

## ЛЕКЦІЯ 8

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩІ MatLab&Simulink

До складу системи MatLab входить Toolbox (пакет) моделювання динамічних систем Simulink. Він є ядром інтерактивного програмного комплексу, призначеного для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем та пристроїв, поданих своєю функціональною блок-схемою – *S-моделлю*. У певному сенсі, Simulink можна розглядати як самостійний продукт фірми MathWorks, проте він працює тільки за наявності ядра MatLab і використовує багато функцій, що входять до його складу.

Simulink є інструментом, за допомогою якого можна об'єднувати блоки, що відповідають окремим елементам динамічної системи в єдине ціле і вивчати їх поведінку в часі. Розробка моделей засобами Simulink (S-моделей) ґрунтується на технології drag-and-drop («перетягни і залиш»). Для побудови S-моделі використовуються модулі (або блоки), які зберігаються у бібліотеці Simulink.

Переваги Simulink полягають в тому, що, з одного боку, він забезпечує користувачеві доступ до всіх основних можливостей пакету MatLab, а з іншого, є досить самостійною його компонентою в тому сенсі, що при роботі з ним не обов'язково мати навички у використанні інших інструментів, що входять до складу MatLab.

Блоки, з яких складається створювана модель, можуть бути пов'язані один з одним як за інформацією, так і за керуванням. Вид зв'язку залежить від типу блоку і логіки роботи моделі. Дані, якими обмінюються блоки, можуть бути скалярними величинами, векторами або матрицями довільної розмірності.

Будь-яка S-модель може мати ієрархічну структуру, тобто складатися з моделей нижчого рівня, причому число рівнів ієрархії практично не обмежена. Разом з іншими параметрами моделювання користувач може задавати спосіб зміни модельного часу (з постійним або змінним кроком), а також умови закінчення моделювання.

В ході моделювання є можливість спостерігати за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні «оглядові вікна», що входять до

складу бібліотеки Simulink. Необхідні користувачеві характеристики можуть бути представлені як у числовій, так і в графічній формі.

Застосування принципів структурного і модульного програмування дозволяє представляти різні алгоритми у вигляді набору уніфікованих програмних модулів, що покращує наочність програми, полегшує її налагодження і зрештою зменшує загальний обсяг програмного забезпечення, що підлягає розробці. Крім цього, склад бібліотеки Simulink може бути поповнений користувачем за рахунок розробки власних блоків.

Після інсталяції Simulink автоматично інтегрується з системою MatLab. Про це свідчить наявність кнопки Simulink на вкладці HOME. При її натисканні відкривається стартова сторінка Simulink (рис. 8.1), на якій наведені розділи Blank Model, Blank Library, Blank Project та ін. Потрапити на стартову сторінку Simulink також можна, послідовно натиснувши на New ⇒ Simulink Model.

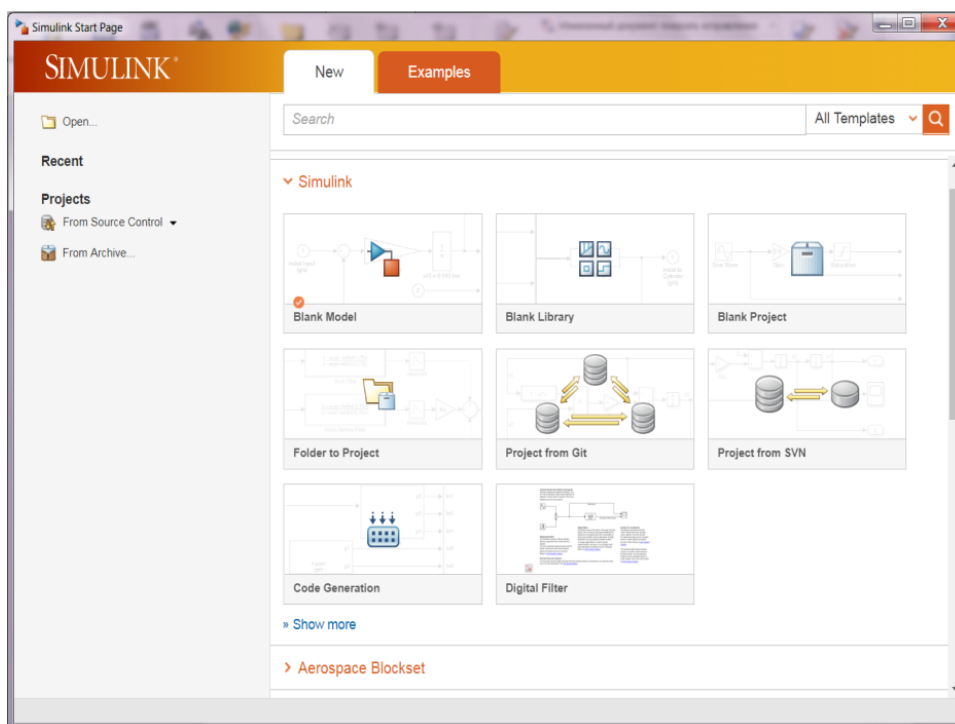


Рисунок 8.1 – Стартова сторінка Simulink

Щоб почати створення блок-схеми системи, що моделюється, необхідно на стартовій сторінці натиснути на Blank Model. Після цього на екрані з'явиться нове (чисте) вікно створення/редагування моделі untitled, в якому і здійснюватиметься складання S-моделі (mdl-файлу) (рис.8.2,а). Складання блок-схеми S-моделі полягає в тому, що графічні зображення вибраних блоків мишею перетягуються з вікна розділу бібліотеки до вікна блок-схеми, а потім виходить одних блоків у вікні блок-схеми

з'єднуються із входами інших блоків. З'єднання блоків виконується так: вказівник миші підводять до відповідного виходу потрібного блоку (при цьому вказівник повинен набути форми хрестика), натискають ліву кнопку та, не відпускаючи її, переміщують вказівник до потрібного входу іншого блоку, потім відпускають кнопку. Якщо з'єднання зроблено вірно, на вході останнього блоку з'явиться зображення чорної стрілки.

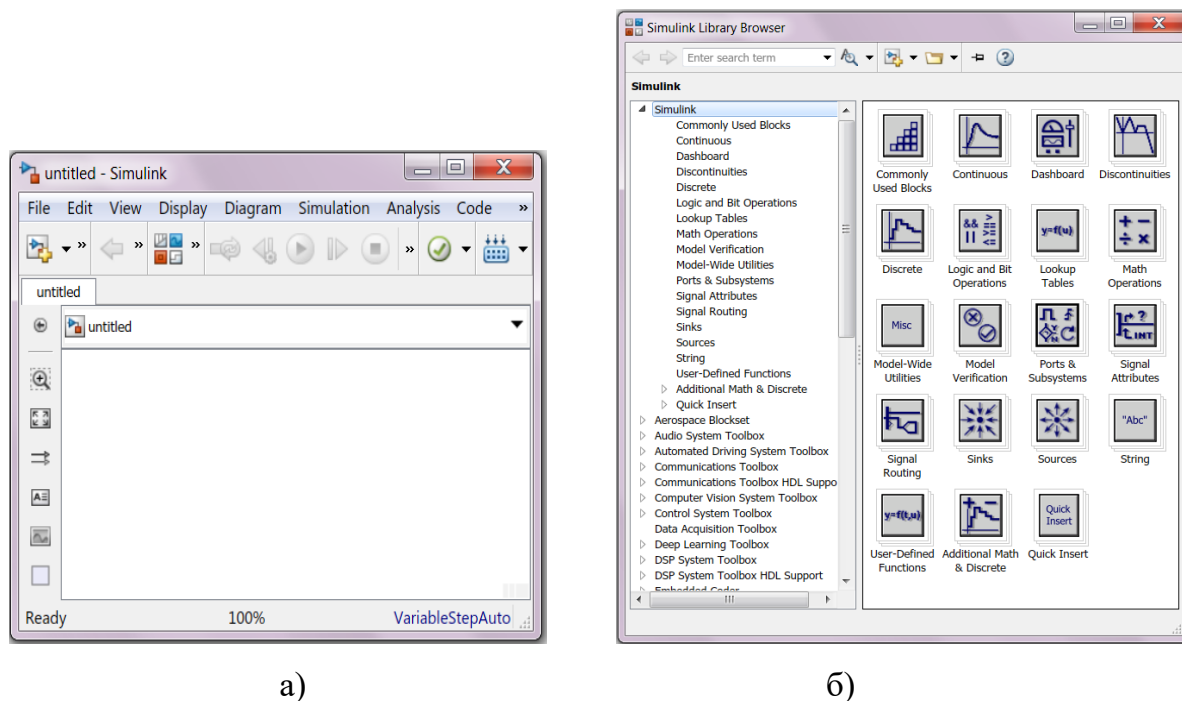


Рисунок 8.2: а – вікно збирання S-моделі; б – вікно браузера бібліотеки Simulink

У верхній частині вікна створення/редагування S-моделі на панелі інструментів розміщена кнопка активації інтегрованого браузера бібліотеки Library Browser (рис.8.2,б). У лівій половині вікна браузера наведений перелік бібліотек Simulink, а у правій – зображення та назви блоків відповідного розділу. Ядром Simulink є бібліотека, вказана у першому рядку браузера.

Розглянемо типові розв'язуючі елементи, структурні схеми поширених систем базисних функцій, основні блоки, що реалізують методи моделювання динамічних систем. Опис блоків та приклади наведені для MatLab&Simulink версії R2018b.

## 8.1 Розв'язуючі елементи

**Бібліотека Sources (джерела).** Блоки цієї бібліотеки (рис.8.3) призначені для формування сигналів, які при моделюванні забезпечують роботу S-моделі в цілому та окремих її частин. Всі блоки-джерела мають по одному виходу і не мають входів.

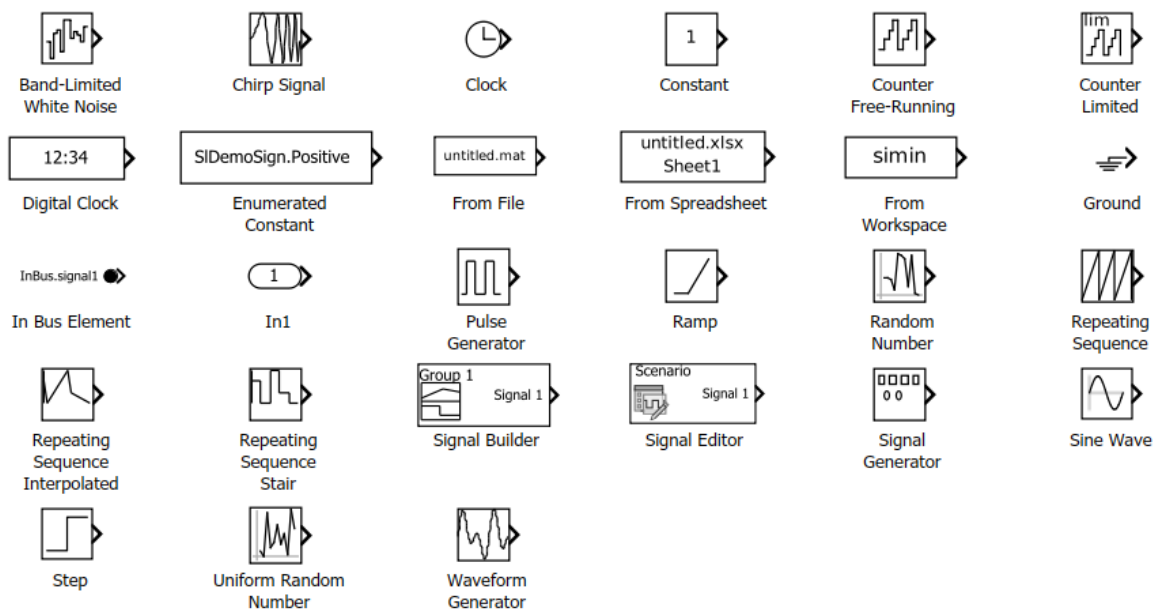


Рисунок 8.3 – Блоки розділу Sources

Constant генерує процеси, що є незмінними у часі, тобто характеризуються постійним значенням. Він формує сталу величину (скаляр, вектор або матрицю).

From Workspace – блок зчитування в S-модель даних безпосередньо з робочого простору MatLab.

From File – блок зчитування в S-модель даних з MAT-файлу на диску.

Sine Wave формує синусоїдальний сигнал із заданою частотою, амплітудою, фазою та зміщенням.

Signal Generator генерує неперервний коливальний сигнал одної з хвильових форм (синусоїдальної, прямокутної, трикутної) або випадковий сигнал.

Ramp формує лінійно висхідний або спадний сигнал.

Step формує східчастий сигнал із заданими параметрами (час початку сходінки та її висота).

Random Number формує дискретний сигнал, значення якого є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом.

**Бібліотека Sinks (приймачі).** Блоки цієї бібліотеки (рис.8.4) дозволяють візуалізувати отримані при моделюванні результати та проконтролювати вірність роботи того чи іншого блоку й модельованої системи в цілому. Всі блоки-приймачі мають лише входи та не мають виходів.

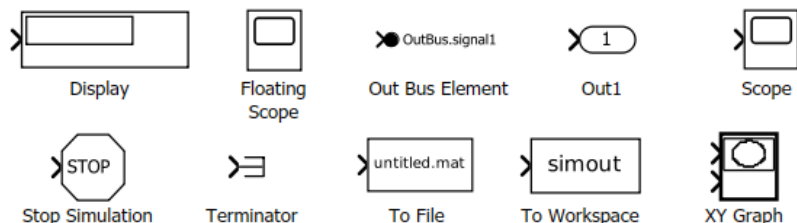


Рисунок 8.4 – Блоки розділу Sinks

**Display** (цифровий дисплей) – блок з єдиним входом, призначений для відображення числових значень вхідної величини.

**Scope** (віртуальний осцилограф) – блок з єдиним входом, що використовується для виводу в графічне вікно графіку залежності величини, поданої на його вхід, від модельного часу.

**XY Graph** (віртуальний плоттер) – блок з двома входами, що будує графік залежності одної модельованої величини (нижній вхід) від другої (верхній вхід) – графік виду  $Y(X)$ .

**To File** – блок, що забезпечує зберігання результатів моделювання на диску в MAT-файлі (\*.mat) для подальшого їх використання в інших S-моделях.

**To Workspace** – блок, що зберігає результати, які надходять на його вхід, у робочому просторі MatLab.

**Бібліотека Math Operations (математичні операції).** Блоки цієї бібліотеки (рис.8.5) реалізують вбудовані математичні функції системи MatLab.

**Gain** є лінійною підсилюючою ланкою (помножує вхідний сигнал на задану сталу величину або вектор).

**Product** виконує множення або ділення декількох вхідних сигналів.

**Add** підсумовує сигнали, що надходять на нього.

**Sum** може використовуватися у двох режимах: підсумовування вхідних сигналів (в тому числі з різними знаками) та підсумовування елементів вектору, що потрапляє на його вхід.

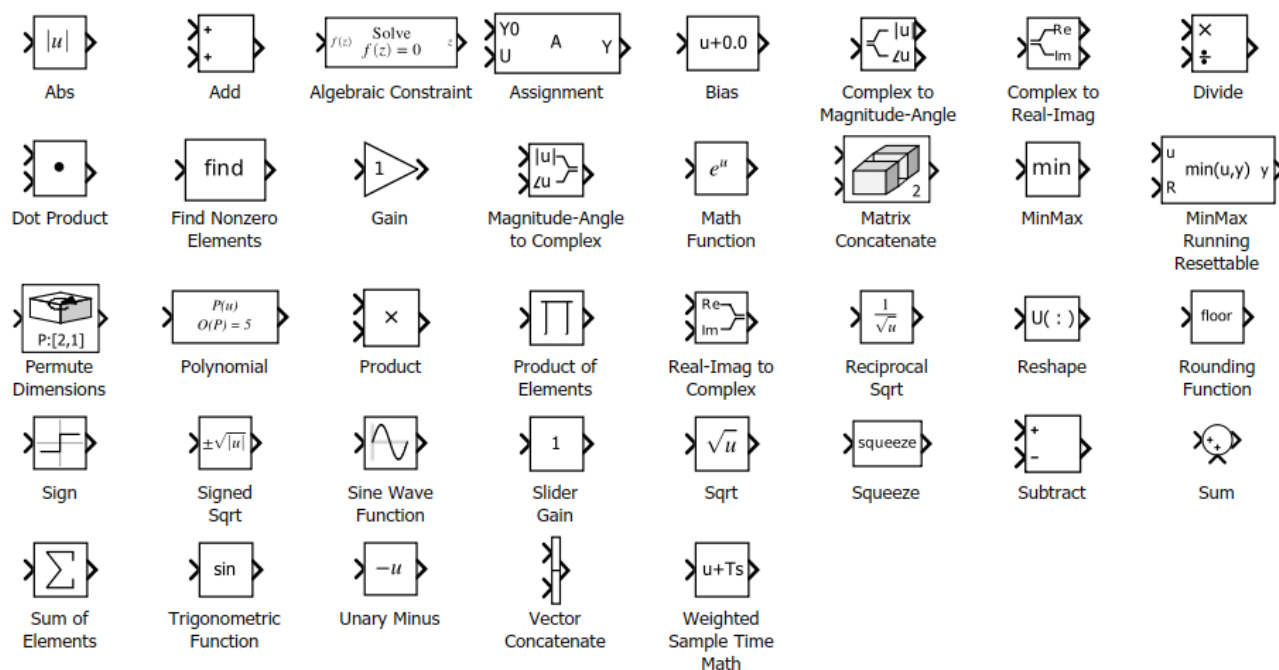


Рисунок 8.5 – Блоки розділу Math Operations

Algebraic Constraint використовується для розв’язання алгебраїчного рівняння.

Math Function перетворює вхідний сигнал за заданою зі списку функцією (наприклад, піднесення до квадрату, логарифм тощо).

Trigonometric Function перетворює вхідний сигнал за заданою зі списку тригонометричною функцією.

Abs формує абсолютне значення вектору вхідного сигналу.

MinMax здійснює пошук мінімального або максимального елементу вхідного вектору.

Наведемо ще деякі блоки, що часто використовуються, наприклад (рис.8.6):



Рисунок 8.6 – Приклади блоків, що часто використовуються

Mux (мультиплексор) – блок з бібліотеки Commonly Used Blocs, який об’єднує вхідні сигнали (як скалярні, так і векторні) в єдиний вихідний вектор (шину).

Integrator – блок з бібліотек Commonly Used Blocs і Continuous – ідеальна інтегруюча ланка (інтегратор), інтегрує вхідний сигнал.

Fcn – блок з бібліотеки User-Defined Functions, що формує функцію, задану користувачем на мові MatLab. Користувач може ввести будь-яку скалярну функцію від одного (скалярного або векторного) аргументу, що виражається через стандартні функції системи MatLab.

*Загальний алгоритм побудови S-моделі* полягає у наступному:

- 1) Після завантаження системи MatLab відкрити додаток Simulink.
- 2) У вікні Simulink Library Browser мишею вибрати File→New→Model, або символ нового файлу, або натиснути клавіші Ctrl+N. В результаті на екрані з'явиться зображення робочої області untitled, в якій необхідно конструювати структурну схему моделі задачі. Ця робоча область може бути збережена у файлі з ім'ям, що обирається користувачем.
- 3) Перенести мишею в робочу область необхідні розв'язуючі елементи, джерела сигналів і віртуальні вимірювальні прилади з бібліотеки Simulink у відкритому вікні Simulink Library Browser.
- 4) Скопіювати в необхідній кількості елементи, які зустрічаються більше одного разу, і розмістити їх в робочій області untitled таким чином, щоб їх було зручно з'єднувати віртуальними провідниками. Оптимальне розміщення елементів є досить непростим завданням і залежить від досвіду і вміння дослідника.
- 5) У разі необхідності можна змінити просторову орієнтацію блоків. Для цього необхідно розмістити курсор миші над зображенням блоку, виділити його одноразовим натисканням лівої клавіші миші й вибрати мишею команду Format→Rotate Block, або одночасним натисканням клавіш Ctrl+R. Одна команда повертає блок на 90 градусів.
- 6) З'єднати блоки між собою згідно зі структурною схемою розв'язуваної задачі (сформувати структурну схему моделі) за допомогою миші.
- 7) Встановити необхідні параметри розв'язуючих елементів та інших блоків, що входять до структурної схеми моделі, за допомогою вікна параметрів блоку, виклик якого здійснюється шляхом дворазового натискання на ліву кнопку миші, коли курсор знаходиться в межах зображення блоку.
- 8) У вікні Simulation рядка меню робочої області вибрати команду Run. Запуск процесу моделювання можна також здійснити одночасним натисканням клавіш CTRL+T.

## 8.2 Побудова S-моделей

Приклад 8.1. Розглянемо задачу моделювання роботи ідеального обмежувача, на вхід якого подається синусоїдальна напруга з амплітудою 10 В і частотою 100 рад/с. Нехай пороги обмеження складають +5 В і -5 В. В даному випадку основними блоками будуть генератор синусоїдальних сигналів і нелінійність, що моделює передатну характеристику обмежувача. Крім того, до цих блоків потрібно додати реєструючий блок – осцилограф. Далі реалізуємо функціональну схему модельованого пристрою.

Створення моделі, як було сказано вище, починається з активізації кнопки Simulink на панелі інструментів вікна MatLab та відкриття вікна untitled (рис.8.2,а).

Наступний етап – вибір джерела сигналу. Активізувавши мишею трикутник зі перед змістом основної бібліотеки Simulink, можна відкрити гілку з цим розділом. В ньому потрібно аналогічно відкрити підрозділ джерел Sources. Потім, активізувавши в ньому компонент Sine Wave (синусоїдальне джерело), мишею (при натиснутій лівій кнопці) перетягти його до вікна untitled. Якщо затримати на піктограмі компоненту вказівник миші, з'явиться спливаюча підказка, в якій будуть вказані параметри компоненту за замовчуванням. Доцільно одразу встановити потрібні параметри джерела синусоїдального сигналу. Для цього двічі клацніть на тільки-но введений блок. З'явиться вікно установки параметрів синусоїдального сигналу Block Parameters: Sine Wave (рис.8.7). Потрібно встановити задану амплітуду 10 В і частоту 100 рад/с. Інші параметри – фазу і час затримки – можна залишити нульовими. Для збереження заданих параметрів натисніть кнопки Apply та OK.

Далі обираємо розділ Commonly Used Blocks. У з'явившомуся вікні цих елементів потрібно обрати блок Saturation (обмеження) та перетягти його у потрібне місце вікна моделі, розмістивши праворуч від джерела синусоїдального сигналу. Встановивши вказівник миші на блок обмеження і двічі клацнувши її лівою кнопкою, виводимо вікно установки параметрів обмежувача Block Parameters: Saturation (рис.8.8). В цьому вікні потрібно встановити верхній (5 В) і нижній (-5 В) поріг обмеження.

Блок осцилографа Scope обираємо з розділу реєструючих компонентів Sinks і з'єднуємо введені блоки між собою (рис.8.9). Для цього, встановивши вказівник миші на вихід джерела і натиснувши ліву кнопку миші, потрібно добитися того, щоб вказівник перетворився на хрестик з тонких ліній. (Це означає, що редактор блок-схем



готовий до проведення відрізка сполучної лінії.) Відрізок лінії проводиться при натиснутій лівій кнопці миші переміщенням вказівника до точки входу блока нелінійності. Відпустивши ліву кнопку миші, отримаємо сполучну лінію між блоками. Аналогічно з'єднуємо вихід блоку обмежувача із входом блоку осцилографа. На цьому підготовка моделі заданої задачі закінчується.

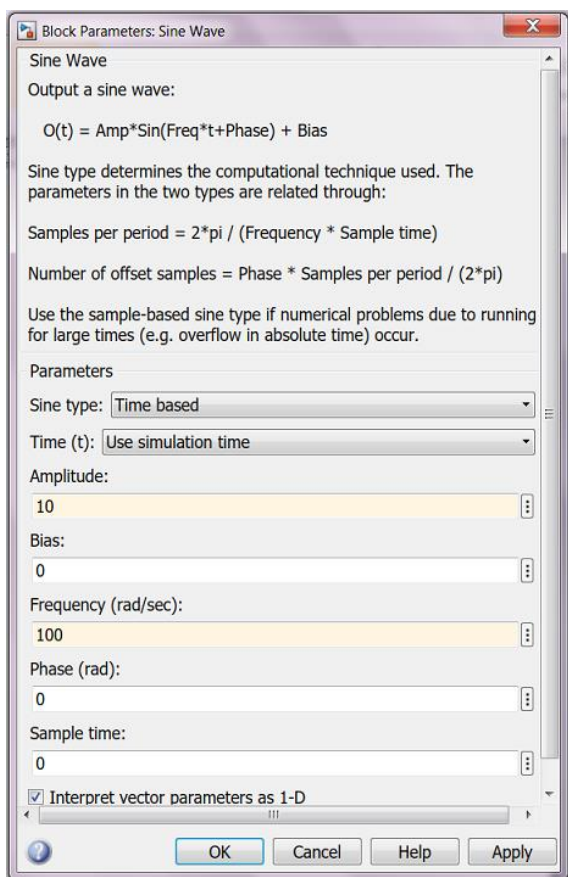


Рисунок 8.7 – Установка параметрів вхідного сигналу

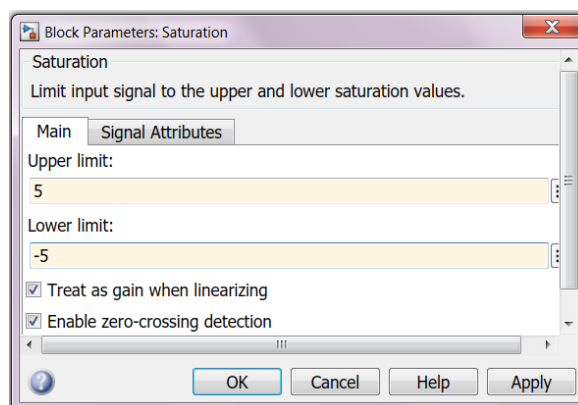


Рисунок 8.8 – Установка параметрів обмежувача

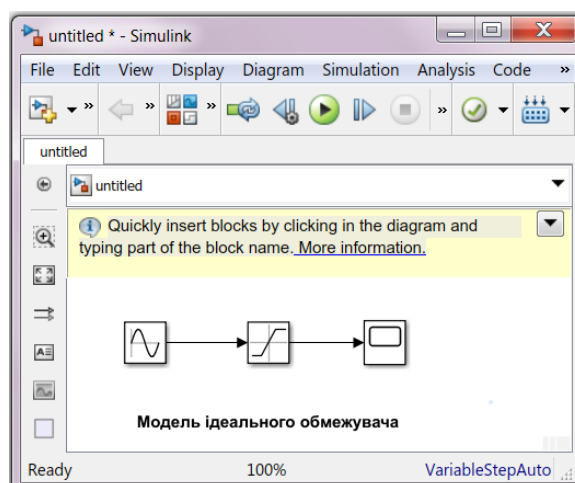


Рисунок 8.9 – Готова модель

Однак, корисно виконати ще одну дію – розмістити під моделлю пояснення. Для цього потрібно встановити вказівник миші на вільне місце вікна моделі та двічі клацнути лівою кнопкою. Повинне з'явитися прямокутне вікно з курсором вводу. Надпис вводиться за допомогою засобів рядкового редагування. Після завершення введення надпису потрібно натиснути Enter. Блок з надписом потім можна виділити й перетягти у потрібне місце – під блок-схему створеної моделі (рис.8.9).

Наступний етап моделювання – *запуск моделі*. Можна виконати його одразу, але скоріше за все отриманий результат виявиться невдалим. Та ж картина спостерігається

на практиці, коли до маловідомого досліджуваного пристрою вперше підключається осцилограф. *Потрібне деяке попереднє налаштування моделі та осцилографа*, зокрема, вибір часового інтервалу, установка масштабу реєстрованої величини та ін. За замовчуванням, інтервал часу дорівнює 1 с, що занадто багато для обраної частоти сигналу 100 рад/с.

Для налаштування запуску моделі потрібно виконати команду Model Configuration Parameters меню Simulation пакету Simulink. У з'явившомуся вікні (рис.8.10) на вкладці Solver потрібно уточнити часовий інтервал моделювання, наприклад, зробивши його рівним 0.2 с. Можна обрати метод зміни незалежної змінної і метод розв'язання ДР при моделюванні, похибки обчислень та ін. Однак, як правило, цілком задовільними є установки цих параметрів за замовчуванням.

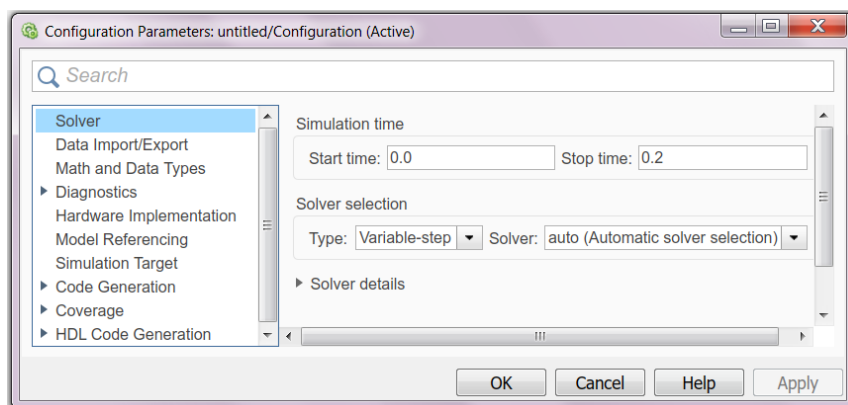


Рисунок 8.10 – Установка параметрів запуску моделі

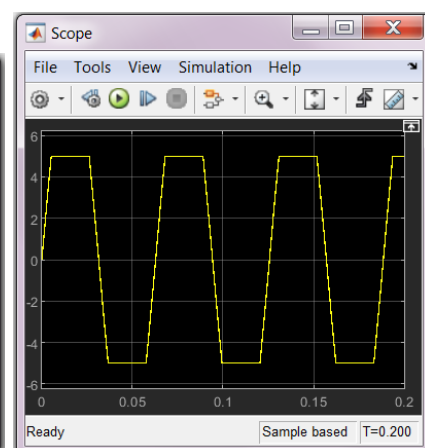


Рисунок 8.11 – Результат моделювання

Тепер можна запустити модель. Для цього потрібно натиснути кнопку пуску (трикутник) на панелі інструментів або виконати команду Run в меню Simulation. По закінченні процесу моделювання (для даної схеми він займає доли секунди) активізація об'єкта-осцилографа (двічі натиснути ліву кнопку миші) виводить вікно, що нагадує екран реального осцилографа, в якому наведений результат моделювання (рис.8.11).

Якщо на екрані осцилографа спостерігається щось незрозуміле, це означає, що він не налагоджений. Можна задати налагодження, натиснувши кнопку Configuration Parameters панелі інструментів блоку осцилографа.

В результаті моделювання отримана синусоїда з обрізаними на рівні 5 В вершинами. При цьому результат отриманий дуже швидко (див. дані в рядку стану вікна моделі – час моделювання  $T=0.2$ ).

Щоб зберегти створену модель для подальшого застосування, показу або модернізації, використовується команда Save або Save As меню File вікна редактора моделей. Модель записується у вигляді mdl-файлу.

Приклад 8.2. Побудуємо модель сигналу виду  $x(t) = 0.5 \sin \pi t + t^2$  на інтервалі  $[0;2]$  та виведемо його на віртуальний осцилограф. На рис.8.12 наведений один з варіантів побудови сигналу.

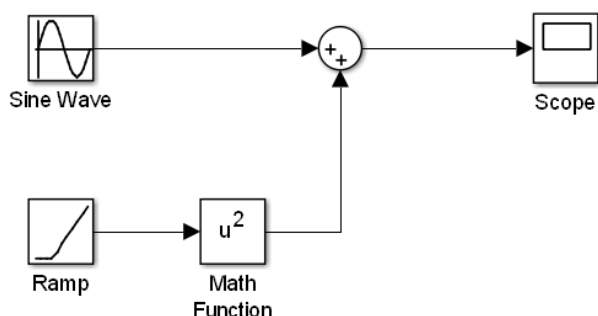


Рисунок 8.12 – Модель сигналу  $x(t) = 0.5 \sin \pi t + t^2$

Сигнал  $0.5 \sin \pi t$  заданий у параметрах блоку Sine Wave (рис.8.13). Для сигналу  $t^2$  використовувалися два блоки – блок лінійного сигналу Ramp та блок математичної функції Math Function, де була обрана функція піднесення до квадрату (рис.8.14). Результати роботи виведені на екран віртуального осцилографу Scope (рис.8.15). Інтервал моделювання встановлений в межах від 0 до 2 у вікні меню Simulation/Configuration Parameters.

### 8.2.1 Моделі алгебраїчних об'єктів

В аналоговій обчислювальній техніці існує кілька способів моделювання об'єктів, описуваних системами алгебраїчних рівнянь. Один з них, найбільш поширений, зводиться до розв'язання системи ЗДР, сталий розв'язок якої дає розв'язок алгебраїчної задачі.

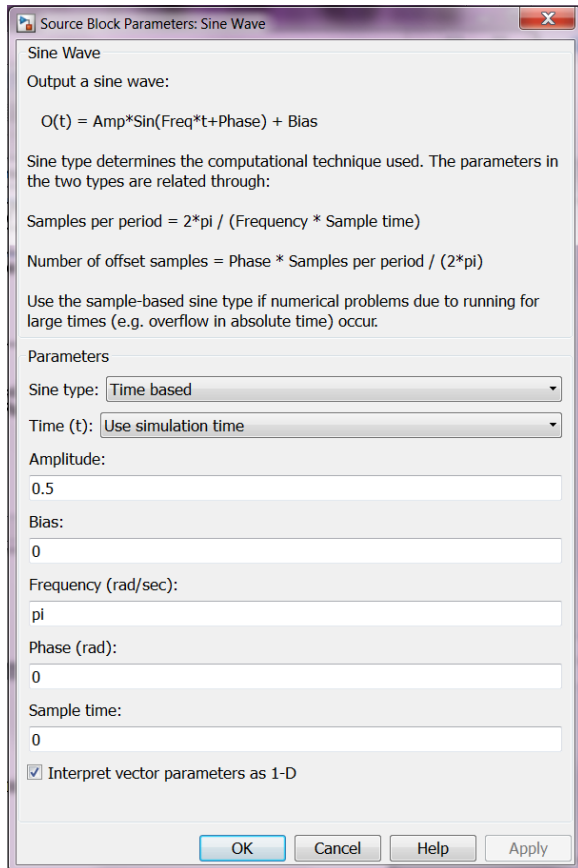


Рисунок 8.13 – Параметри блоку Sine Wave

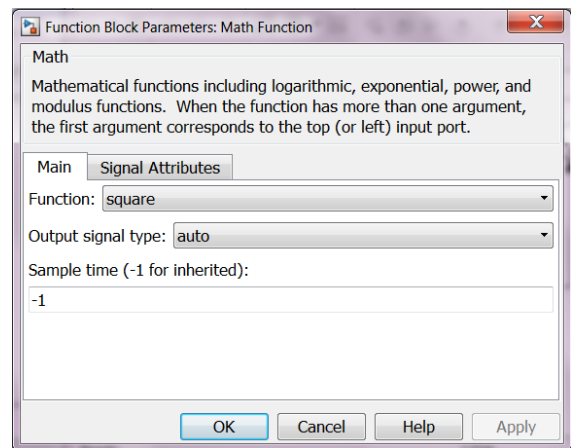


Рисунок 8.14 – Параметри блоку Math Function

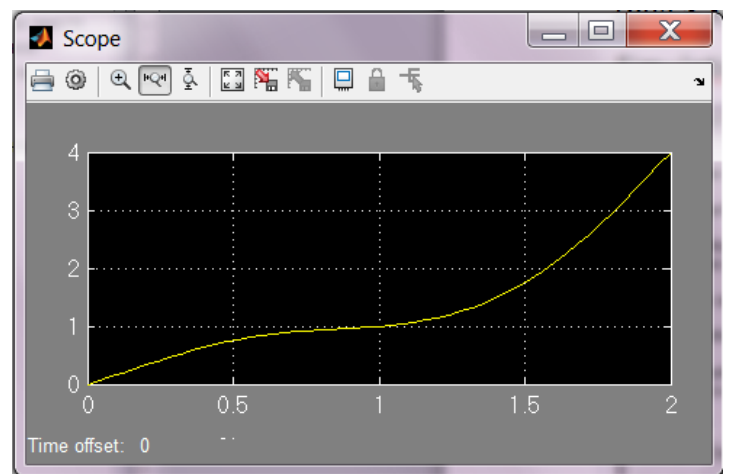


Рисунок 8.15 – Сигнал  $x(t) = 0.5 \sin \pi t + t^2$  на екрані віртуального осцилографу

Нехай безінерційний об'єкт описується системою рівнянь

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

...

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n$$

Для побудови моделі даного об'єкту застосуємо метод зведення до еквівалентної системи ДР. Введемо таку систему ДР:

$$\frac{dx_1}{dt} + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n - b_1 = 0$$

$$\frac{dx_2}{dt} + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n - b_2 = 0$$

...

$$\frac{dx_n}{dt} + a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n - b_n = 0$$

Як тільки всі похідні згаснуть  $\left(\frac{dx_i}{dt} = 0\right)$ , отримуємо сигнал розв'язку  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ .

Для еквівалентності цих двох систем рівнянь має забезпечуватися затухаючий розв'язок системи ДР. Достатньою умовою, що забезпечує затухаючий розв'язок, є позитивна визначеність матриці коефіцієнтів лінійної системи рівнянь. Це можливо, зокрема, за умови, коли  $a_{jj} \geq \sum_{j=1}^n a_{ij}, i \neq j$ .

Приклад 8.3. Знайти розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь 
$$\begin{cases} 4x_1 + 2x_2 = 14 \\ 2x_1 + 5x_2 = -5 \end{cases}$$

Перейдемо до еквівалентної системи рівнянь 
$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = 14 - 4x_1 - 2x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -5 - 2x_1 - 5x_2 \end{cases}$$

Структурна схема моделі даної системи наведена на рис.8.16.

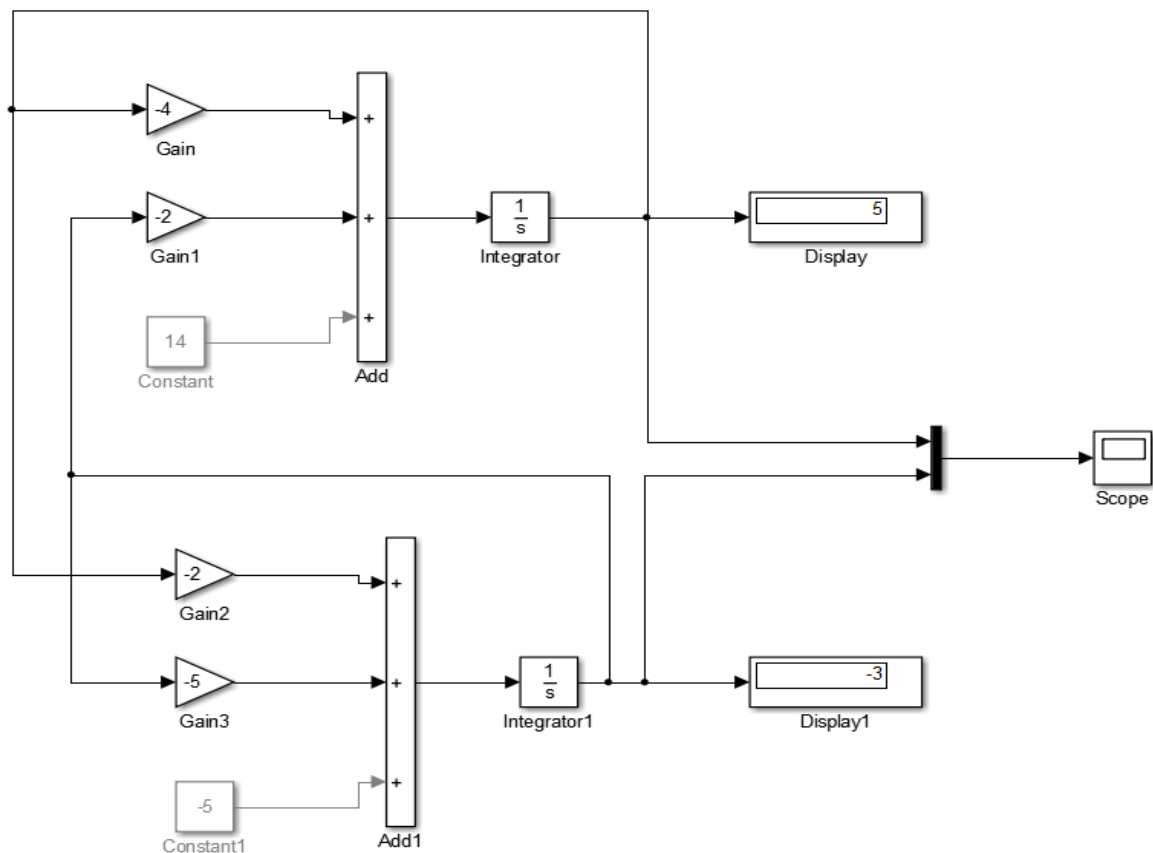


Рисунок 8.16 – Структурна схема моделі системи ДР, еквівалентної системі лінійних алгебраїчних рівнянь другого порядку

Перехідний процес встановлення розв'язку наведений на екрані віртуального осцилографа (рис.8.17).

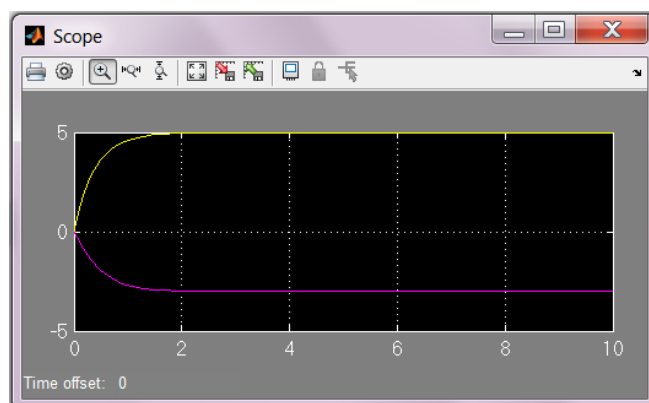


Рисунок 8.17 – Перехідний процес встановлення розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь шляхом зведення до еквівалентної системи ДР

З рис.8.17 видно, що після  $t=2$  на виходах віртуальних інтеграторів Integrator та Integrator1 встановлюються сигнали, що відповідають розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь:  $x_1=5$ ,  $x_2=3$ .

### 8.2.2 Моделі динамічних об'єктів

Поширеним способом опису поведінки динамічної системи є система ДР або інтегро-диференціальних рівнянь. Реалізацію таких математичних моделей Simulink розглянемо на прикладах.

Приклад 8.4. Модель фізичного маятника, що перебуває під впливом експоненціально-затухаючого косинусоїдального збурення. Рівняння руху такого

маятника має вигляд:

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = a_3 e^{-a_4 t} \cos(a_5 t),$$

$$y(t) \Big|_{t=0} = y_0,$$

$$\frac{dy(t)}{dt} \Big|_{t=0} = y'_0.$$

Обравши числові значення параметрів, наприклад,  $a_1 = a_2 = 0.1$ ,  $a_3 = -5$ ,  $a_4 = 1$ ,  $a_5$

$= 0.1$ , отримаємо таке рівняння

$$y'' + 0.1y' + 0.1y = -5e^{-t} \cos(0.1t),$$

$$y(0) = -1.5,$$

$$y'(0) = 2.$$

Структурна схема моделі наведена на рис.8.18. Коефіцієнти рівняння встановлюються у вікнах параметрів масштабних блоків Gain та Gain1. Початкові умови для функції та її похідної встановлюються у вікнах параметрів інтеграторів Integrator та Integrator1. У вікні меню Simulation/Configuration Parameters обирається солвер та встановлюється інтервал моделювання.

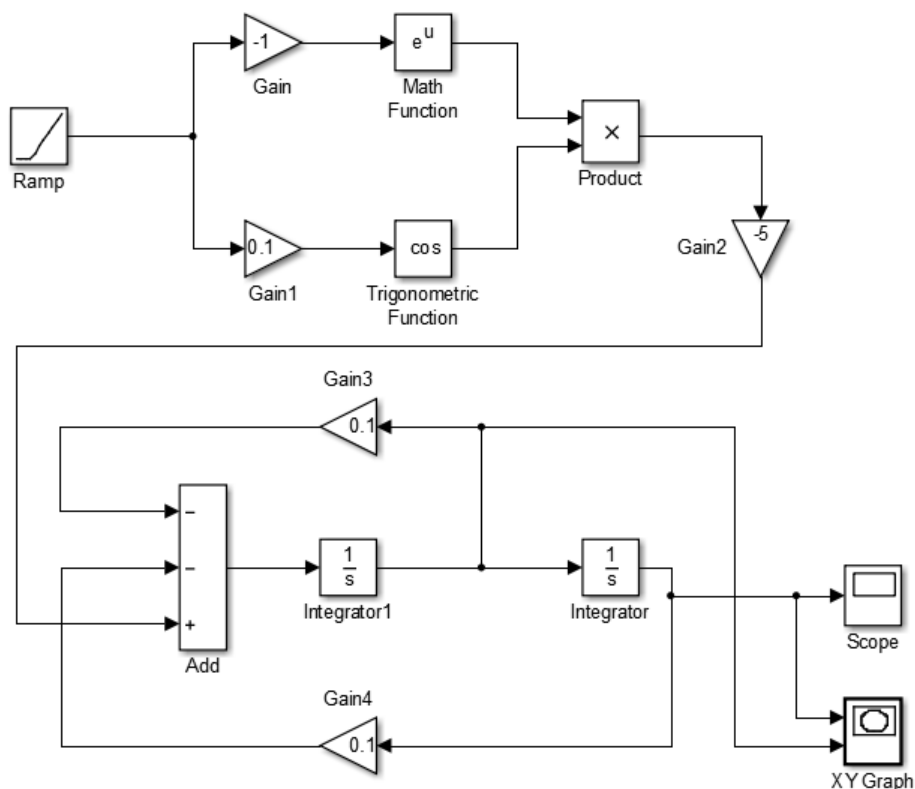


Рисунок 8.18 – Модель фізичного маятника

Параметричний графік залежності похідної сигналу від сигналу (фазовий портрет маятника) наведений на рис.8.19. Результати роботи моделі наведені на екрані віртуального осцилографа Scope (рис.8.20).

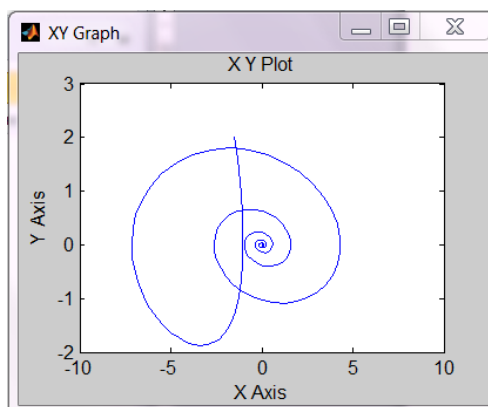


Рисунок 8.19 – Фазовий портрет фізичного маятника

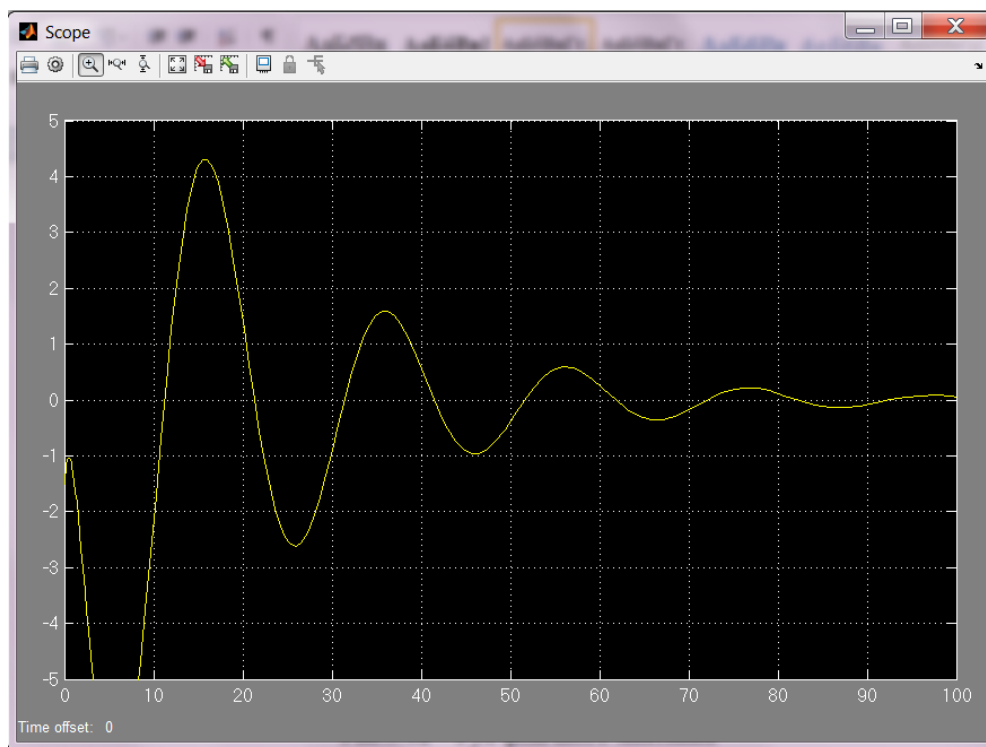


Рисунок 8.20 – Рух фізичного маятника

Приклад 8.5. Модель динамічної системи, що описується ДР 3-го порядку. Задане

ДР:

$$\frac{d^3 y(t)}{dt^3} + 2.5 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 6 \frac{dy(t)}{dt} + 2.5 y(t) = e^{-t},$$

$$y(0) = 1; \quad y'(0) = -1; \quad y''(0) = 2.$$

Структурна схема моделі динамічної системи, побудована за звичайними правилами аналогової обчислювальної техніки, наведена на рис.8.21.

Коефіцієнти рівняння встановлюються у вікнах параметрів масштабних блоків Gain – Gain2. Початкові умови для функцій і похідних встановлюються у вікнах параметрів інтеграторів Integrator – Integrator2. Права частина диференціального рівняння сформована за допомогою блоків Ramp (генератор аргументу -1) і блоку MathFunction, налаштованого на реалізацію експоненційної функції. У вікні меню Simulation/Configuration Parameters обирається необхідний солвер та встановлюється інтервал моделювання.

Візуалізація перехідного процесу наведена на екрані віртуального осцилографа (рис.8.22). Фазовий портрет системи на екрані віртуального двокоординатного реєстратора XY Graph наведений на рис.8.23.



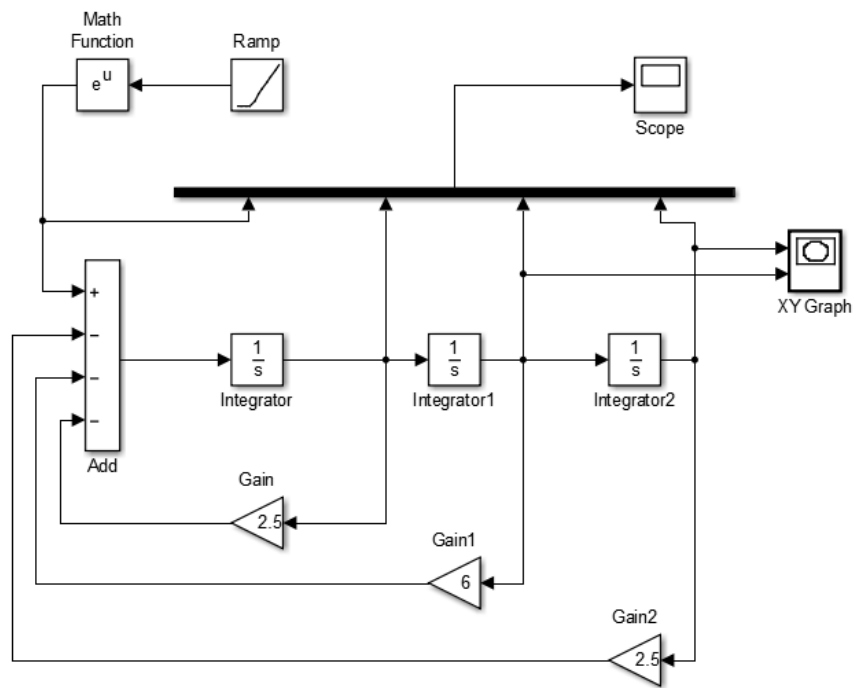


Рисунок 8.21 – Структурна схема моделі динамічної системи 3-го порядку

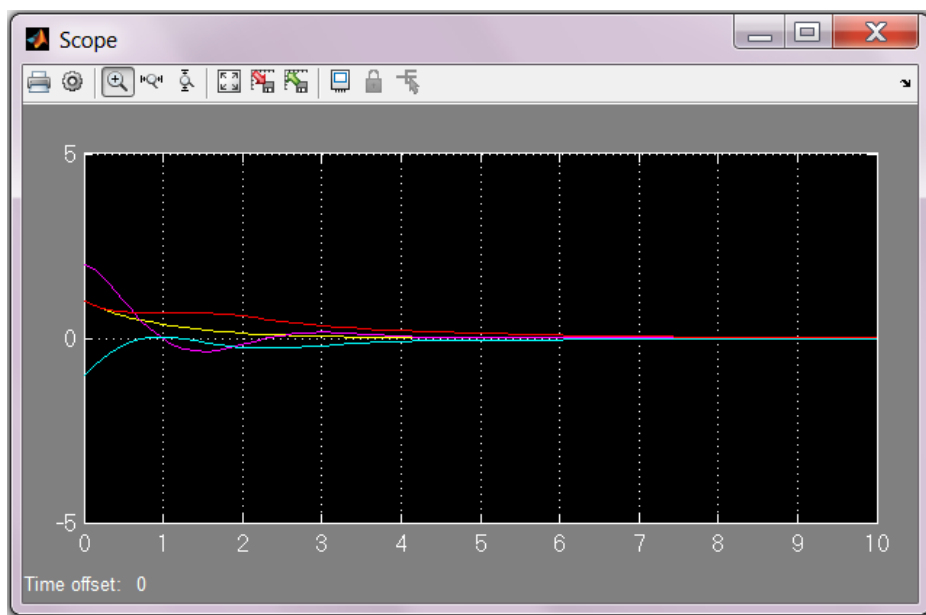


Рисунок 8.22 – Перехідний процес системи

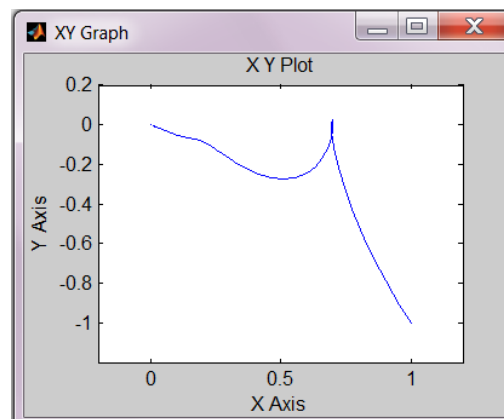


Рисунок 8.23 – Фазовий портрет системи

**Приклад 8.6.** Модель траєкторії польоту тіла, кинутого з початковою швидкістю під кутом до горизонту. Припустимо, що спостерігач, перебуваючи над рівнем землі на висоті 1 м, кинув камінь під кутом  $30^\circ$  до горизонту з початковою швидкістю 20м/сек. Необхідно реалізувати модель траєкторії польоту каменя під дією сили тяжіння і визначити відстань від спостерігача до точки падіння каменя. Впливом атмосфери на політ каменя знехтувати. Рівняння руху каменя мають вигляд:

$$y = y_0 + v \sin(\alpha)t - g \frac{t^2}{2},$$

$$x = x_0 + v \cos(\alpha)t,$$

де  $y_0=1$  м,  $v=20$ м/с,  $\alpha=30^\circ$ ,  $g=9.81$  м/с.

Структурна схема моделі траєкторії каменя наведена на рис.8.24.

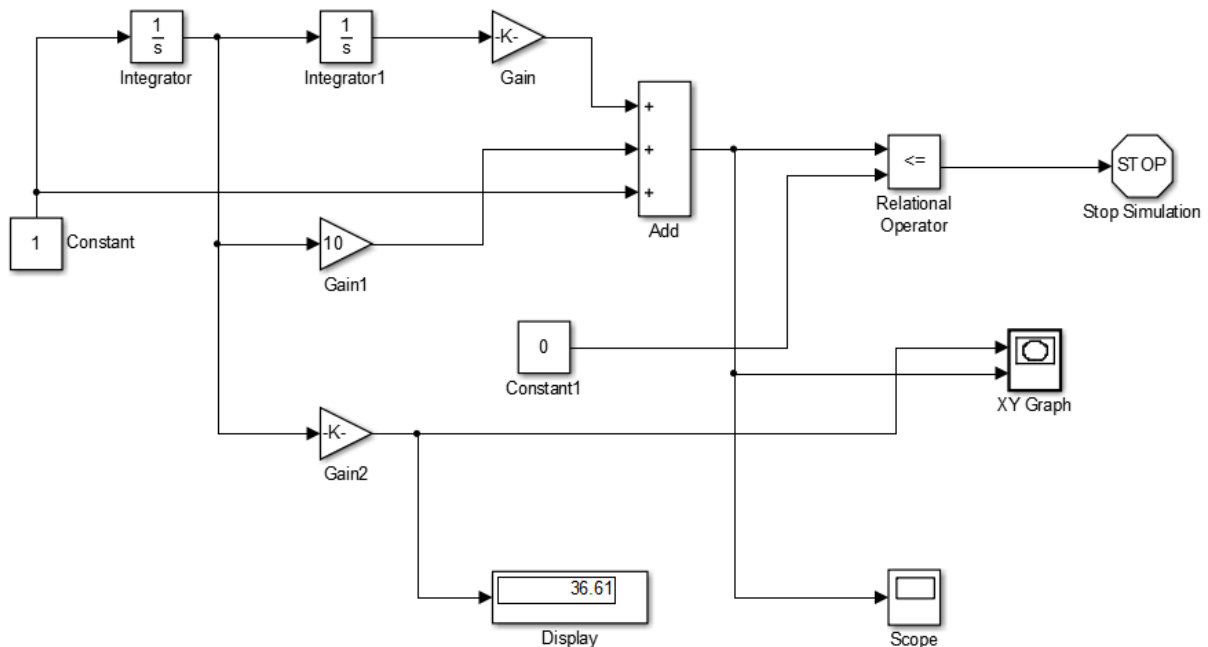


Рисунок 8.24 – Структурна схема моделі траєкторії каменя

Вертикальна складова початкової швидкості каменя задається блоком Gain1, горизонтальна складова – блоком Gain2, прискорення земного тяжіння – блоком Gain. Значення поточної висоти польоту каменя як функції часу формується на виході суматора. Сигнал закінчення моделювання формується блоками Relational Operator і Stop Simulation в момент часу, коли висота дорівнюватиме нулю. Показання цифрового реєстратора відповідає довжині шляху по горизонталі, пройдений каменем до моменту зіткнення з землею. На рис.8.25 та 8.26 наведені, відповідно, графік зміни в часі висоти

польоту каменя та траєкторія каменя на екрані віртуального двокоординатного реєстратора.

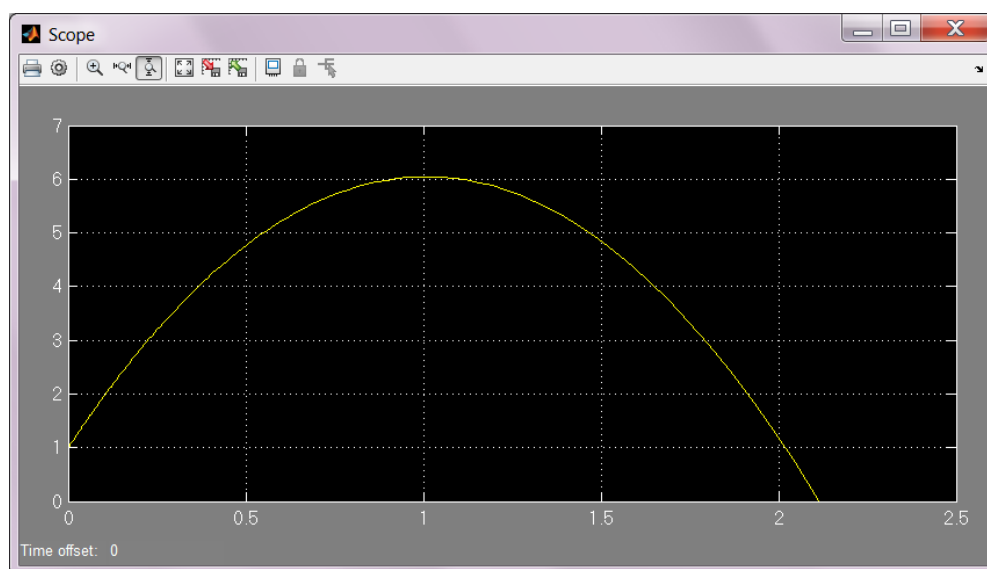


Рисунок 8.25 – Графік зміни в часі висоти польоту каменя

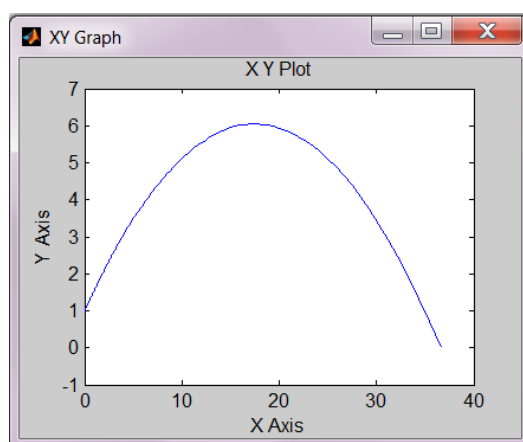


Рисунок 8.26 – Траєкторія польоту каменя, кинутого під кутом  $30^\circ$  до горизонту з початкової висоти 1 м, з початковою швидкістю 20 м/с

Simulink має спеціальний *редактор ДР*, для отримання доступу до якого потрібно у командному вікні MatLab набрати команду `dee`. Редактор ДР містить готові моделі розв'язання різних ДР, зокрема, рівняння Ван-дер-Поля та ін.

Детальний опис пакету Simulink наведений у відповідному розділі довідкової системи MatLab.

Слід також зазначити, що до складу системи MatLab входить багато інших додатків, ґрунтованих на методах графічного (візуального) програмування, що допускають спільну роботу з додатком Simulink. Це, наприклад, Aerospace Blockset (моделювання авіаційних, космічних, реактивних і турбореактивних систем), DSP

Blockset (проектування систем і моделювання задач цифрової обробки сигналів), Nonlinear Control Design Blockset (графічний інтерфейс для налаштування параметрів динамічних об'єктів), SimPowerSystems (моделювання електротехнічних та електроенергетичних пристроїв і систем), SimMechanics (моделювання систем керування за допомогою ненаправлених сигнальних графів, поєднання їх з фізичними моделями ті моделями з інших бібліотек) та інші.

### **Контрольні питання**

1. Які основні переваги пакету розширення Simulink?
2. Що таке S-модель? На чому ґрунтується створення S-моделей?
3. Що собою представляє бібліотека блоків Simulink?
4. Наведіть загальний алгоритм побудови S-моделі.