідних та усталених вихідних (після зникнення перехідної складової) сигналів співпадають. Крім того, якщо розглядати відношення амплітуд вихідного та вхідного сигналів, то при $\omega=0$ – це коефіцієнт передачі ($A(0)=K$).

3.1.2 Побудова частотних характеристик на комплексній площині

Частотну характеристику можна отримати підстановкою $p=j\omega$ в вираз для передаточної функції, в загальному вигляді:

$$W(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_0}. \quad (3.2)$$

Цей вираз називають частотною передаточною функцією, яку можна подати у вигляді:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (3.3)$$

де
$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (3.4)$$

$$U(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega), V(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega) \quad (3.5)$$

В загальному випадку виконують такі перетворення: записують вираз:

$$W(j\omega) = \frac{R(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{U_R(\omega) + jV_R(\omega)}{U_D(\omega) + jV_D(\omega)}, \quad (3.6)$$

після чого звільняються від уявності в знаменнику:

$$W(j\omega) = \frac{(U_R(\omega) + jV_R(\omega))(U_D(\omega) + jV_D(\omega))}{U_D^2(\omega) + jV_D^2(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega), \quad (3.7)$$

де
$$U(\omega) = \frac{U_R(\omega)U_D(\omega) + V_R(\omega)V_D(\omega)}{U_D^2(\omega) + jV_D^2(\omega)}, \quad (3.8)$$

$$V(\omega) = \frac{V_R(\omega)U_D(\omega) - U_R(\omega)V_D(\omega)}{U_D^2(\omega) + jV_D^2(\omega)}. \quad (3.9)$$

3.1.3 Особливості логарифмічних частотних характеристик

В практичних розрахунках користуються також логарифмічними частотними характеристиками, побудованими в логарифмічних координатах, тому їх можна замінити ломаними лініями, складеними з кількох прямолінійних відрізків. Крім того, в логарифмічних координатах легко знаходити характеристики різних з'єднань елементів: операціям множення і ділення відповідають додавання та віднімання ординат логарифмічних характеристик, наприклад:

$$A = \prod_{i=1}^n A_i; \quad \lg A = \sum_{i=1}^n \lg A_i, \quad (3.10)$$

Амплітудно-фазові характеристики будуються в координатах $20 \lg A = f(\lg \omega)$, фазочастотні – $\varphi = f(\lg \omega)$. Одиницею довжини по осі частот є декада – інтервал частот між ω_i та $10\omega_i$. Ординати логарифмічної амплітудно-частотної характеристики $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$ вимірюють в логарифмічних одиницях – белах (Б) або децибелах (дБ), що відповідає відношенню потужностей двох сигналів: якщо потужність одного сигналу більша (або менша) іншого в 10 разів, тоді потужності відрізняються на 1Б ($\lg 10=1$). Потужність гармонійного сигналу пропорційна квадрату його амплітуди, тому при вимірюванні відношення амплітуд перед логарифмом необхідно враховувати множник 2. Наприклад, на деякій частоті $A(\omega) = 100$, що означає різницю вхідного і вихідного сигналів в 100^2 разів, тобто $2 \cdot \lg 100 = 4Б$ (40 дБ), а $L(\omega) = 20 \cdot \lg A(\omega) = 40$ дБ.

За видом частотних характеристик всі елементи і системи поділяються на дві групи: мінімально-фазові і немінімально-фазові. Мінімально-фазовими називають такі елементи і системи, для яких всі нулі та полюси передаточної функції $W(p)$ мають від'ємні дійсні частини та фазовий зсув $\varphi(\omega)$ є мінімальним в порівнянні з іншими елементами, які мають таку ж амплітудно-частотну характеристику $A(\omega)$, але хоча б один полюс чи нуль у них має додатну частину. Для мінімально-фазових елементів і систем достатньо знати $A(\omega)$, $U(\omega)$ і $V(\omega)$ для повної оцінки їх характеристик.

3.1.4 Частотні характеристики аперіодичної ланки другого порядку

Замінюючи (p) на $(j\omega)$ для аперіодичної ланки другого порядку одержимо вираз амплітудно-фазової характеристики:

$$W(j\omega) = \frac{k_4}{(jT_1\omega + 1)(jT_2\omega + 1)}, \quad (3.11)$$

відкіля попереднім засобом отримуємо амплітудну частотну характеристику:

$$A(\omega) = \frac{k_4}{\left(\sqrt{T_1^2\omega^2 + 1}\right)\left(\sqrt{T_2^2\omega^2 + 1}\right)} \quad (3.12)$$

і фазову частотну характеристику:

$$\varphi(\omega) = -\arctg(T_1\omega) - \arctg(T_2\omega). \quad (3.)$$

Частотні характеристики цієї ланки наведені на рис. 3.2–3.4.

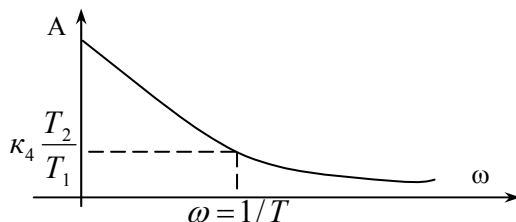


Рисунок 3.2 – АЧХ аперіодичної ланки 2-го порядку

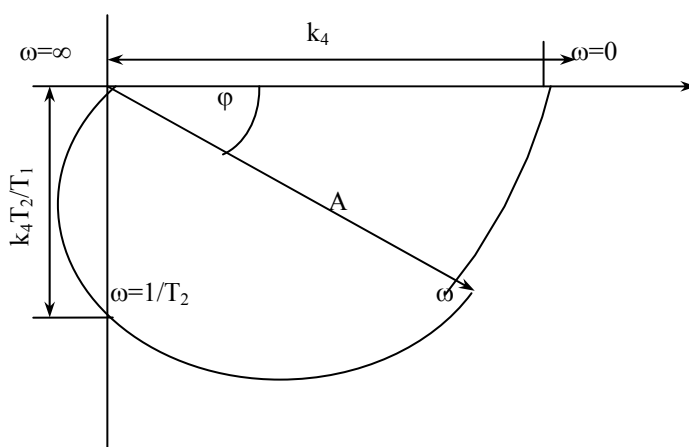


Рисунок 3.3 – АФЧХ аперіодичної ланки 2-го порядку

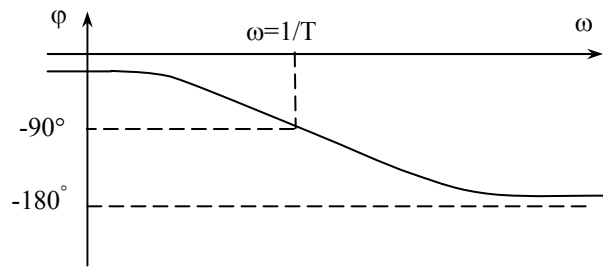


Рисунок 3.4 – ФЧХ аперіодичної ланки 2-го порядку

3.2 Використання пакета MATLAB для побудови частотних характеристик

У пакеті Matlab ЛЧХ об'єкта, заданого за допомогою ПФ, можна одержати за допомогою команди bode:

```
>> w=tf([1 2],[3 4 5])
>> bode(w)
```

Для декількох варіантів передатної функції можна використати варіант команди виду:

```
>> bode(w,w1,w2)
```

Побудуємо діаграму Бодє при різних параметрах коливальної ланки (рис. 3.4):

```
>> w=tf([1],[2 0.3 1]);
>> w1=tf([1],[2 0.5 1]);
>> w2=tf([1],[2 0.1 1]);
>> bode(w,w1,w2)
```

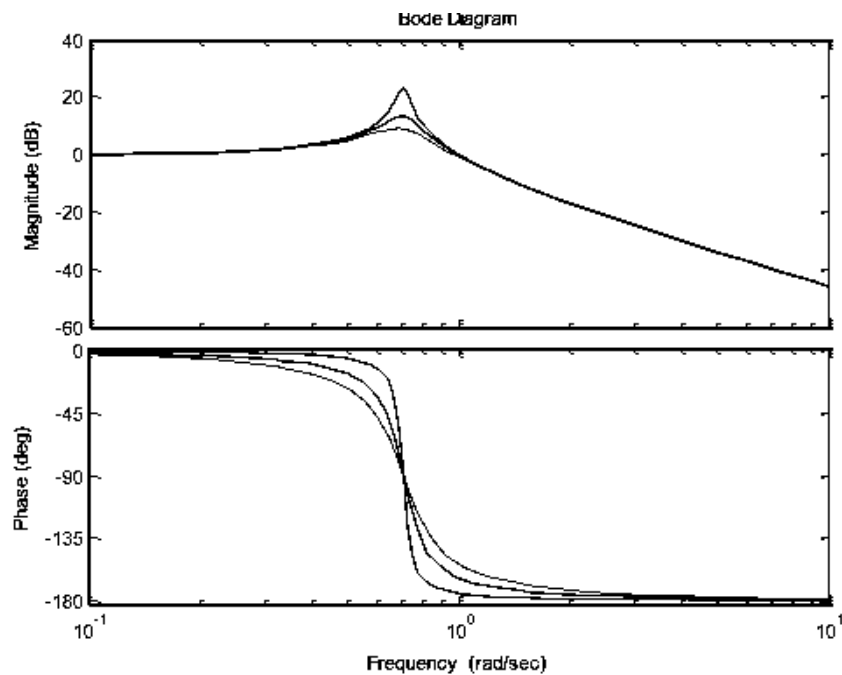


Рисунок 3.4 – Логарифмічні частотні характеристики коливальної ланки

3.3 Порядок проведення роботи

3.3.1 Побудувати частотні характеристики (амплітудну та фазову) двох типових ланок (аперіодичної та коливальної), використовуючи для цього гармонічний вхідний сигнал з амплітудою $A_{\text{вх}}=1$ та частотою $\omega_i : 0,05/T; 0,1/T; 0,2/T; 1/T; 5/T; 10/T; 20/T$, де ω_i – кругова частота, рад/с; T – постійна часу ланки, с. Схема моделювання наведена на рис. 3.5.

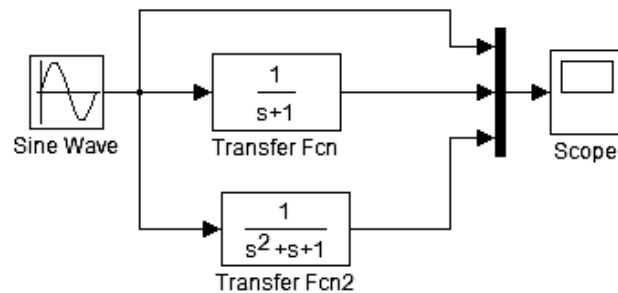


Рисунок 3.5 – Схема для визначення частотних характеристик

3.3.2 Для прийнятого діапазону частот визначається реакція ланки на коливальний вхідний вплив та визначається відношення амплітуд вихідного ($A_{\text{вих}}$) та вхідного ($A_{\text{вх}}$) сигналів а також часовий зсув в секундах між вхідними та вихідними сигналами (Δt_i).

Значення АЧХ на частоті (ω_i) знаходиться:

$$A(\omega_i) = \frac{A_{\text{вих } i}}{A_{\text{вх } i}}.$$

Значення ФЧХ в радіанах розраховується:

$$\phi(\omega_i) = \Delta t_i \omega_i$$

або в градусах:

$$\phi(\omega_i) = \frac{180}{\pi} \Delta t_i \omega_i.$$

Отримавши таким чином ряд значень АЧХ та ФЧХ, можливо по точках їх побудувати. Для побудови логарифмічних частотних характеристик необхідно скористатись формулою:

$$L(\omega_i) = 20Lg(A(\omega_i)).$$

3.3.3 Вимірювання $A_{\text{вх } i}$ та Δt_i проводити по завершенню перехідних процесів, що пов'язані з подачею на вхід гармонічного сигналу, як показано на рис. 3.6.

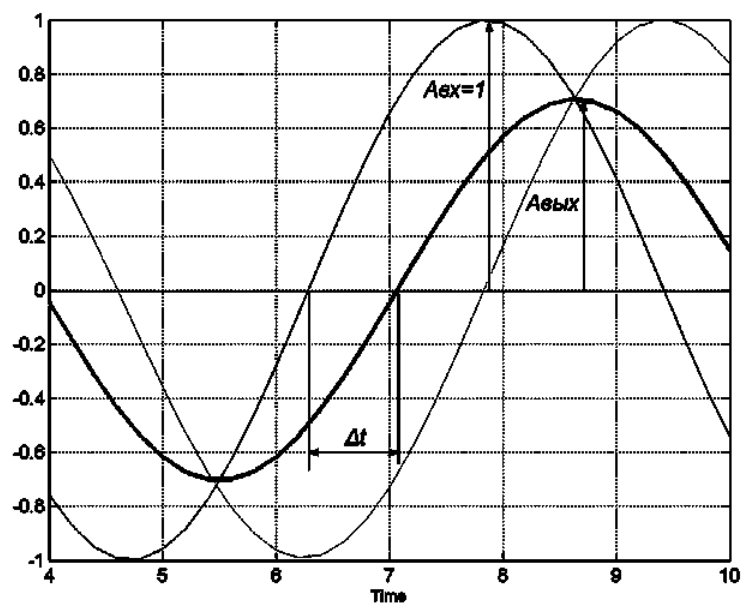


Рисунок 3.6 – Приклад визначення $A_{\text{вих } i}$ та Δt_i

Для цього час розрахунку необхідно вибрати достатньо великим (орієнтовно більше ніж постійна часу), а на екрані вивести останню ділянку процесу довжиною 1,5-2 періоди синусоїди.

3.3.4 Варіант індивідуального завдання представлено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Вихідні данні до розрахунку частотних характеристик

Номер варіанту	κ	$T, \text{с}$	ξ
1	1,5	1	0,3
2	2	0,9	0,4
3	2,5	0,8	0,5
4	3	0,7	0,6
5	3,5	0,6	0,3
6	4	0,5	0,4
7	4,5	0,4	0,5
8	5	0,3	0,6
9	5,5	0,2	0,4
10	6	0,1	0,5

3.3.5 Результати дослідження необхідно представити у табл. 3.2

Таблиця 3.2

Результати дослідження частотних характеристик

ω_i , рад/с	$A(\omega_i)$	$t_{вх\ i}$, с	$t_{вих\ i}$, с	Δt_i , с	$\varphi(\omega_i)$, рад	$L(\omega_i)$, дБ
Аперіодична ланка						
0,05/T						
0,1/T						
0,2/T						
1/T						
5/T						
10/T						
20/T						
Коливальна ланка						
0,05/T						
0,1/T						
0,2/T						
1/T						
5/T						
10/T						
20/T						

3.4 Контрольні питання

1. Що характеризує АФХ(АФЧХ)?
2. Надати визначення поняття передаточної функції.
3. Як отримати вираз частотної передаточної функції?
4. Що таке годограф вектору?
5. Охарактеризувати поняття комплексної площини.
6. Чому АФХ будують в обмеженому діапазоні частот?
7. Записати вираз для побудови АФХ в полярній системі координат.
8. Записати вираз для побудови АФХ в декартовій системі координат.
9. Графічне представлення АФХ в полярній системі координат.
10. Графічне представлення АФХ в декартовій системі координат.
11. Як визначити запас стійкості по амплітуді/фазі за логарифмічними частотними характеристиками?
12. Обґрунтувати можливість представлення передаточної функції на комплексній площині в якості вектору.
13. Як змінюється характеристика на виході ланки при подачі на вхід синусоїдального впливу?
14. Що характеризує зміна амплітуди вихідного-вхідного сигналу при подачі на вхід ланки синусоїдального впливу?
15. Що характеризує зміна фази вихідного-вхідного сигналу при подачі на вхід ланки синусоїдального впливу?
16. Методика експериментального визначення частотних характеристик.
17. Як отримати логарифмічні частотні характеристики?
18. Які переваги використання логарифмічних частотних характеристик?
19. Чому дослідження були проведені для сталого режиму?
20. Навести основні розрахункові формули у роботі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: Курс лекцій для студентів напряму 0925 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології ден. та заочн. форм навчання – (частина перша) [Текст] / А.П. Ладанюк. – К.: НУХТ, 2004. – 174 с.
2. Юревич Е.И. Теория автоматического управления [Текст] / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
3. Теорія автоматичного керування. Методичні вказівки до комп’ютерного практикуму для студентів напряму 6.050504 «Зварювання», спеціальності 7(8).05050402 – «Зварювальні установки» / Уклад.: І.О. Скачков, А.Є. Пірумов, 2012. – 59 с.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления [Текст] / В.Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
5. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем [Текст] / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1986. – 309 с.
6. Классические методы автоматического управления [Текст] / под ред. А.А. Ланнэ. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 640 с.
7. Никулин, А.Е. Основы теории автоматического управления [Текст] / А.Е. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
8. Попович, М.Г. Теорія автоматичного керування [Текст] : підручник / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
9. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления [Текст] / под ред. В.А. Бессекерского. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
10. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования [Текст] / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 535 с.
11. Солодовников, В.В. Теория автоматического регулирования техническими системами [Текст] : учеб. пособие / В.В. Солодовников, А.В. Яковлев. – М.: Издат-во МГТУ, 1993. – 492 с.
12. Шаруда, В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління [Текст] : навч. Посібник / В.Г. Шаруда. – Дніпропетровськ: Національна гірнича академія України, 2002. – 414с., іл.133.