

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія



**К. Є. Лісняк
А.П. Мовчан
А.М. Ніколаєнко**

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

**Методичні вказівки
до лабораторного практикуму, самостійної роботи та дипломного
проектування**

*для студентів ЗДІА
спеціальності 6.902501 “Автоматизоване управління технологічними
процесами”*

**Запоріжжя
2008**

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

**Методичні вказівки
до лабораторного практикуму, самостійної роботи та дипломного
проектування**

*для студентів ЗДІА
спеціальності 6.902501 “Автоматизоване управління технологічними
процесами”*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри АУТП,
протокол № 22 від 21 .05 .2008 р.*

Запоріжжя
2008

Моделювання та оптимізація систем керування. Методичні вказівки до лабораторного практикуму, самостійної роботи та дипломного проектування для студентів ЗДІА спеціальності 6.902501 “Автоматизоване управління технологічними процесами” /Укл.: К.Є. Лісняк, А.П. Мовчан, А.М. Ніколаєнко. – Запоріжжя, 2008. – 64 с.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності "Автоматизоване управління технологічними процесами", які виконують лабораторні роботи з курсу "Моделювання та оптимізація систем керування". Вказівки містять завдання до лабораторних робіт, методики роботи з програмним забезпеченням, що використовується у лабораторному практикумі, список рекомендованої літератури для підготовки до виконання та захисту лабораторних робіт.

Укладачі: ***К.Є. Лісняк, асистент***

А.П. Мовчан, канд. техн. наук, доцент

А.М. Ніколаєнко, канд. техн. наук, професор

Відповідальний за випуск: ***зав. кафедрою АУТП***

професор А.М. Ніколаєнко

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1.....	5
Лабораторна робота № 2.....	17
Лабораторна робота № 3.....	22
Лабораторна робота № 4.....	31
Лабораторна робота № 5.....	44
Лабораторна робота № 6.....	56
Список рекомендованої літератури	63

ВСТУП

В наш час для проектування систем автоматичного управління широко застосовуються засоби обчислювальної техніки з відповідним програмним забезпеченням. Одним з найбільш популярних програмних пакетів, що використовується для проектування систем управління, є система комп'ютерної математики MATLAB. Вона має потужні засоби математично орієнтованого програмування, діалогу, графіки та комплексної візуалізації.

Популярності системи MATLAB сприяє її розширення Simulink, яке надає в розпорядження користувача зручні та прості засоби, у тому числі візуального об'єктно-орієнтованого програмування, для блочного моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем, а також наявність великої кількості інструментальних засобів для ідентифікації, аналізу і оптимізації систем.

В методичних вказівках приведені методики ідентифікації статичних і динамічних характеристик об'єктів керування, параметричної оптимізації систем управління з використанням додатків системи MATLAB, розглянуті основи блочного моделювання динамічних систем у пакеті Simulink.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Ідентифікація статичних характеристик об'єктів управління

Мета роботи: вивчити методику ідентифікації статичних характеристик об'єктів управління за допомогою додатку Curve Fitting Toolbox.

1. Теоретична частина

Для здійснення параметричної оптимізації, тобто вибору настройок регулятора, які б забезпечували високу якість регулювання, необхідно мати інформацію про статичні та динамічні властивості об'єкту управління. Цю інформацію найчастіше отримують експериментальним шляхом. В результаті проведення експерименту отримують залежність між вхідною та вихідною величиною, що представлена в вигляді таблиці, в якій конкретні значення вхідної величини визначають конкретні значення вихідної величини. При цьому точного взаємозв'язку у вигляді математичного виразу немає. В той же час може виникнути необхідність визначення значення вихідної величини при будь-якому значенні вхідної, що не представлено у таблиці. Це можна зробити або шляхом проведення додаткових експериментів, або шляхом знаходження математичного виразу, що описує зв'язок між вхідною та вихідною величиною, тобто рішенням задачі апроксимації.

Апроксимацією називають знаходження математичного виразу по обмеженій кількості експериментальних даних, який би максимально точно встановлював взаємозв'язок функції та аргументу. Для виконання апроксимації може бути використаний додаток Curve Fitting Toolbox середовища MATLAB.

1.1 Основи роботи у додатку Curve Fitting Toolbox

Додаток Curve Fitting Toolbox запускається за допомогою команди `cftool`. Після введення команди з'являється вікно додатку (рис. 1.1).

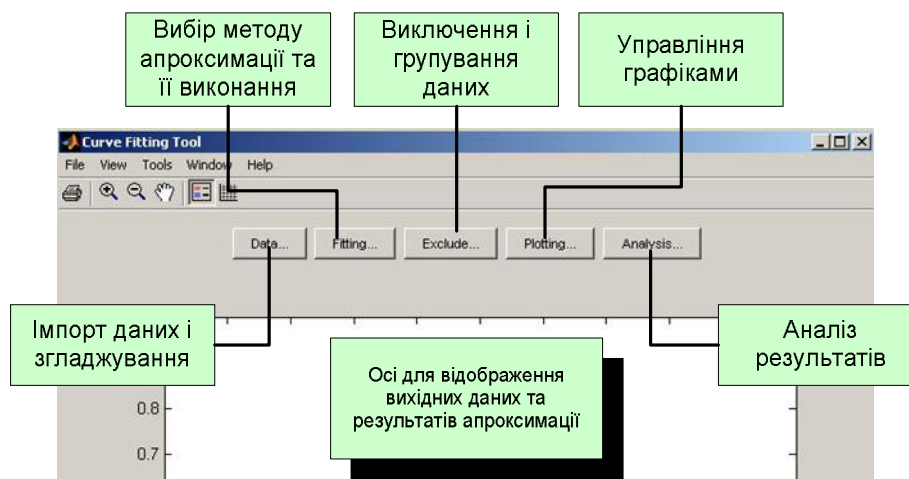


Рис. 1.1 – Вікно додатку Curve Fitting Toolbox

Основні етапи вирішення задачі апроксимації у додатку Curve Fitting Toolbox такі:

1. Імпорт даних (кнопка **Data**).
2. Побудова, при необхідності, правил виключення деяких значень, або виключення їх вручну (кнопка **Exclude**).
3. Вибір методу апроксимації, підбір параметрів апроксимуючої функції, а також перегляд отриманих результатів (кнопка **Fitting**).
4. Аналіз результатів апроксимації, що включає обчислення значень апроксимуючої функції в заданих точках (включаючи екстраполяцію), її інтегрування та диференціювання (кнопка **Analysis**).

Крім того можливо:

1. Експортувати отримані результати в робоче середовище MATLAB.
2. Проводити згладжування й фільтрацію даних (кнопка **Data**).
3. Згенерувати файл-функцію, яку можна використати згодом автономно від додатка Curve Fitting Toolbox.
4. Зберегти сесію й при наступних запусках додатка Curve Fitting Toolbox відновити її (меню **File**, пункти **Save Session**, **Load Session**).
5. Вивести результати в окреме графічне вікно (меню **File**, пункт **Print to Figure**).
6. Надрукувати результати (меню **File**, пункт **Print**).

Для імпорту даних в додаток Curve Fitting Toolbox необхідно натиснути кнопку **Data**, внаслідок чого з'являється вікно **Data**, призначення елементів управління якого наведено на рис. 1.2.

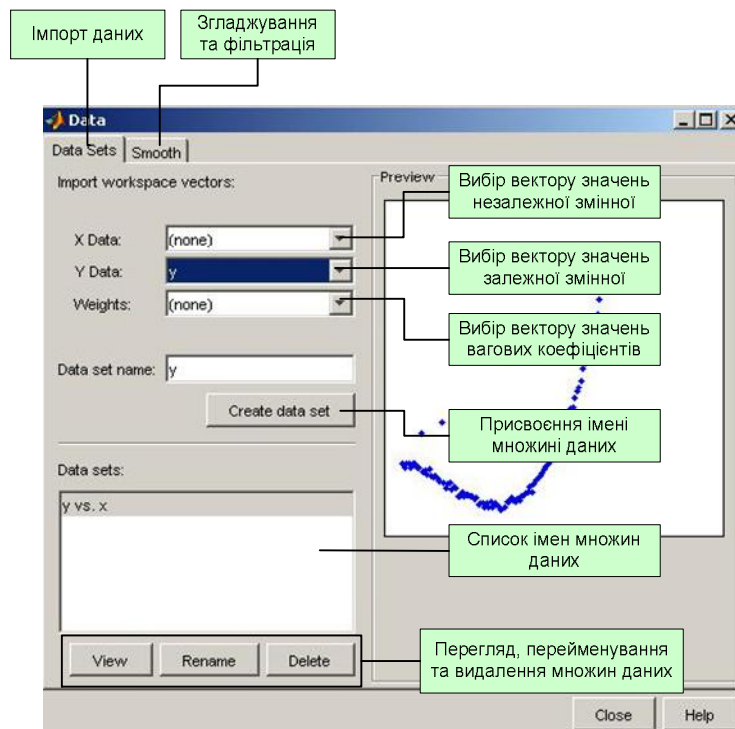


Рис. 1.2 – Вікно Data додатка Curve Fitting Toolbox

У списках **X Data** та **Y Data** необхідно вибрати імена глобальних змінних робочого середовища MATLAB, в яких зберігаються вихідні дані. Після цього на правій панелі вікна **Data** будується приблизний графік вибраних даних.

Список **Weights** призначений для вибору вектору вагових коефіцієнтів. Якщо в цьому немає необхідності його можна не вказувати, за умовчуванням вагові коефіцієнти дорівнюють одиниці.

Після вибору векторів необхідно задати ім'я множині даних, шляхом введення його в рядок **Data set name** і натискання кнопки **Create data set**.

1. Зі створеною множиною даних можна проробити наступні операції:
2. Відобразити таблицю даних разом з графіком в окремому вікні (кнопка **View**).
3. Перейменувати виділений набір даних (кнопка **Rename**).
4. Видалити виділений набір даних (кнопка **Delete**).
5. Здійснити згладжування даних різними способами (вкладка **Smooth**).

1.2 Згладжування та фільтрація даних

Якщо дані сильно зашумлені, то можна виконати їх згладжування. Однак, слід мати на увазі, що згладжування даних приводить до того, що припущення про нормальне розподілення помилки не буде виконуватись. Тому згладжування звичайно використовується для отримання інформації про можливий вибір типу апроксимуючої функції, а сам процес підбору її параметрів проводять для вихідних (не згладжених) даних.

Згладжування виконується за декількома розташованими підряд даними, причому їх кількість звичайно підбирається експериментально.

В Curve Fitting Toolbox реалізовано три способи згладжування

- метод ковзкого середнього;
- метод зваженої локальної регресії;
- фільтр Савицького-Голея.

Всі ці способи згладжування представлені в діалоговому вікні **Data** на вкладці **Smooth** (рис. 1.3).

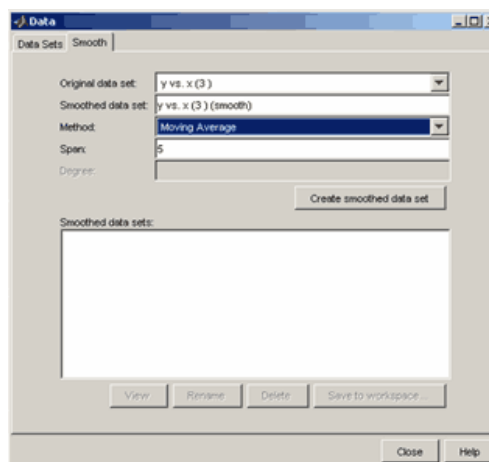


Рис. 1.3 – Вкладка Smooth вікна Data для згладжування даних

У списку **Original data set** вибирається вихідна множина даних.

В рядку **Smoothed data set** вводиться ім'я, що буде присвоєне множині згладжених даних.

У списку **Method** вибирається один із методів згладжування даних.

В рядку **Span** задається число сусідніх точок, за якими виконується згладжування (для зваженої локальної регресії можна задавати число, що менше одиниці, воно сприймається як відсоток від загальної кількості точок, що використовуються для згладжування).

Для фільтра Савицького-Голея необхідно задати ступінь поліному для локальної регресії, ступінь задається в рядку **Degree**.

Згладжені дані можна візуалізувати (кнопка **View**), переіменувати (кнопка **Rename**), видалити (кнопка **Delete**) та зберегти як глобальну змінну робочого середовища MATLAB (кнопка **Save to workspace**).

Метод ковзкого середнього (Moving Average)

У методі ковзкого середнього вихідні дані y_i згладжуються по наступному правилу:

$$y_i^s = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N y(i+k), \quad (1.1)$$

де $2N+1$ - число точок, що використовуються для згладжування, таким чином зліва та справа від поточної точки вибирається по N точок (число точок, що використовуються для згладжування, повинно бути непарним). Дані, розташовані в точках, близьких до меж відрізка, не згладжуються, тому що не вистачає точок справа або зліва від поточної, в котрій в даний момент виконується згладжування. На рисунку 1.4 показаним приклад згладжування даних.

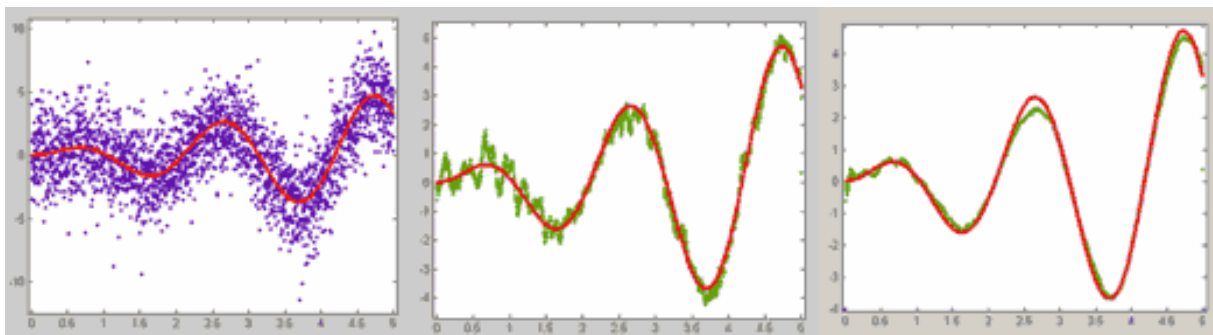


Рис. 1.4 – Згладжування даних методом ковзкого середнього

*Лівий графік – зашумлені дані (краски) та незашумлені (лінія),
середній графік – згладжені з $N = 33$ та незашумлені,
правий графік – згладжені з $N = 191$ та незашумлені*

Зважена локальна регресія (Lowess і Loess)

При згладжуванні за допомогою зваженої локальної регресії для кожного значення даних вибирається набір з фіксованого числа розташованих поруч точок, кожній з яких призначається вага по наступній формулі:

$$w_i = \left(1 - \left| \frac{x_k - x_i}{d(x_k)} \right|^3 \right)^3, \quad (1.2)$$

де $d(x_k)$ – відстань від x_k до найбільш віддаленої точки з набору. Таким чином найбільша вага (що дорівнює одиниці) буде у y_k , а найменша (що дорівнює нулю) у даних, що розташовані на межах набору.

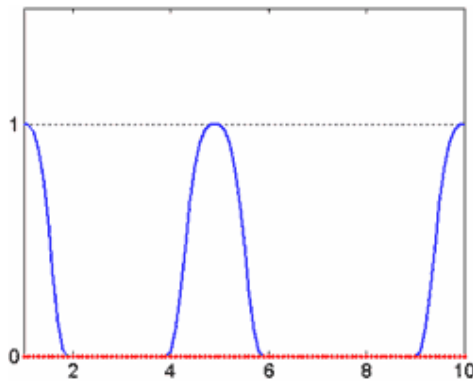


Рис. 1.5 – Значення вагових коефіцієнтів для зваженої локальної регресії

Після вибору ваги згладжене значення знаходиться за допомогою локальної зваженої регресії, причому в залежності від вибору користувача у списку **Method** на вкладці **Smooth** вікна **Data** виконується різна регресія

- **Lowess** – лінійна регресія;
- **Loess** – квадратична регресія.

Крім опцій **Lowess** та **Loess** в списку **Method** на вкладці **Smoothing** у вікні **Data** є ще **Robust Lowess** та **Robust Loess**. Ці способи менш чутливі по відношенню до викидів даних, оскільки вибір вагових коефіцієнтів виконується за декілька ітерацій, на кожній з яких більш віддаленим від регресійної кривої (знайденої на попередній ітерації) точкам призначаються менші вагові коефіцієнти, а якщо точка сильно віддалена, то вона взагалі виключається з набору даних при виконанні локальної регресії на наступній ітерації.

Фільтр Савицького–Голя (Savitzky-Golay)

У фільтрі Савицького-Голя ступінь полінома, що використовується для локальної регресії може бути вищим ніж у попередньому способі згладжування, при цьому виконується незважена локальна регресія. Число сусідніх точок (що задається в рядку **Span**) для згладжування повинно бути непарне, а ступінь полінома (що задається в рядку **Degree**) менше, ніж число сусідніх даних.

Цей спосіб фільтрації добре підходить для зашумлених сигналів, в котрих при згладжуванні необхідно зберегти високі частоти. При підвищенні ступеня

полінома, що використовується в локальній регресії, краще відтворюються вузькі та високі піки.

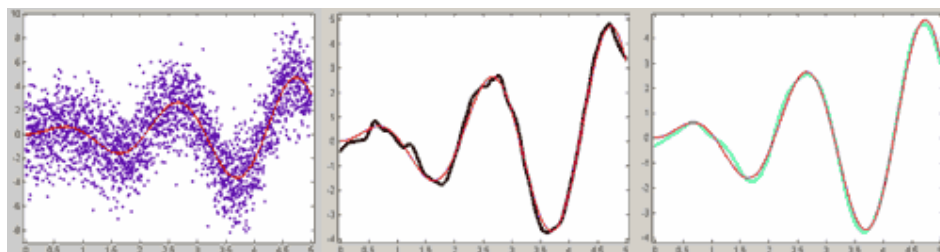


Рис. 1.6 – Згладжування даних методом зваженої локальної регресії
*Лівий графік – зашумлені дані (крапки) та незашумлені (лінія),
середній графік – згладжені з 10% від всіх точок та незашумлені,
правий графік – згладжені з 20% від всіх точок та незашумлені*

1.3 Виконання апроксимації стандартними методами. Робота з декількома апроксимуючими функціями та множинами даних

Для виклику діалогового вікна, призначеного для виконання апроксимації, необхідно натиснути кнопку **Fitting** в основному вікні додатка Curve Fitting Toolbox. З'являється діалогове вікно **Fitting** в якому необхідно натиснути кнопку **New fit**, після чого всі елементи управління цього вікна стануть доступними (рис. 1.7).

Для виконання апроксимації у полі **Fit Name** задається ім'я апроксимуючої функції, в полі **Data set** вказується множина вихідних даних, зі списку **Type of fit** вибирається тип апроксимації та натискається кнопка **Apply**. Після розрахунку коефіцієнтів апроксимуючої функції у вікні **Results** виводиться наступна інформація:

1. Інформація про апроксимуючу функцію.
2. Знайдені значення коефіцієнтів функції разом з довірчими інтервалами, що відповідають рівню імовірності 95%.
3. Обчислені критерії придатності апроксимуючої функції.

В основному вікні додатку Curve Fitting Toolbox виводиться графік апроксимуючої функції при знайденому значенні параметрів, а в таблицю **Table of Fits** виводиться ім'я апроксимуючої функції і значення критеріїв придатності.

Програма дозволяє повторити розрахунок апроксимуючої функції іншим методом, з іншими параметрами або на основі іншого набору даних. Для цього необхідно натиснути кнопку **New fit**, задати ім'я функції, метод та параметри апроксимації і запустити розрахунок натискання кнопки **Apply**.

В таблиці **Table of Fits** відображається інформація про усі розраховані апроксимуючі функції. При виборі одної з них в області **Results** автоматично відображається вся інформація про функцію. Для видалення цієї інформації достатньо виділити апроксимуючу функцію в таблиці **Table of Fits** і натиснути кнопку **Delete**.

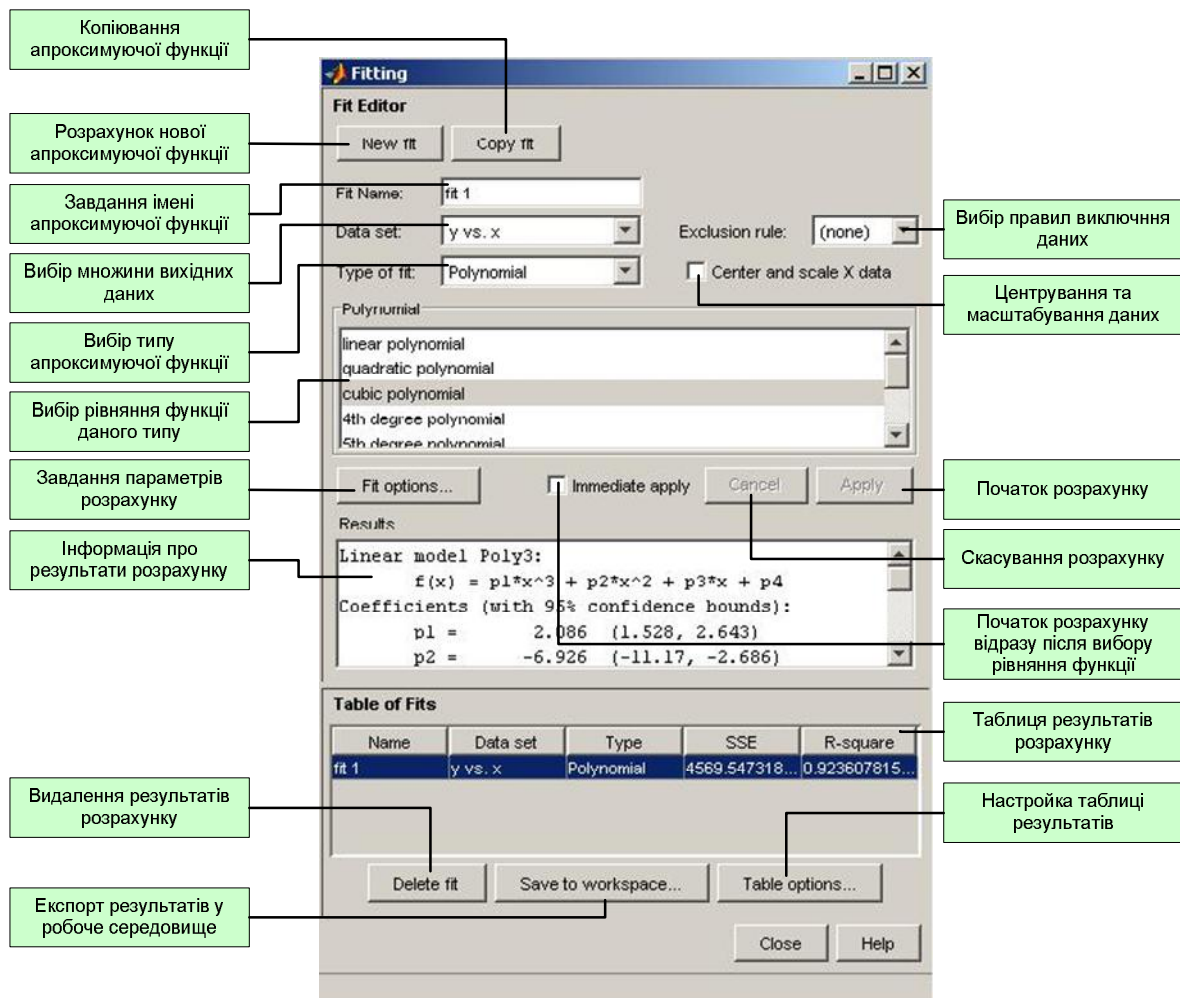


Рис. 1.7 – Вікно Fitting додатка Curve Fitting Toolbox

1.4 Управління процесом підбору параметрів апроксимуючої функції

При необхідності користувач може змінити такі параметри розрахунку як: початкові, максимальні та мінімальні значення коефіцієнтів апроксимуючої функції, алгоритм їх розрахунку, метод підвищення стійкості розрахунку до викидів даних. Це робиться у діалоговому вікні, що викликається натискання кнопки **Fit Option** (рис. 1.8).

Список **Robust** містить чотири опції **On**, **Off**, **LAR** і **Bisquare** і служить для вибору методу розрахунку стійкого до викидів в даних.

При виконанні апроксимації шукані значення параметрів апроксимуючої функції $a_1, a_2, \dots, a_k$ визначаються як рішення задачі мінімізації суми квадратів відхилів, тобто суми квадратів відстаней від точок даних $(x_j, y_j)_{j=1,2,\dots,n}$ до точок апроксимуючої кривої $y(x_j; a_1, a_2, \dots, a_k)$:

$$\min_{a_1, a_2, \dots, a_k} \sum_{j=1}^n \left(y(x_j; a_1, a_2, \dots, a_k) - y_j \right)^2. \quad (1.3)$$

Якщо даним $(x_j, y_j)_{j=1,2,\dots,n}$ призначені вагові коефіцієнти $(w_j)_{j=1,2,\dots,n}$, то вирішується наступна задача мінімізації (якщо вагові коефіцієнти не задані, то за умовчанням вони приймаються рівними одиниці):

$$\min_{a_1, a_2, \dots, a_k} \sum_{j=1}^n w_j \left(y(x_j; a_1, a_2, \dots, a_k) - y_j \right)^2. \quad (1.4)$$

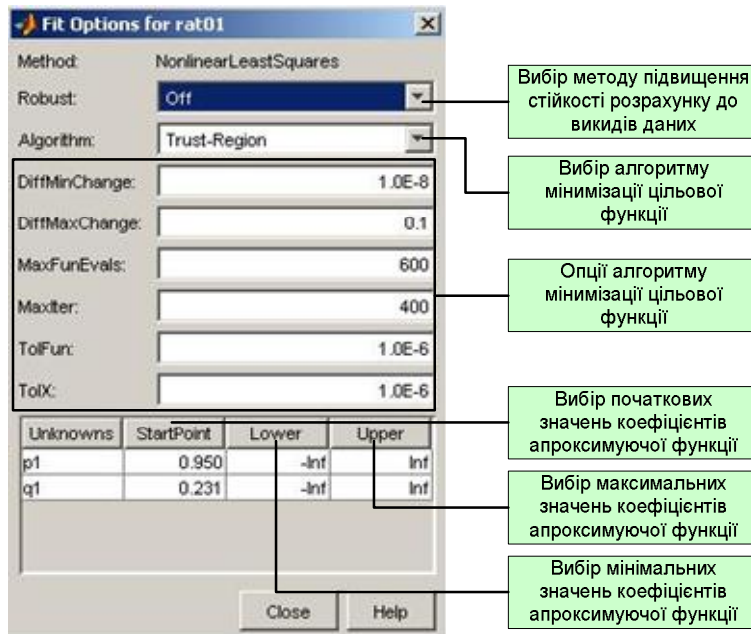


Рис. 1.8 – Вікно Fit Option додатка Curve Fitting Toolbox

Якщо у вихідних даних наявний викид, причому відповідний ваговий коефіцієнт не заданий достатньо малим, то він може суттєво погіршити результати апроксимації. На рис. 1.9 наведено результати апроксимації поліномом першого ступеня для даних без викидів (лівий графік) та для даних з одним викидом (правий графік). Як видно з малюнку викид суттєво впливає на результат апроксимації. Це обумовлено тим, що відхил в виразі, що мінімізується, підноситься у квадрат.

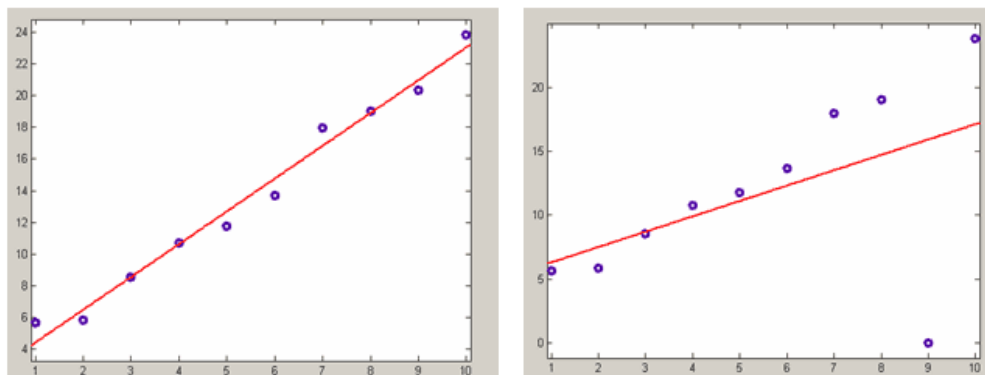


Рис. 1.9 – Апроксимація даних з викидом

Одним із способів зменшення впливу викидів на результати апроксимації полягає в мінімізації суми не квадратів відхилів, а їх модулів. Для цього служить опція **LAR** (Least Absolute Residuals). Якщо вибрати **LAR** в списку **Robust** і знову провести лінійну регресію, то ми побачимо, що викид в даних набагато менше впливає на результат апроксимації (рис. 1.10).

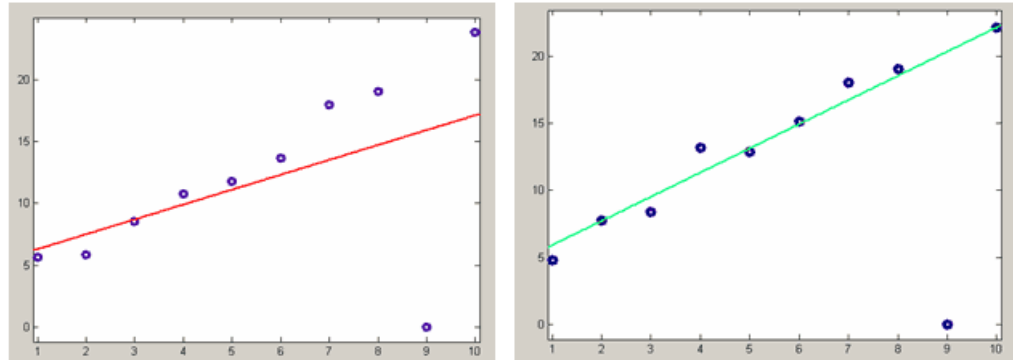


Рис. 1.10 – Апроксимація даних з викидом мінімізацією суми квадратів відхилів (ліворуч) та суми модулів відхилів (праворуч)

Інший спосіб зниження впливу викидів на результати апроксимації полягає в призначенні вагових коефіцієнтів даним. Чим більший ваговий коефіцієнт має та або інша крапка, тим більше вона впливає на результати апроксимації. Проте, в практичних завданнях не завжди вдається визначити викиди або точки даних, які повинні менше впливати на результати апроксимації і призначити їм відповідні ваги. Замість цього можна скористатися адаптивним алгоритмом, який послідовно:

1. Виконує апроксимацію, підбираючи параметри по методу найменших квадратів.
2. Обчислюється приведений відхил.
3. В залежності від віддаленості крапок від апроксимуючої кривої, даним призначаються вагові коефіцієнти за наступним правилом (чим далі крапка, тим менше її вага):

$$w_k = \begin{cases} (1 - u_k^2)^2, & |u_k| < 1 \\ 0, & |u_k| \geq 1 \end{cases} \quad (1.5)$$

4. Якщо вагові коефіцієнти досить сильно змінилися, то здійснюється перехід до пункту 1, в іншому разі розрахунок завершується.

Оскільки в приведеному вище адаптивному алгоритмі присутній четвертий ступінь відхилення, то він називається **Bisquare weights** (біквдратні вагові коефіцієнти). Для вибору такого способу наближення параметричною моделлю слід встановити опцію **Bisquare** в списку **Robust** діалогового вікна **Fit options for**.

На рисунку 1.11 приведений результат апроксимації даних з викидом за допомогою алгоритму Bisquare weights з автоматичним підбором вагових коефіцієнтів.

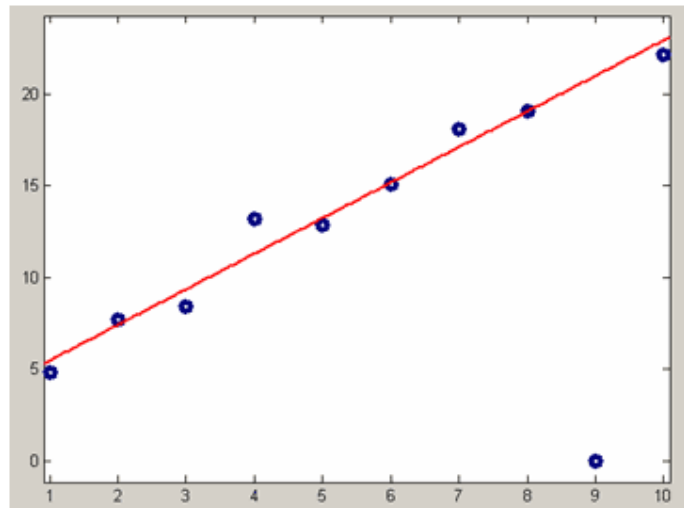


Рис. 1.11 – Апроксимація даних з викидом за допомогою алгоритму Bisquare weights

Інші опції в діалоговому вікні **Fit options for** пов'язані з алгоритмами мінімізації цільової функції.

1.5 Оцінка результатів апроксимації

Після виконання апроксимації оцінка якості наближення може бути проведена як візуально, так і з використанням різних критеріїв: SSE (сума квадратів помилок), R-square (критерій R-квадрат), Adjusted R-square (уточнений R-квадрат), RSME (корінь з середнього для квадрата помилки). Значення цих критеріїв для кожної апроксимуючої функції наводяться у таблиці **Table of Fits** вікна **Fitting**. Розглянемо їх докладніше.

Критерій SSE (Sum of squares due to error) – сума квадратів помилок.

Критерій SSE обчислюється за формулою:

$$SSE = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - \hat{y}_k)^2, \quad (1.6)$$

де w_k - вагові коефіцієнти (якщо вони не задані при імпорті даних, то вважаються рівними одиниці), y_k - ординати точок вихідних даних, а $\hat{y}_k$ - ординати точок апроксимуючої кривої. Близькість SSE до нуля говорить про хорошу якість наближення даних апроксимуючої функцією.

Критерій R-квадрат (R-square) – квадрат змішаної кореляції.

Критерій R-квадрат визначається як відношення суми квадратів щодо регресії SSR до повної суми квадратів SST, тобто:

$$\begin{aligned}
SSR &= \sum_{k=1}^n w_k (\hat{y}_k - \bar{y})^2, \\
SST &= \sum_{k=1}^n w_k (y_k - \bar{y})^2, \\
R\text{-квadrat} &= \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST},
\end{aligned}
\tag{1.7}$$

де $\bar{y}$ - середнє значення.

Критерій R-квадрат може приймати значення тільки від нуля до одиниці і, як правило, чим ближче він до одиниці, тим краще апроксимуюча функція наближає початкові дані.

Проте, при збільшенні числа параметрів апроксимуючої функції значення критерію R-квадрат може збільшитися, хоча разом з тим, якість наближення не покращає. У зв'язку з цим часто застосовують інший критерій - уточнений R-квадрат, в який входить число коефіцієнтів апроксимуючої функції.

Якщо число точок вихідних даних рівне n , а число параметрів апроксимуючої функції рівне m , то критерій уточнений R-квадрат визначається так:

$$\text{Уточнений R-квадрат} = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(n-m)}.
\tag{1.8}$$

Його значення не може перевищувати одиниці, а близькі до одиниці значення уточненого R-квадрат свідчать про хороше наближення початкових даних апроксимуючою функцією.

Корінь з середнього для квадрата помилки RSME (Root mean Squared Error):

$$RSME = \sqrt{\frac{SSE}{n-m}}.
\tag{1.9}$$

Близькі до нуля значення RSME означають хороше наближення початкових даних параметричною моделлю.

2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати вихідні дані для виконання лабораторної роботи: у прямокутній системі координат нанести 20-30 точок, що імітують отримані експериментальні дані (рис. 1.12) і занести координати точок у таблицю.

2. Запустити програму MATLAB.

3. Занести координати точок у робоче середовище MATLAB, для чого у командному вікні програми ввести команду:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]; \quad y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n];$$

де x – ім'я незалежної змінної, y – ім'я залежної змінної, $x_1, x_2, \dots, x_n$ – абсциси точок, $y_1, y_2, \dots, y_n$ – ординати точок.

4. Запустити додаток Curve Fitting Toolbox та імпортувати у нього введені дані.

5. Виконати апроксимацію 3-4 видами апроксимуючих функцій, порівняти отримані результати.

6. Виконати згладжування вихідних даних одним з доступних у додатку методів.

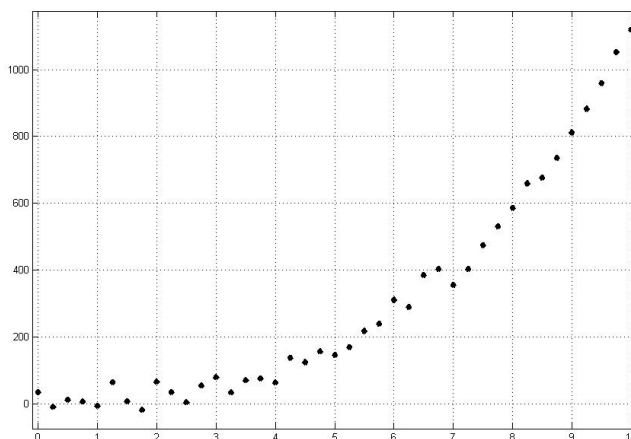


Рис. 1.12 – Вихідні дані для виконання роботи

7. Знайти апроксимуючі функції для згладжених даних, порівняти отримані результати з попередніми.

8. Для імітації викиду в вихідних даних змінити значення ординати однієї з точок таким чином, щоб воно значно відрізнялося від значень ординат найближчих точок.

9. Створити набір даних з викидом.

10. Виконати апроксимацію, порівняти отримані результати з результатами апроксимації даних без викиду.

11. Виконати апроксимацію одним з методів стійких до викидів даних, порівняти з раніше отриманими результатами.

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості.
3. Вихідні дані для виконання роботи.
4. Результати дослідження.
5. Висновки.

4. Контрольні запитання

1. Поняття апроксимації.
2. Методика роботи з додатком Curve Fitting Toolbox.
3. Методи згладжування даних.
4. Методи підвищення стійкості розрахунку до викидів в даних.
5. Критерії оцінки результатів апроксимації.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Ідентифікація динамічних властивостей об'єкта

Мета роботи: вивчити методику ідентифікації динамічних характеристик об'єктів управління за допомогою додатку System Identification Toolbox.

1. Теоретична частина

1.1 Поняття моделювання та ідентифікації

Моделювання – засіб для вивчення процесів, що протікають в різних системах і пристроях без їх створення. Моделювання також використовується для управління реальними системами і пристроями. Під моделлю зазвичай розуміється інформація про найбільш істотні характеристики об'єкту, виражена в тій або іншій формі.

Процедуру побудови моделі прийнято називати ідентифікацією, при цьому даний термін зазвичай відноситься до побудови аналітичних математичних моделей динамічних об'єктів.

Динамічний об'єкт – це об'єкт, вихід якого залежить не тільки від поточного значення вхідних сигналів, але і від значень в попередні моменти часу.

Мета ідентифікації: на підставі спостережень за вхідним $u(t)$ і вихідним $y(t)$ сигналами на якомусь інтервалі часу визначити вид оператора, що зв'язують вхідний і вихідний сигнали.

При експериментальному визначенні параметрів моделі необхідно забезпечити підбір адекватної структури моделі і вибір такого вхідного сигналу, за допомогою якого за наслідками експерименту можна було б знайти оцінки всіх параметрів моделі. Найпростіше завдання визначення параметрів вирішується для лінійних об'єктів (для них виконується принцип суперпозиції). Тут можна виділити два випадки: об'єкт лінійний по вхідній дії; об'єкт лінійний по параметрах.

У завданнях ідентифікації під лінійними об'єктами частіше розуміють об'єкти, лінійні по вхідній дії.

В світлі цього під ідентифікацією динамічних об'єктів розуміють процедуру визначення структури і параметрів їх математичних моделей, які при однаковому вхідному сигналі об'єкту і моделі забезпечують близькість виходу моделі до виходу об'єкту за наявності якогось критерію якості.

Ідентифікація – багатоетапна процедура і містить наступні етапи:

- структурна ідентифікація – визначення структури математичної моделі на підставі теоретичних міркувань;
- параметрична ідентифікація – проведення ідентифікуючого експерименту і визначення оцінок параметрів моделі за експериментальними даними;
- перевірка адекватності – перевірка якості моделі про критерію близькості виходів моделі і об'єкту.

1.2 Додаток System Identification Toolbox

1.2.1 Можливості додатку

Додаток System Identification Toolbox містить засоби для створення математичних моделей лінійних динамічних об'єктів на основі вхідних/вихідних даних. Для цього він має зручний графічний інтерфейс, що допомагає організувати дані і створювати моделі без використання функцій командного режиму роботи.

Методи ідентифікації, що входять в пакет, можуть застосовуватися для вирішення широкого класу завдань – від проектування систем управління і обробки сигналів до аналізу часових рядів. Основні властивості пакету наступні:

- простий і гнучкий інтерфейс;
- попередня обробка даних, включаючи фільтрацію, видалення трендів і зсувів;
- вибір діапазону даних для аналізу;
- ефективні методи авторегресії;
- можливості аналізу відгуку систем в часовій і частотній областях;
- відображення нулів і полюсів передатної функції системи;
- аналіз відхилю при тестуванні моделі.

Додаток підтримує всі традиційні види моделей, включаючи моделі у вигляді передатних функцій, опису для змінних стану (як для безперервного, так і для дискретного часу) та інші, з довільним числом входів і виходів.

Адекватність моделей встановлюється застосуванням таких критеріїв, як залишкова сума квадратів помилки – функція втрат – і так званий теоретичний інформаційний критерій Акейке.

1.2.2 Порядок роботи с додатком System Identification Toolbox

Вихідним матеріалом для математичного опису об'єкта управління є його крива розгону (реакція на ступінчастий, у загальному випадку неединичний, вхідний сигнал за умови, що до об'єкта до його появи перебував в установленим стані). Ця крива повинна бути заданою у вигляді ординат, розділених часовим інтервалом (кроком). При цьому фіксується також і значення ступінчатого вхідного сигналу. Для обробки цих даних у додатку System Identification Toolbox необхідно виконати наступні кроки:

1. Запустити програму MATLAB.

2. У вікні **Workspace** натиснути кнопку **New Variable**. Ввести ім'я змінної, підтвердивши її створення натисканням кнопки **Enter**. Після подвійного натискання лівою кнопкою миші на імені змінної з'явиться вікно **Array Editor** у якому вводяться значення, що відповідають ординатам вхідного сигналу. Створити нову змінну і аналогічним чином увести ординати вихідного сигналу об'єкта. В результаті в робочому просторі програми повинно бути створено дві змінні у вигляді одномірних масивів однакового розміру та типу.

3. У вікні **Command Window** ввести команду **ident**. В результаті з'явиться головне вікно додатку System Identification Toolbox (рис. 2.1).

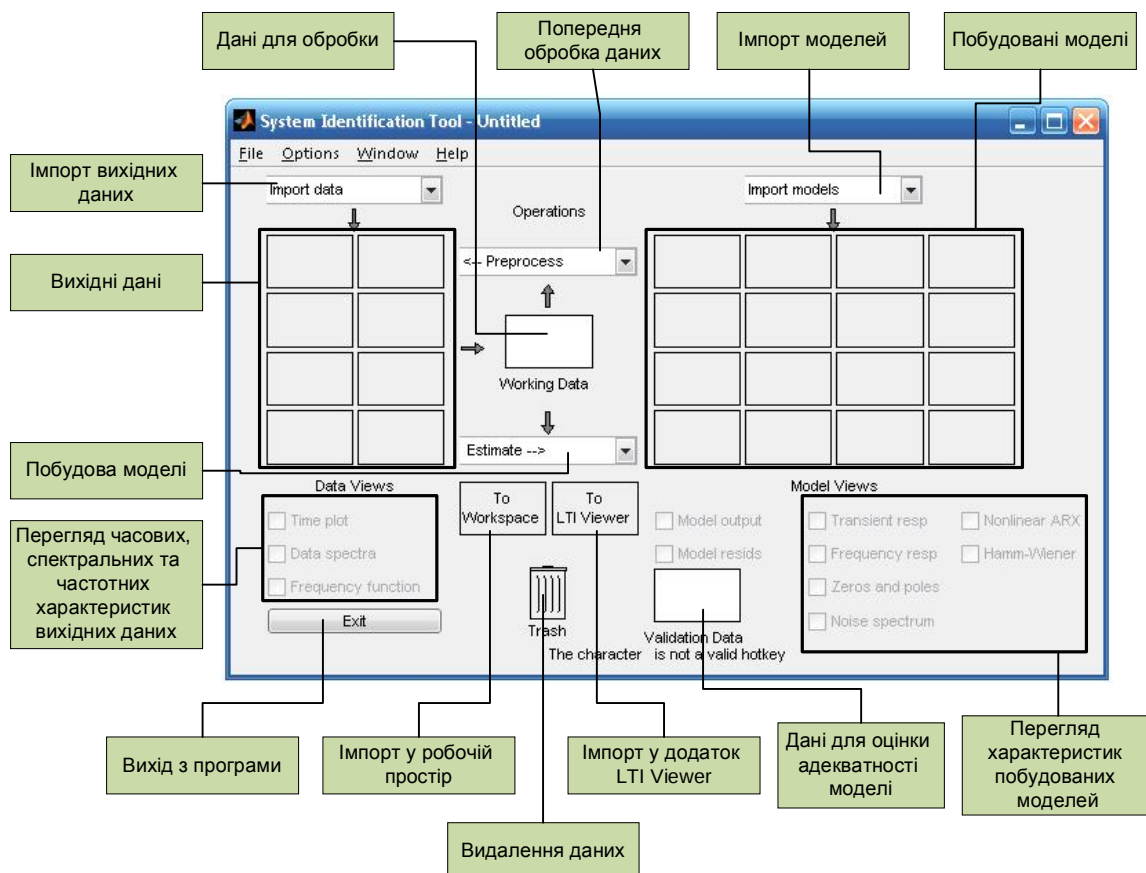


Рис. 2.1 – Головне вікно додатку System Identification Toolbox

Для імпорту вихідних даних необхідно у списки **Import Data** вибрати пункт **Time Domain Data...** У вікні **Import Data** (рис. 2.2) у розділі **Workspace Variable** вказати імена попередньо створених змінних: у полі **Input** – змінної, в якій зберігаються значення вхідного сигналу; у полі **Output** – змінної, в якій зберігаються значення вихідного сигналу. У розділі **Data Information** вказати ім'я множини даних (**Data name**), початкове значення часу (**Starting time**), та величину часового інтервалу (кроку) (**Sampling interval**). Введення даних завершується натисканням кнопки **Import**. Графік вихідних даних з'явиться у лівій частині вікна. Їх часові, спектральні та частотні характеристики можна переглянути встановивши відповідні прапорці у полі **Data Views**.

4. Для побудови моделі необхідно перетягнути іконку з графіком вихідних даних у поле **Working Data**. Потім у списку **Estimate** вибрати необхідний вид моделі. Моделі у вигляді передатних функцій відповідає пункт **Process Models....**

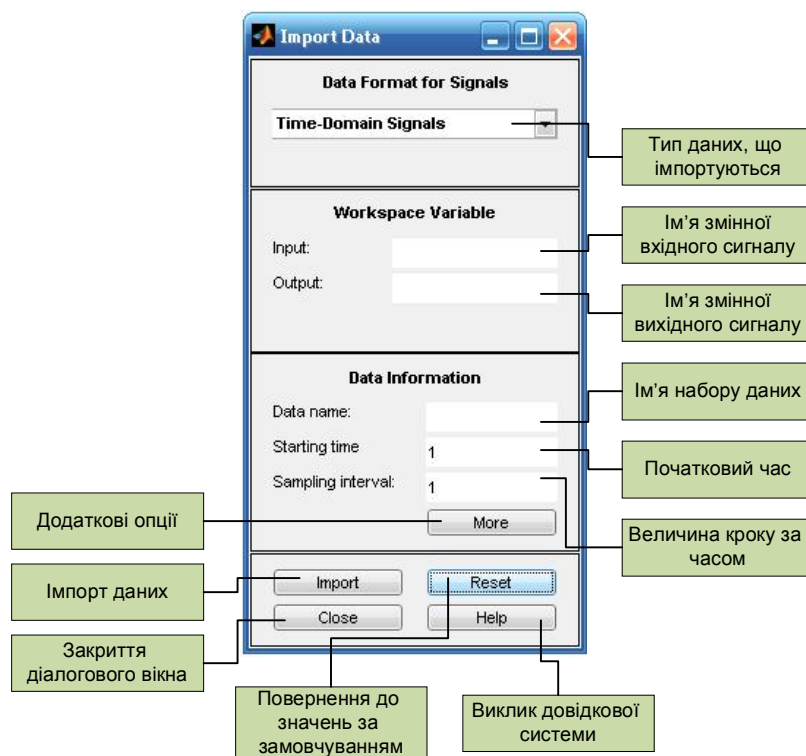


Рис. 2.2 – Вікно Import Data додатку System Identification Toolbox

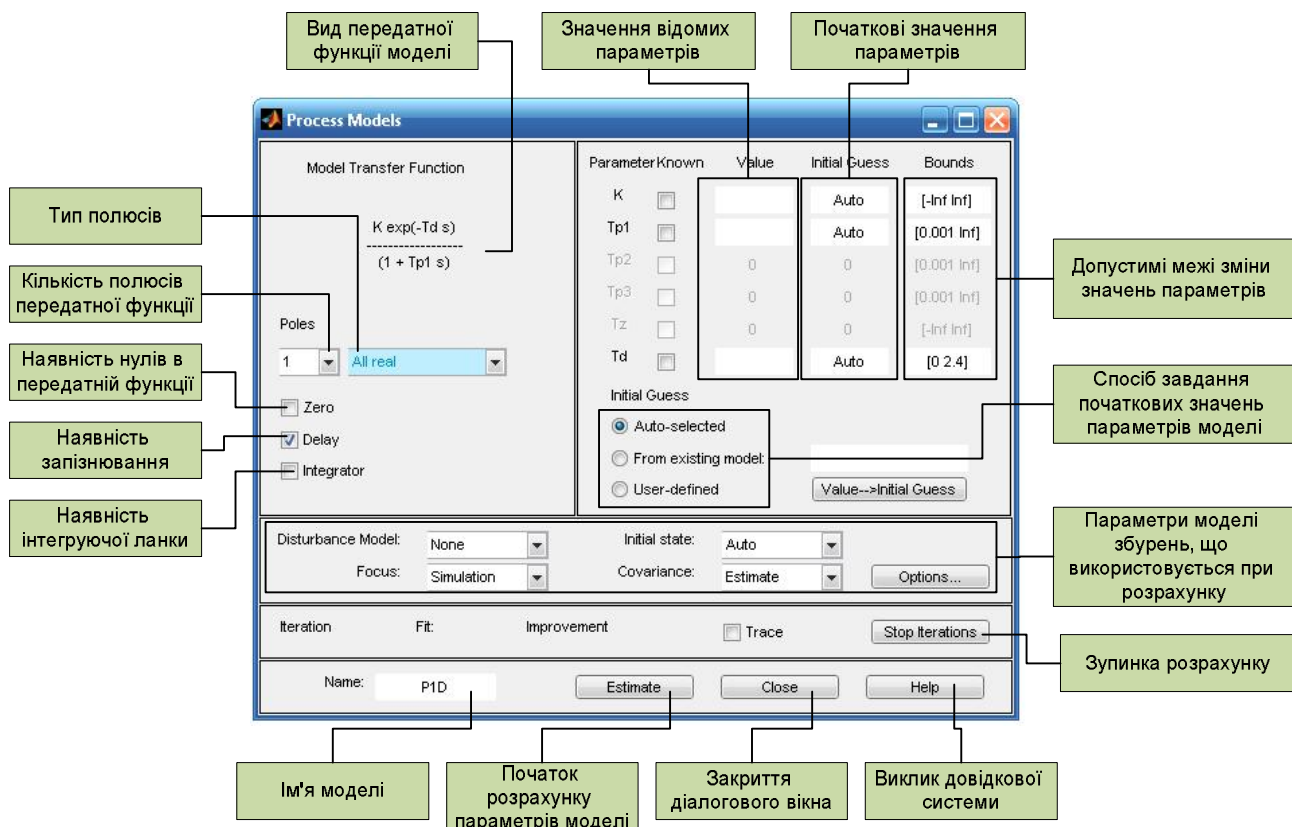


Рис. 2.3 – Вікно Process Models додатку System Identification Toolbox

При виборі цього пункту відкривається вікно **Process Models** загальний вигляд якого представлений на рис. 2.3. У розділі **Model Transfer Function** цього вікна показаний вид передаточної функції моделі об'єкта. Його можна змінити, шляхом змінення значень у списках **Poles** (кількість полюсів передаточної функції) та встановленням прапорців **Zero, Delay, Integrator** (наявність нулів передаточної функції, запізнювання та інтегруючої ланки відповідно). Також можна задати початкові значення параметрів функції, межі їх зміни, зафіксувати відомі значення. Пошук параметрів передаточної функції виконується шляхом натискання кнопки **Estimate**.

5. Отримана модель з'являється у полі **Model Views**. Інформацію про параметри передаточної функції можна отримати подвійним натисненням лівою кнопкою миші на значку моделі. Встановленням прапорця **Transient resp** можна переглянути перехідну характеристику отриманої моделі. При встановленні прапорця **Model Output** можна оцінити відповідність отриманої моделі введеним даним.

6. При необхідності можна повторити розрахунок вибравши інший вид передаточної функції.

2. Порядок виконання роботи

1. Підготувати вихідні дані для виконання лабораторної роботи: у прямокутній системі координат накреслити графік збурюючого впливу (у вигляді ступінчатого сигналу) і графік перехідного процесу, що виник під дією збурення. Занести в таблицю значення збурюючого впливу та вихідного сигналу в 25-30 точках, розділених однаковим часовим інтервалом.

2. Запустити програму MATLAB.

3. Створити у робочому середовищі програми змінні, в які занести значення збурюючого впливу та вихідного сигналу.

4. Запустити додаток System Identification Toolbox та імпортувати у нього введені дані.

5. На підставі вихідних даних побудувати 4-5 моделей у вигляді передатних функцій різного виду.

6. Порівняти отримані результати, зробити висновки.

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості.
3. Вихідні дані для виконання роботи.
4. Результати дослідження.
5. Висновки.

4. Контрольні запитання

1. Поняття моделювання.
2. Поняття ідентифікації.
3. Етапи ідентифікації.
4. Методика роботи з додатком Curve Fitting Toolbox.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Моделювання замкненої системи регулювання і підбір налаштувань ПІ-регулятора.

Мета роботи: отримати навички моделювання об'єктів управління та систем регулювання у пакеті Simulink

1. Теоретична частина

1.1 Моделювання об'єктів управління

1.1.1 Постановка задачі

Більшість об'єктів управління можуть бути описані лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами. На прикладі об'єкту, що описується диференціальним рівнянням другого порядку, розглянемо всі етапи моделювання і аналізу властивостей об'єкту. розглянемо об'єкт, у якого вхідним параметром є витрата пари u_n , кг/год, а вихідною величиною – температура x , °C (рис. 3.1).

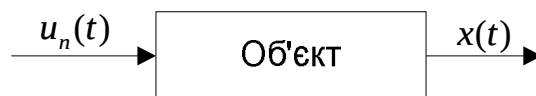


Рис. 3.1 – Модель об'єкта керування

Припустимо, що в результаті експериментів по дослідженню динаміки об'єкту отримано наступне диференціальне рівняння, що описує залежність $x(t)$ від вхідного параметру $u_n(t)$:

$$256 \frac{d^2 x}{dt^2} + 118 \frac{dx}{dt} + 7x = 5u_n.$$

Функція $u_n(t)$ має бути відомою функцією часу. Мають бути задані також початкові умови. Припустимо, відомо, що в початковий момент часу температура об'єкту $x|_{t=0} = 128^\circ\text{C}$ і відбувалося охолодження з швидкістю

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = -1.6 \frac{^\circ\text{C}}{\text{мин}}.$$

Таким чином, необхідно розв'язати на ЕОМ наступне рівняння:

$$256 \frac{d^2 x}{dt^2} + 118 \frac{dx}{dt} + 7x = 5u_n, \quad (3.1)$$

за початкових умов:

$$x|_{t=0} = 128, \quad (3.2)$$

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = -1.6. \quad (3.3)$$

1.1.2 Метод пониження порядку похідною

Розв'язати диференціальне рівняння – означає отримати функцію $x(t)$, що змінюється у часі. Для складання структурної схеми розв'язання застосуємо метод пониження порядку похідної, який зводиться до п'яти етапів.

Етап I. Розв'яжемо диференціальне рівняння (3.1) щодо вищої похідної

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -0.46 \frac{dx}{dt} - 0.027x + 0.02u_n. \quad (3.4)$$

Етап II. Припустивши (рис. 3.2), що в точці **A** значення d^2x/dt^2 відоме у будь-який момент часу, за допомогою інтегруючої ланки і з урахуванням початкових умов (ПУ) отримаємо у точці **B** значення dx/dt . Потім, за допомогою ще одного інтегратора, у точці **C** отримаємо значення шуканої функції $x(t)$.

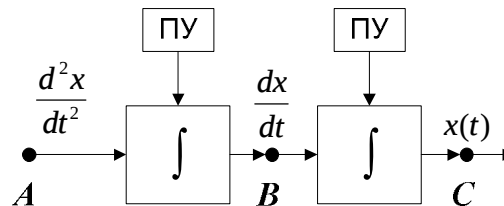


Рис. 3.2 – Схема реалізації методу пониження порядку похідної (етап II)

Етап III. Звернемо тепер увагу на праву частину рівняння (1.4). Вона є сумою трьох функцій часу dx/dt , $x(t)$, $u_n(t)$, узятих з постійними коефіцієнтами. Функція $u_n(t)$ – відома функція часу по умові завдання.

Припустимо (мал. 3.3), що нам відомі функції $x(t)$ в точці **C1** і dx/dt в точці **B1**. Тепер, підсумувавши їх з коефіцієнтами, відповідними правій частині (1.4), отримаємо другу похідну d^2x/dt^2 . Таким чином, на виході суматора, в точці **A1**, буде величина d^2x/dt^2 , відома у будь-який момент часу.

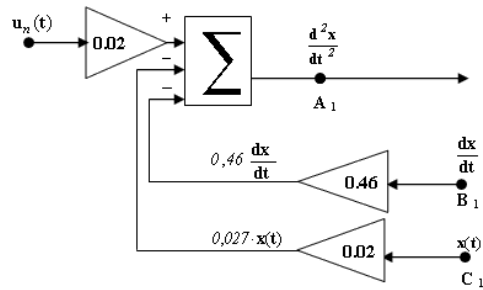


Рис. 3.3 – Схема реалізації методу пониження порядку похідної (етап III)

Етап IV. Рівність (1.4), яка походить з фізичної суті модельованого об'єкту, вимагає, щоб вона (ця рівність) виконувалася в кожен момент часу t . Реалізувати цю вимогу легко – достатньо замкнути схеми, показані на рис. 3.2 і 3.3. При цьому зіллються: крапки A і $A1$, B і $B1$, C і $C1$ (рис. 3.4).

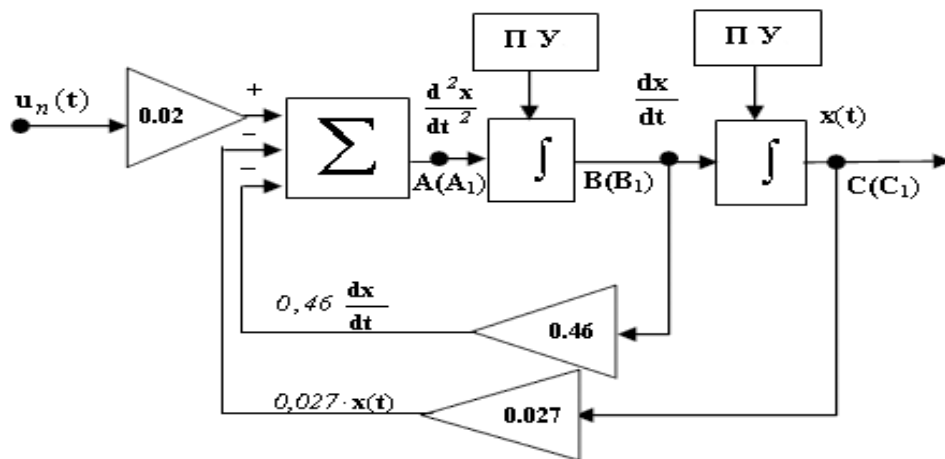


Рис. 3.4 – Схема реалізації методу пониження порядку похідної (етап IV)

Етап V. Встановити початкові умови, які визначають єдиність розв'язку диференціального рівняння.

1.2 Робота з пакетом Simulink

Пакет Simulink запускається натисненням кнопки  у командному вікні MATLAB (рис. 3.5).

При запуску Simulink відкриється вікно бібліотеки модулів (**Simulink Library Browser**), рис. 3.6. Після натиснення на кнопку **New** з'явиться вікно, в якому створюється блок-схема моделі. При виконанні завдання знадобляться джерела сигналів (**Sources**), приймачі сигналів (**Sinks**) і деякі з лінійних ланок (**Linear**) – підсилювачі, інтегратори, суматори. Виклик набору елементів того або іншого типу здійснюється подвійним клацанням на відповідній іконці у вікні **Simulink Library Browser**.

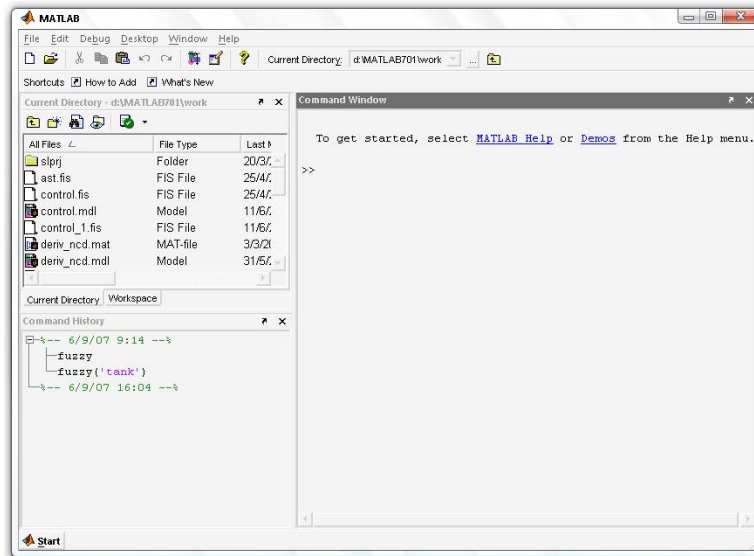


Рис. 3.5 – Командне вікно MATLAB

Зовнішній вигляд елементів, що найбільш часто використовуються, показаний в таблиці 3.1. Щоб зібрати схему, спочатку необхідно "перетягнути" всі потрібні ланки з відповідних наборів у поле вікна **untitled**. Для моделювання схеми, показаної на рис. 3.4 будуть необхідні: джерело стрибкоподібного збурення, суматор, три підсилювачі, два інтегратори, два джерела постійного сигналу (для завдання початкових умов) і осцилограф. У результаті на структурній схемі моделі будуть поміщені всі необхідні елементи, рис. 3.7.

Тепер необхідно зв'язати між собою ці ланки.

Для цього натиснути ліву кнопку миші на виході потрібної ланки. При цьому покажчик прийме вид перехрестя. Потім, не відпускаючи кнопки, "тягнути" лінію, що з'явилася, до входу іншої ланки. Коли покажчик прийме вид подвійного перехрестя, відпустити кнопку. Система створить зв'язок між елементами і позначить його стрілкою по напрямку сигналу. Якщо підвести лінію від входу елемента до іншої, що вже існує, лінії зв'язку і відпустити кнопку миші, то система створить вузол, в якому сигнал розходиться в двох напрямках.

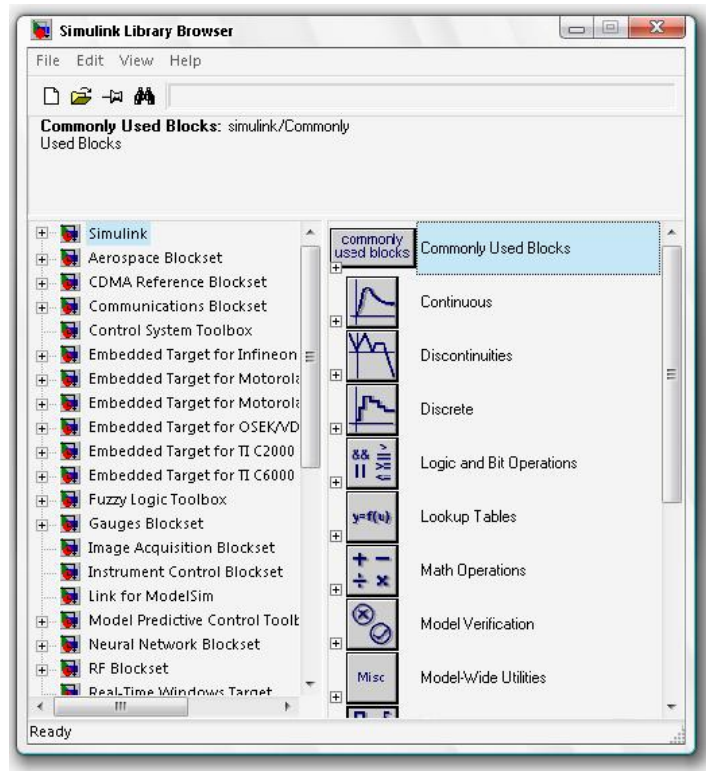
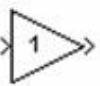
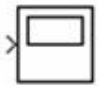
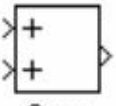
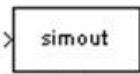
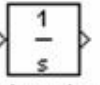


Рис. 3.6 – Бібліотеки модулів Simulink

Таблиця 3.1 – Основні блоки пакету Simulink

Джерела (Sources)	Лінійні блоки (Linear)	Приймачі (Sinks)
Джерело постійного сигналу  Constant	Підсилювач  Gain	Осцилограф  Scope
Джерело стрибкоподібного збурення  Step	Суматор  Sum	Пам'ять  To Workspace
З файлу  From File	Інтегратор  Integrator	У файл  To File

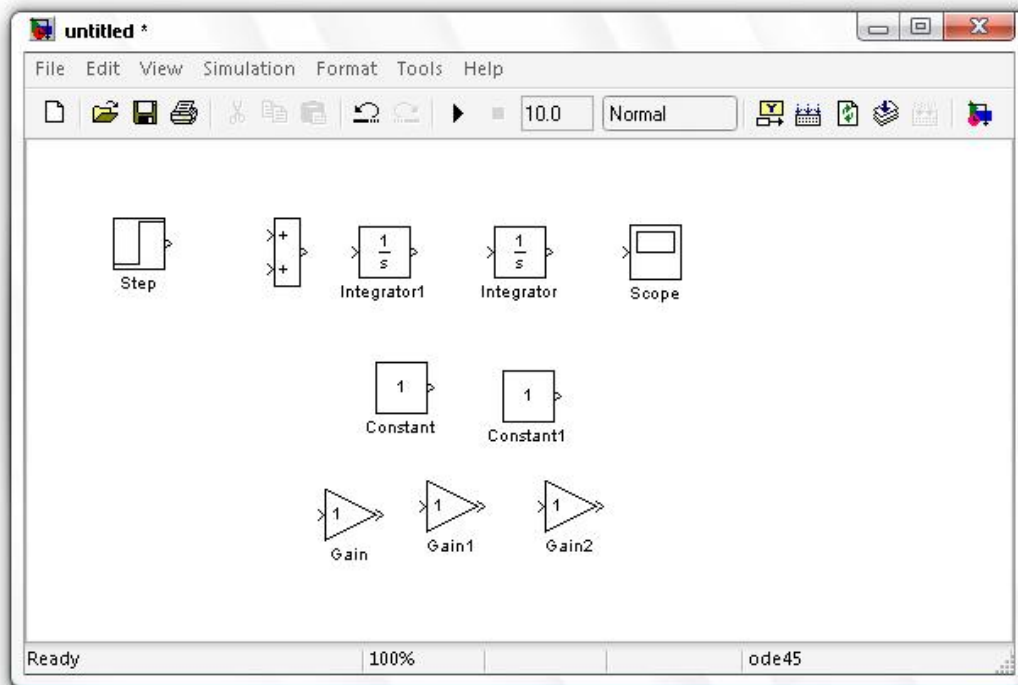


Рис. 3.7 – Вікно побудови моделі

Якщо необхідно перевернути ланку, то його спочатку виділити одинарним клацанням миші (з'являться крапки по кутах елементу). Потім, натискаючи **Ctrl+R**, добитися потрібного розташування.

Лінії зв'язку, як і елементи, видаляють виділенням і натисненням **Del**. Виділений зв'язок позначається двома порожніми крапками на її кінцях.

Переміщення цілої групи елементів "з витягуванням ліній зв'язку" здійснюється в два етапи. Спочатку виділяємо прямокутну область, яка охоплює потрібні вам елементи. При цьому всі елементи цієї області будуть "помічені". Потім, "схопивши" будь-який відмічений елемент з цієї області, переміщаємо його в потрібне місце і відпускаємо. В результаті перемістяться всі елементи відміченої області.

Для того, щоб у суматора встановити потрібну кількість входів (у нашому прикладі – три), роблять таким чином: подвійним клацанням на суматорі відкривають меню його властивостей. У рядку цього меню задають послідовність плюсів і мінусів, яка визначить кількість входів і знаки, з якими сигнали підсумовуватимуться. У нашому прикладі збурюючий сигнал підсумовується з позитивним знаком, а нульова і перша похідні – з негативними (комбінація " + - - ").

Щоб мати можливість задавати початкові умови від зовнішнього джерела, у властивостях інтеграторів, в меню **Initial condition source** вибирають **External**. Після цього на іконці інтегратора з'являється ще один вхід (нижній), на який і подають сигнал завдання початкової умови. У нашому прикладі це буде джерело постійного сигналу. Меню властивостей закривають натисненням кнопки **Apply** і потім кнопки **Close**.

Величину постійного сигналу задають у властивостях джерела (рядок **Constant value**). Величину коефіцієнта посилення задають у властивостях підсилювача (рядок **Gain**). Величину і час стрибкоподібного збурення задають у властивостях блока **Step**. Там визначають момент надходження збурення (рядок **Step time**), значення сигналу до і після збурення (рядки **Initial value** і **Final value** відповідно).

Остаточний вид готової блок-схеми моделі показаний на рис. 3.8.

Запуск моделі в роботу, тобто почало власне процесу моделювання проводиться натисненням кнопки  або через команду **Start** меню **Simulation**. Подвійне клацання на іконці осцилографа **Scope** відкриває його вікно, в якому можна спостерігати зміну вихідних змінних в часі (рис. 3.9).

Налаштування тривалості процесу моделювання проводиться в меню **Simulation** вікна побудови моделі. У цьому меню в закладці **Solver** можна виставити час початку процесу моделювання (поле **Start time**) і його кінця (поле **Stop time**).

Налаштування параметрів осцилографа здійснюється таким чином. При подвійному клацанні на іконці осцилографа з'являється його екран з координатною розміткою. Натискання правої кнопки "миші" на осі можна викликати контекстне меню, в якому необхідно вибрати пункт **Axes properties....** В вікні, що з'являється, встановлюються розміри по вертикальній осі (**Ymin**, **Ymax**). Кнопкою  на панелі інструментів осцилографа можна автоматично підібрати ступінь збільшення, при якому на осцилографі видно всі ділянки вже отриманих кривих без того. Зберегти налаштування осцилографа можна кнопкою . Розмітка осі абсцис (часу) встановлюється автоматично відповідно до величин **Start Time** і **Stop Time**.

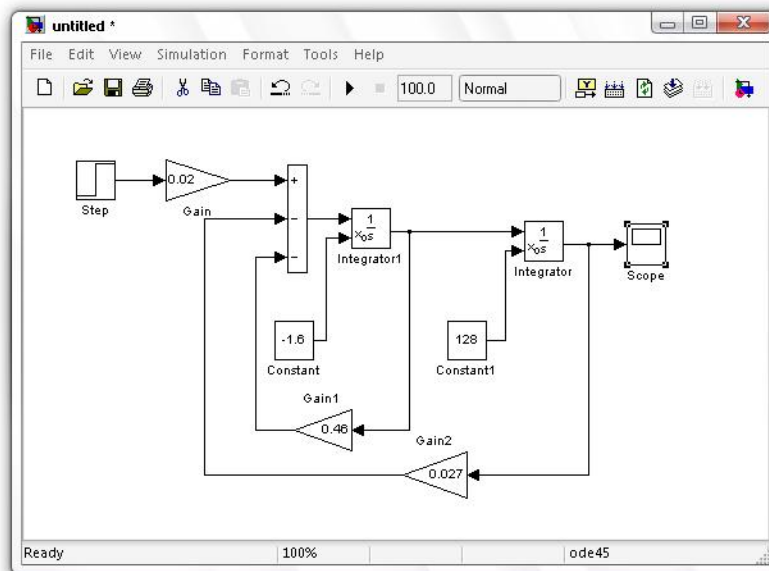


Рис. 3.8 – Simulink-модель схеми реалізації методу пониження порядку похідної

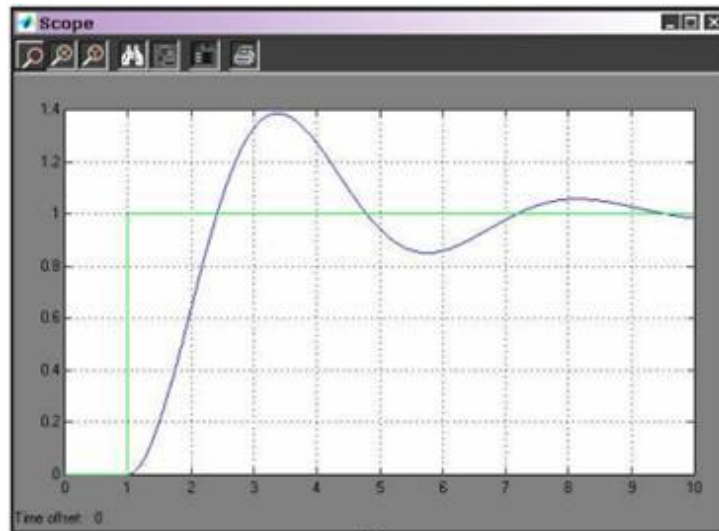


Рис. 3.9 – Вікно осцилографа Scope

Моделювання можна зупинити кнопкою **Pause**, на яку перетворюється кнопка запуску моделювання після її натиснення. Поряд, справа розташована кнопка повернення в початковий стан.

Simulink автоматично перетворить блок-схему моделі в систему диференціальних рівнянь. Вибір методу інтеграції цієї системи можна зробити через меню **Simulation**. На панелі **Solver options** можна також виставити крок інтеграції (ліве поле) і тип вирішувача (праве поле). За умовчанням виставлений автопідбір кроку (**Variable step**) і інтеграція методом Дорманда-Принца (**ode5 Dormand-Prince**). Там же можна виставити допустимі абсолютну і відносну погрішність інтеграції (поля **Absolute tolerance** і **Relative tolerance** відповідно).

Багатопроточний осцилограф виходить додаванням елементу - мультиплексора **Mux** з набору **Connections**, рис. 3.10. В цьому випадку можна спостерігати в одних координатах одночасно декілька сигналів. Подвійним клацанням миші на мультиплексорі відкривається меню його властивостей, де можна виставити кількість входів.

Запис кривих – результатів моделювання (для довготривалого зберігання і подальшого використання) здійснюється під'єднуванням на місце осцилографа, або паралельно з ним елементу **To File**, розташованого в наборі **Sinks** (рис. 3.10).

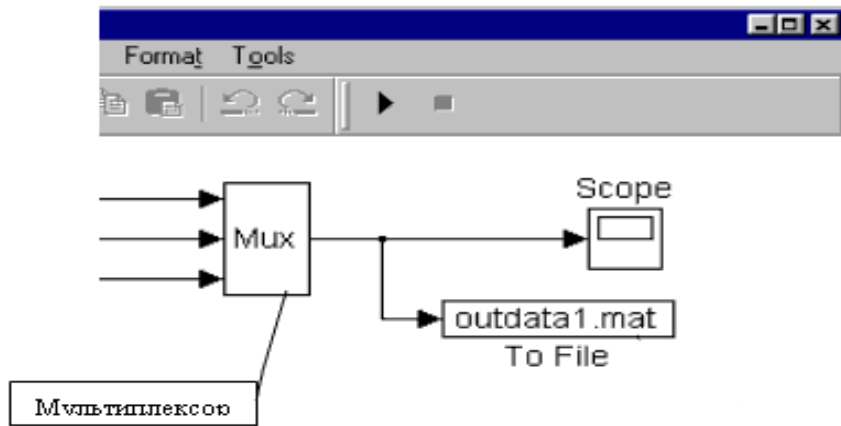


Рис. 3.10 – Збереження результатів моделювання

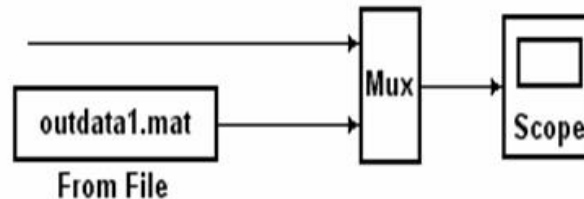


Рис. 3.11 – Завантаження результатів моделювання

У властивостях елементу **To File** необхідно задати ім'я файлу з розширенням "mat" (наприклад **outdata1.mat**), в який проводитиметься запис даних.

Порівняння вигляду нової кривої – результату тільки що проведеного моделювання – з даними, отриманими раніше, легко проводити за допомогою елементу **From File**. У властивостях елементу **From File** необхідно вказати конкретне ім'я файлу, в якому зберігаються дані.

Для збереження блок-схеми необхідно натиснути кнопку , розташовану на панелі інструментів вікна **untitled**. Якщо ви зберігаєте блок-схему перший раз, вам буде запропоновано ввести ім'я, під яким буде збережена ваша схема. При подальших збереженнях дані у файлі з вказаним ім'ям оновлюватимуться.

Завантаження раніше збереженої моделі здійснюється за допомогою кнопки  на панелі інструментів або відповідним пунктом меню **File**.

2. Порядок виконання роботи

1. Вивчити метод пониження порядку похідною, розробити модель в пакеті Simulink, що реалізовує даний метод для контрольного прикладу (рис. 3.4). Дослідити роботу отриманої моделі при різних значеннях початкових умов.

2. Розробити Simulink-модель, що реалізовує ПІ-закон регулювання. Дослідити роботу регулятора при різних значеннях налаштувань коефіцієнту підсилення і постійної часу інтегрування.

3. Розробити модель замкненої системи регулювання, що складається з об'єкту управління і ПІ-регулятора. Передатна функція об'єкту управління має вигляд:

$$W_{oy}(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-pt}.$$

Параметри передатної функції вибрати довільно у межах: $K = 1 \dots 7$, $T = 5 \dots 50$, $t = 5 \dots 15$. Для реалізації передатної функції використати блоки **Transfer Fcn** та **Transport Delay**. Розрахувати настройки регулятора одним з експрес-методів. Дослідити роботи розробленої моделі при подачі на вхід об'єкта збурення і при зміні завдання.

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості.
3. Розроблені Simulink-моделі.
4. Результати досліджень та графіки перехідних процесів.
5. Висновки.

4. Контрольні запитання

1. Метод пониження порядку похідної.
2. Робота з пакетом Simulink.
3. Склад бібліотек пакету Simulink.
4. Основні блоки пакету Simulink.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Параметричний синтез САУ накладенням обмежень на перехідний процес

Мета роботи: вивчення методу параметричної оптимізації САУ з накладенням обмежень на перехідний процес.

1. Теоретична частина

Інструментальний пакет Simulink Response Optimization надає в розпорядження користувача графічний інтерфейс для налаштування параметрів динамічних об'єктів, що забезпечують бажану якість перехідних процесів. Як засіб для досягнення зазначеної мети приймається оптимізаційний підхід, що забезпечує мінімізацію функції штрафу за порушення динамічних обмежень. За допомогою даного інструмента можна налаштовувати параметри нелінійної Simulink-моделі, у якості яких може бути заявлена будь-яка кількість змінних, включаючи скаляри, вектори і матриці. Особливу значимість має та обставина,

що в процесі настроювання можуть враховуватися невизначеності параметричного типу математичної моделі, що дозволяє синтезувати робастні закони керування.

Завдання динамічних обмежень здійснюється у візуальному режимі. На базі цих обмежень пакет Simulink Response Optimization автоматично генерує задачу кінцевомірної оптимізації так, щоб точка екстремуму в просторі параметрів, що настроюються, відповідала виконанню усіх вимог до якості процесу.

1.1 Математична постановка задачі

Одним з окремих випадків завдання показників якості при параметричній оптимізації є накладення обмежень безпосередньо на перехідний процес, а саме - введення функцій, що визначають допустиму область для $y_i(t)$:

$$y_i(t) - L_i(t) \leq y_i(x, q, t) \leq y_i(t) + H_i(t), \quad (4.1)$$

де $y_i(t)$ - необхідне значення вихідної величини.

Критерій оптимізації для такої задачі може бути записаний у записаний у вигляді:

$$I = \int_{t_H}^{t_K} ((y_i - L_i)^2 + (y_i - H_i)^2) dt \rightarrow \min_{q \in \Omega}, \quad (4.2)$$

де q – вектор параметрів настроювання, Ω – область припустимих параметрів, L_i та H_i – функції, що задають верхню та нижню межі обмежень накладених на перехідний процес.

Структурна схема системи параметричної оптимізації САУ з накладенням обмежень безпосередньо на перехідний процес представлена на рис 4.1. На рисунку прийняті наступні позначення: $y(t)$ – вихідна величина об'єкту управління, $e(t)$ – сигнал розбалансу, $u(t)$ – сигнал управління, I – значення критерію оптимізації, q – вектор параметрів регулятора, $y_{\text{зад}}$ – сигнал завдання, $W(t)$ - детерміноване збурення, α_i, β_i – вагові коефіцієнти.

1.2 Склад системи

До системи параметричного синтезу побудованої на основі пакету Simulink Response Optimization входять наступні структури САУ:

- одноконтурна САУ;
- каскадна САУ з двома регуляторами;
- двоімпульсна САУ з введенням похідної з проміжної точки;
- комбінована САУ.

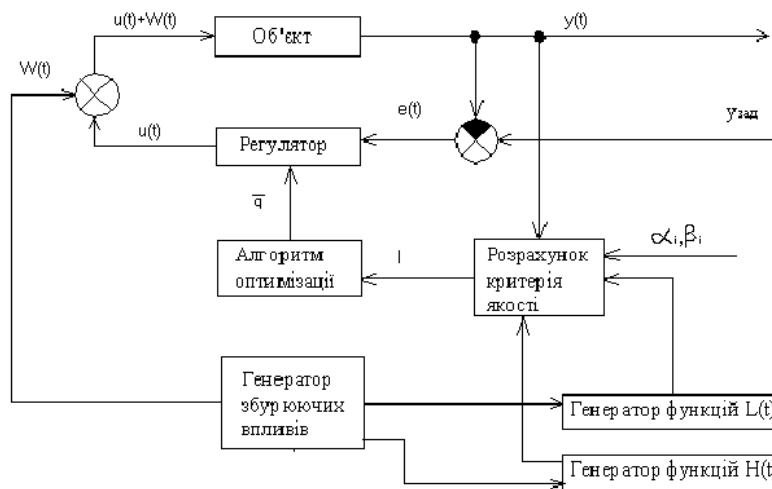


Рис. 4.1 – Структурна схема системи параметричної оптимізації з накладенням обмежень на перехідний процес

Система працює у середовищі MATLAB з встановленим пакету Simulink Response Optimization і складається з наступних файлів:

- `odnokont_ncd.mat` – файл робочого середовища MATLAB в якому зберігаються всі змінні для одноконтурної САУ;
- `kaskad_ncd.mat` – файл робочого середовища MATLAB в якому зберігаються всі змінні для каскадної САУ з двома регуляторами;
- `deriv_ncd.mat` – файл робочого середовища MATLAB в якому зберігаються всі змінні для двоімпульсної САУ з введенням похідної з проміжної точки;
- `komb_ncd.mat` – файл робочого середовища MATLAB в якому зберігаються всі змінні для комбінованої САУ.
- `odnokont_ncd.mdl` – Simulink-модель одноконтурної САУ;
- `kaskad_ncd.mdl` – Simulink-модель каскадної САУ з двома регуляторами;
- `deriv_ncd.mdl` – Simulink-модель двоімпульсної САУ з введенням похідної з проміжної точки;
- `komb_ncd.mdl` – Simulink-модель комбінованої САУ.

Структури файлів робочого середовища зображено на рис. 4.2.

В лівій колонці вікон на рис. 4.2 показані змінні, що повинні бути створені в робочому середовищі MATLAB для забезпечення вірної роботи системи.

Змінні `tout`, `yout`, `ans`, `OPT_STEP`, `OPT_STOP` та `ncdStruct` є службовими. Змінювати значення цих змінних користувачеві не рекомендується.

Змінні `Kp`, `Kp2`, `Ti`, `Ti2` – задають параметри ПІ-закону керування (`Kp` та `Ti` – для одноконтурної САУ та для зовнішнього контуру каскадної САУ, `Kp2` та `Ti2` – для внутрішнього контуру каскадної САУ). Користувач повинен задати початкові значення цих змінних шляхом подвійного натискання лівої кнопки “миші” на обраній змінній.

Name	Size	Bytes	Class
Kp	1x1	8	double array
OPT_STEP	0x0	0	double array
OPT_STOP	0x0	0	double array
Ti	1x1	8	double array
ans	1x12	96	double array
ncdStruct	1x1	1960	struct array
tout	65x1	520	double array
yout	65x1	520	double array

Name	Size	Bytes	Class
Kp	1x1	8	double array
Kp2	1x1	8	double array
OPT_STEP	0x0	0	double array
OPT_STOP	0x0	0	double array
Ti	1x1	8	double array
Ti2	1x1	8	double array
ncdStruct	1x1	2468	struct array
tout	296x1	2368	double array
yout	296x1	2368	double array

Name	Size	Bytes	Class
Kp	1x1	8	double array
OPT_STEP	0x0	0	double array
OPT_STOP	0x0	0	double array
Td1	1x1	8	double array
Td2	1x1	8	double array
Ti	1x1	8	double array
ncdStruct	1x1	1954	struct array
tout	1000x1	8000	double array
yout	1000x1	8000	double array

Name	Size	Bytes	Class
Kp	1x1	8	double array
OPT_STEP	0x0	0	double array
OPT_STOP	0x0	0	double array
Td1	1x1	8	double array
Td2	1x1	8	double array
Ti	1x1	8	double array
ncdStruct	1x1	1952	struct array
tout	104x1	832	double array
yout	104x1	832	double array

Рис. 4.2 – Структури файлів робочого середовища

Змінні Td1 та Td2 – задають параметри диференціюючої ланки в комбінованій САУ та в двоімпульсній САУ з введенням похідної з проміжної точки. Користувач повинен задати початкові значення цих змінних шляхом подвійного натискання лівої кнопки “миші” на обраній змінній.

Simulink-моделі всіх вказаних структур САУ зображені на рис. 4.3 – 4.6.

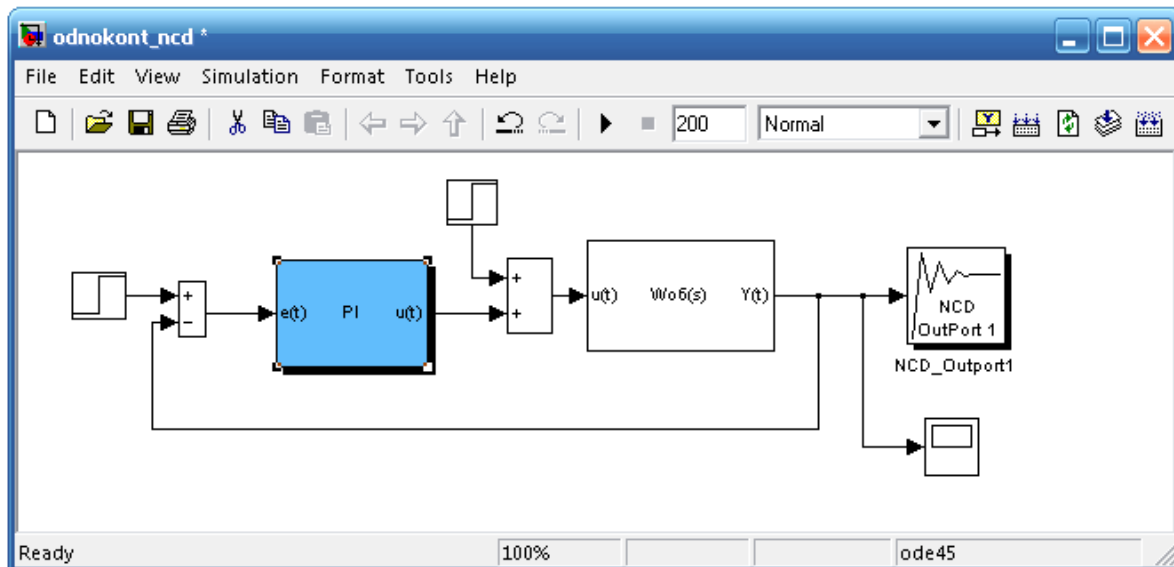


Рис. 4.3 – Simulink-модель одноконтурної САУ

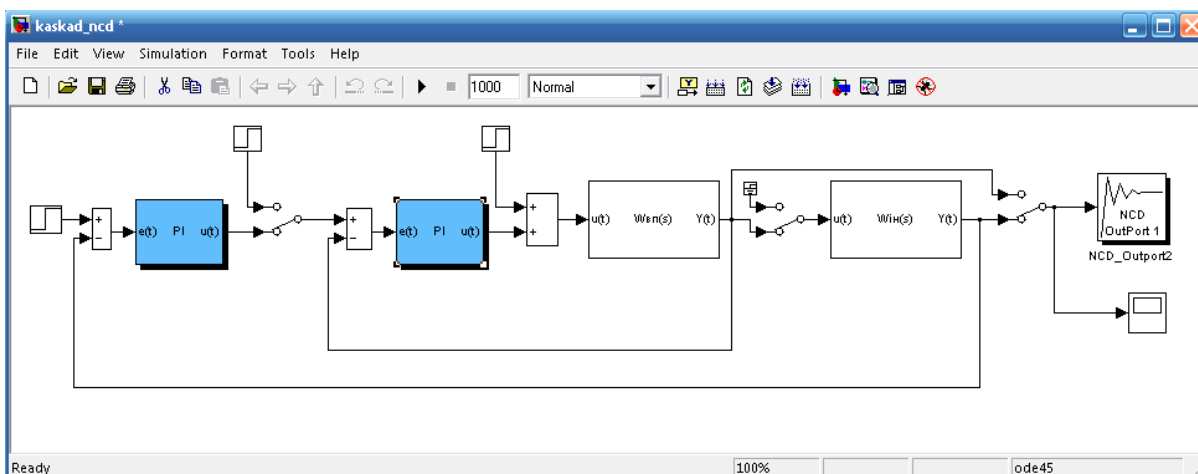


Рис. 4.4 – Simulink-модель каскадної САУ з двома регуляторами

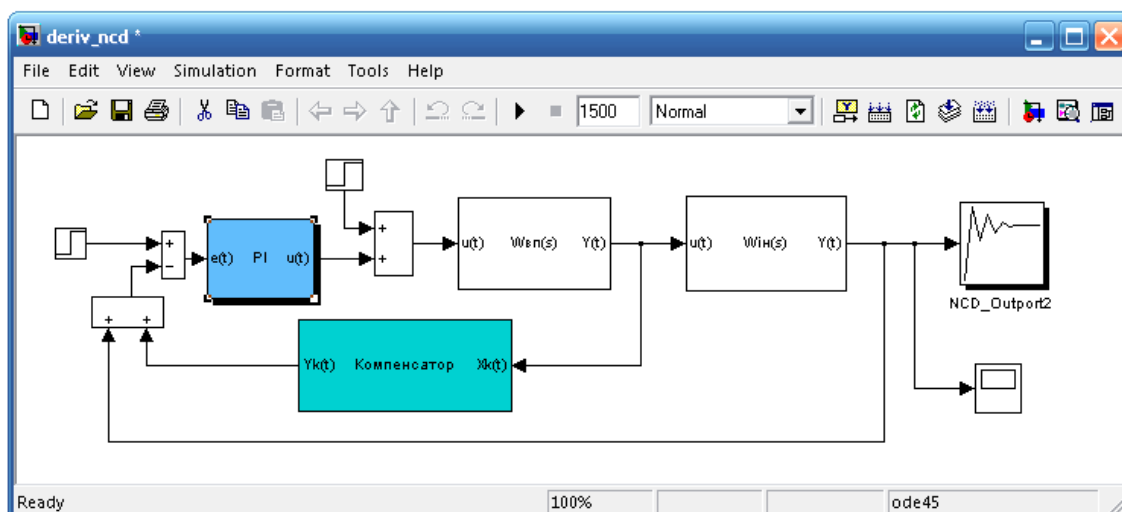


Рис. 4.5 – Simulink-модель двоїмпульсної САУ з введенням похідної з проміжної точки

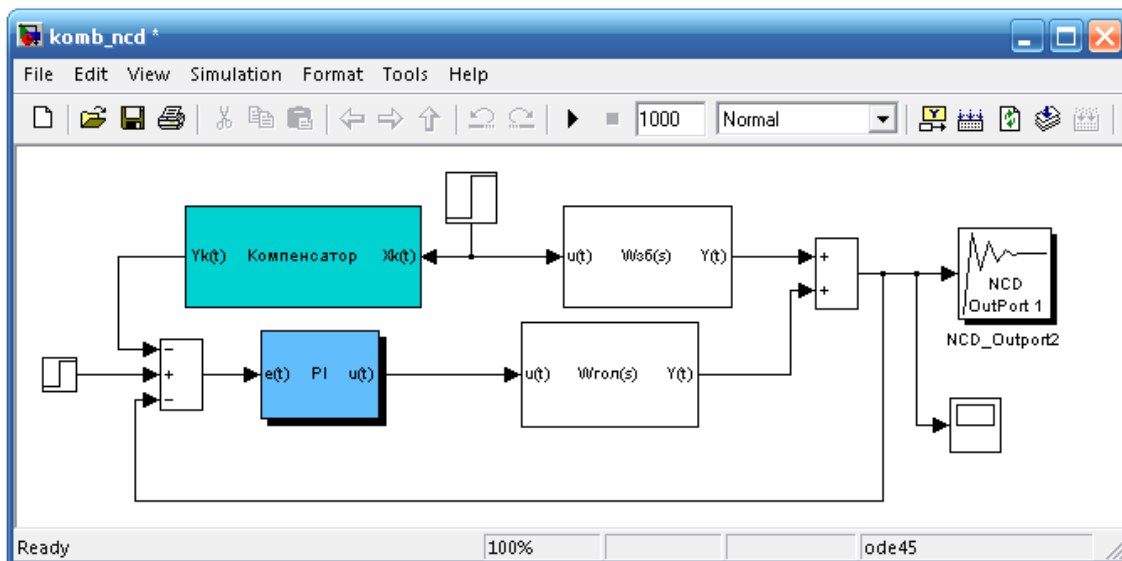


Рис. 4.6 – Simulink-модель комбінованої САУ

1.3 Методика роботи з системою

Для роботи в системі необхідно виконати наступні кроки:

1. Запустити пакет MATLAB.
2. Відкрити файл робочого простору MATLAB відповідний для обраної структури САУ. При цьому вікно Workspace прийме один з виглядів представлених на рис. 4.2.
3. У вікні Workspace задати початкові параметри закону регулювання у відповідності до обраної структури САУ (для одноконтурної САУ задаються K_p та T_i); для каскадної САУ з двома регуляторами – K_p , T_i , K_{p2} , T_{i2} ; для двоімпульсної САУ з введенням похідної з проміжної точки K_p , T_i , T_{d1} , T_{d2} ; для комбінованої САУ - K_p , T_i , T_{d1} , T_{d2}).
4. Відкрити один з файлів Simulink-моделей САУ відповідно до обраної структури САУ.
5. Задати об'єкт керування за допомогою стандартних блоків Simulink.
6. Для каскадної САУ задати контур, що настроюватиметься. Це можна зробити шляхом переведення блоків ручного перемикавання (див. рис. 4.4) в потрібне положення: верхнє – внутрішній контур, нижнє – зовнішній контур.
7. В Simulink-моделі відкрити блок NCD_Outport.
8. Задати необхідний вид обмежень на перехідний процес в САУ.
9. Задати параметри закону регулювання, що підлягають оптимізації, верхні та нижні межі їх зміни, інтервал дискретизації та точність досягнення обмежень. Слід зазначити, що інтервал дискретизації рекомендується встановлювати в межах 1..2 % від часу моделювання. Система готова до оптимізації.

1.4 Блок NCD_Outport

При подвійному натисканні лівої кнопки “миші” на блоці **NCD_Outport** на екран буде виведено вікно (рис. 4.7), в якому користувач задає його настройки та може здійснювати параметричну оптимізацію.

За допомогою “миші” користувач може встановити бажаний коридор перехідного процесу. Це здійснюється шляхом переміщення обмежуючих ліній по графічній області. Якщо користувачеві недостатньо кількості ліній для побудови необхідного коридору, він може “розбити” будь-яку лінію, за допомогою команди **Split** (обирається з контекстного меню лінії, що викликається шляхом натискання правої кнопки “миші” на ній). Для точного встановлення ліній коридору користувачеві потрібно натиснути праву кнопку “миші” на будь-якій лінії коридору і в контекстному меню вибрати команду **Edit**. При цьому на екрані з'явиться вікно (рис. 4.8), в якому і задаються координати лінії коридору.

Зміна підписів під осями часу та вихідної координати Y , а також їх діапазонів здійснюється за допомогою пункту меню **Edit** → **Axes Properties...**

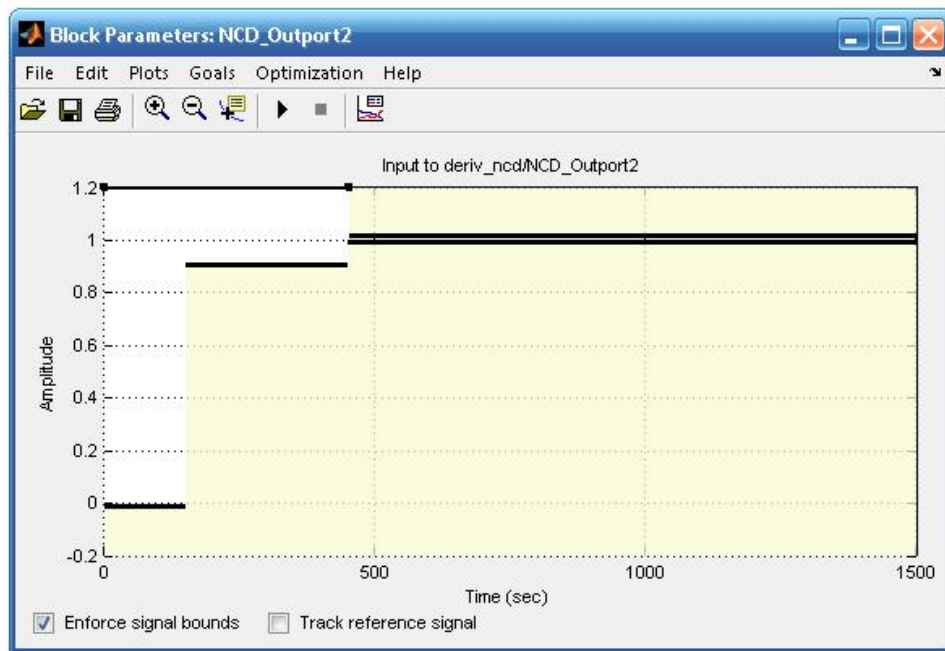


Рис. 4.7 – Вікно NCD_Outport

Користувач може зберігати та завантажувати побудовані коридори до/з файлу робочого простору MATLAB (*.mat). Крім того, до цього файлу заносяться і параметри (**Tuned Parameters**), що підлягають оптимізації, нестаціонарні параметри об'єкту керування (**Uncertain Parameters**), тощо. Завантаження та збереження файлів на диску здійснюється за допомогою меню **File**.

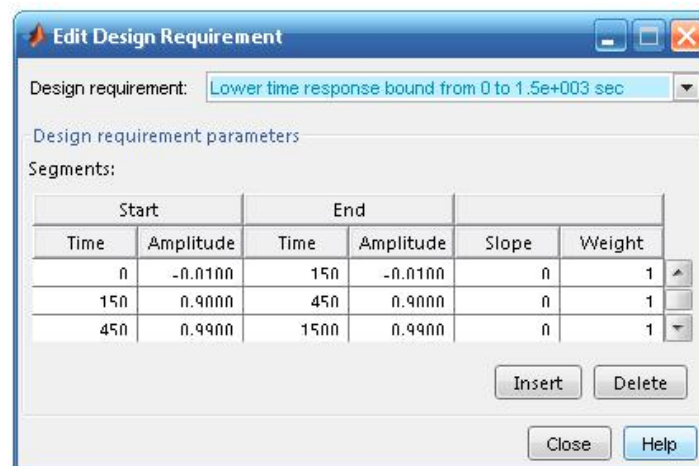


Рис. 4.8 – Вікно Edit Design Requirement

Для здійснення оптимізації користувач повинен задати параметри, що оптимізуються. Для цього на екран необхідно вивести вікно **Tuned Parameters** (вибрати пункт меню **Optimization** → **Tuned Parameters...**) яке представлено на рис. 4.9.

В цьому вікні користувач задає параметри закону регулювання (**Tuned Parameters**), що підлягають оптимізації, межі їх зміни (**Minimum, Maximum**), початкове значення (**Initial guess**). Для того, щоб задати параметри, що оптимізуються, необхідно натиснути кнопку **Add...**, у вікні **Add parameters** виділити необхідні змінні та натиснути кнопку **OK**.

Після завдання всіх необхідних параметрів користувач може приступити до параметричної оптимізації обраної структури САУ шляхом натискання кнопки  у вікні **NCD_Outport** (рис. 4.7).

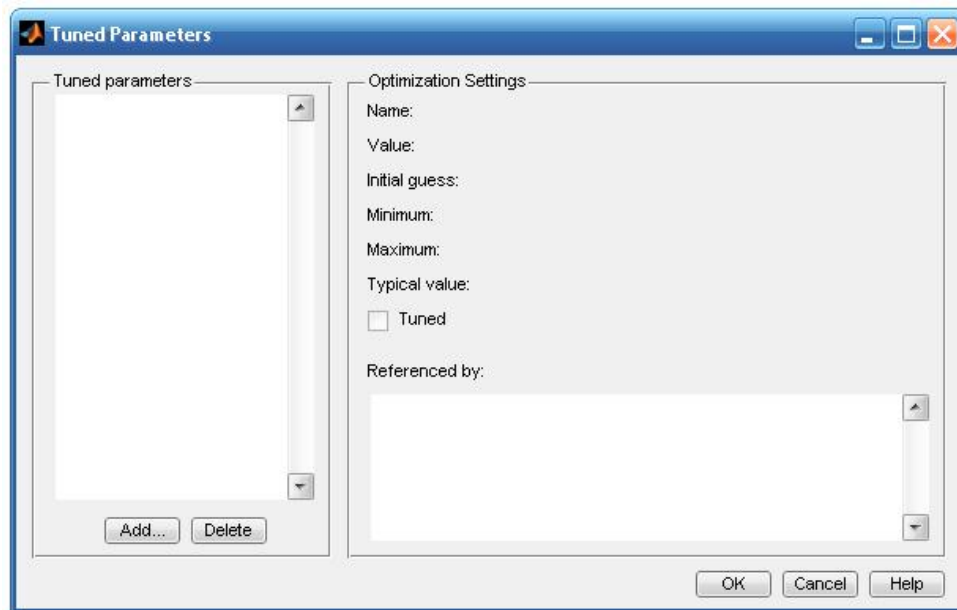


Рис. 4.9 – Вікно Tuned Parameters

1.5 Контрольні приклади

Параметричну оптимізацію всіх чотирьох типів САУ розглянемо на конкретних прикладах.

В якості об'єкту управління оберемо передатну функцію виду:

$$W_{OB}(p) = \frac{K_{OB} e^{-t_{OB}p}}{T_{OB}p + 1} = \frac{3.5e^{-5p}}{50p + 1}. \quad (4.3)$$

В усіх системах в якості регуляторів оберемо ПІ-регулятори.

Одноконтурна САУ

Задамося початковими параметрами ПІ-закону регулювання:

- $K_p = 4$;
- $T_i = 20$.

Відкриваємо файл `odnokont_ncd.mat`. У вікні робочого простору MATLAB для відповідних змінних K_p та T_i вводимо їх значення $K_p = 4$; $T_i = 20$. Це і будуть початкові параметри ПІ-регулятора.

Відкриваємо файл `odnokont_ncd.mdl`. Задаємо сигнал завдання регулятора та сигнал збурення. Для цього шляхом подвійного натискання лівою кнопкою миші на блоках **Step**, що формують ці сигнали, відкриваємо вікно налагодження їхніх властивостей. У полі **Final Value** цього вікна встановлюємо значення: для блока, що формує завдання регулятора – 1; для блока що формує сигнал збурення – 0. Відкриваємо вікно **NCD_Outport**. В цьому вікні задаємо коридори обмежень як показано на рис. 1.10. У вікні **Tuned Parameters** задаємо назви параметрів ПІ-регулятора: **Kp Ti**. В графі **Minimum** задаємо **0**. В графі **Maximum** нічого не задаємо.

У вікні **NCD_Outport** натискаємо кнопку . По закінченню процесу оптимізації у вікні **Optimization Progress** будуть виведені значення параметрів регулятора.

Оптимізація параметрів ПІ-закону регулювання дала наступні їх значення:

- $K_p = 3.01$;
- $T_i = 19.7$.

Перехідні процеси в САУ для початкових значень параметрів об'єкту керування представлені на рис. 4.10. (Темним кольором зображено графік перехідного процесу до оптимізації)

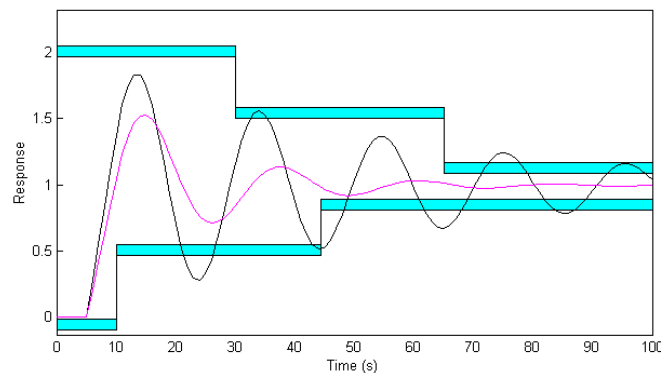


Рис. 4.10 – Перехідні процеси в одноконтурній САУ до і після оптимізації параметрів ПІ-регулятора

Каскадна САУ з двома регуляторами

Налагодження каскадної САУ будемо провадити в два етапи. Спочатку будемо знаходити оптимальні параметри ПІ-регулятора швидкодіючого (внутрішнього) контуру при відключеному інерційному (зовнішньому). Після налагодження ПІ-регулятора швидкодіючого контуру будемо налагоджувати ПІ-регулятор інерційного контуру при працюючому швидкодіючому. Такий підхід забезпечує більш якісне налагодження ніж варіювання параметрами ПІ-регуляторів обох контурів одразу. До того ж, такий підхід забезпечує вдале налагодження при досить невдало обраних початкових значеннях параметрів закону регулювання.

Задамося початковими параметрами ПІ-регулятора внутрішнього контуру:

- $K_{P2} = 0.1$;
- $T_{I2} = 100$.

Відкриваємо файл `kaskad_ncd.mat`. У вікні робочого простору MATLAB для відповідних змінних K_{P2} та T_{I2} вводимо їх значення $K_{P2} = 0.1$; $T_{I2} = 100$ ($K_I = 1/T_I$). Це і будуть початкові параметри ПІ-регулятора внутрішнього контуру.

Відкриваємо файл `kaskad_ncd.mdl`. В ньому встановлюємо всі три перемикачі у верхнє положення. Задаємо сигнал завдання регуляторів та сигнал збурення. Для цього шляхом подвійного натискання лівою кнопкою миші на блоках **Step**, що формують ці сигнали, відкриваємо вікно налагодження їхніх властивостей. У полі **Final Value** цього вікна встановлюємо значення: для блока, що формує завдання регуляторів – 1; для блока що формує сигнал збурення – 0. Відкриваємо вікно **NCD_Output**. В цьому вікні задаємо коридори обмежень як показано на рис. 4.11. У вікні **Tuned Parameters** в графі **Tunable Variables** задаємо назви параметрів ПІ-регулятора внутрішнього контуру: **Kp2 Ti2**.

У вікні `NCD_Output` натискаємо кнопку . По закінченню процесу оптимізації у вікні `Optimization Progress` будуть виведені значення параметрів регулятора.

Оптимізація параметрів ПІ-регулятора внутрішнього контуру дала наступні їх значення:

- $K_{P2} = 1.1$;
- $T_{I2} = 38.1$.

Перехідні процеси в САУ для початкових значень параметрів об'єкту керування представлені на рис. 4.11. (Темним кольором зображено графік перехідного процесу до оптимізації)

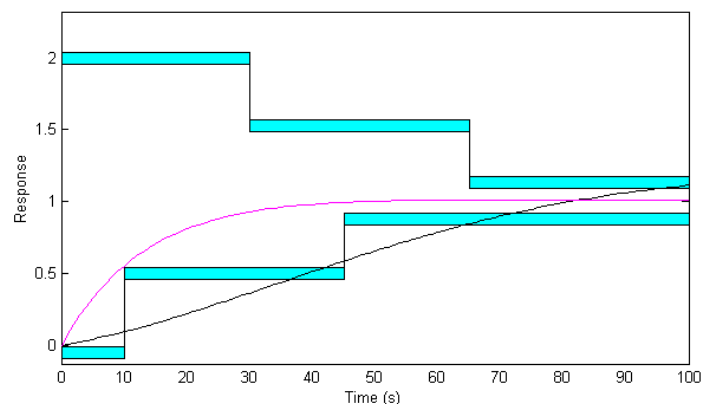


Рис. 4.11– Перехідні процеси в каскадній САУ до і після оптимізації параметрів ПІ-регулятора внутрішнього контуру

Тепер перейдемо до налагодження ПІ-регулятора зовнішнього контуру.

Задамося початковими параметрами ПІ-регулятора зовнішнього контуру (параметри налагодження ПІ-регулятора внутрішнього контуру взято оптимальні):

- $K_{P1} = 0.1$;

- $T_{I1} = 10$.

В файлі `kaskad_ncd.mdl` встановлюємо всі три перемикачі у нижнє положення.

У вікні робочого простору MATLAB для відповідних змінних **Kp** та **Ti** вводимо їх значення $K_p = 0.1$; $T_i = 0.1$. Це і будуть початкові параметри ПІ-регулятора зовнішнього контуру.

У вікні **Tuned Parameters** задаємо назви параметрів ПІ-регулятора внутрішнього контуру: **Kp Ti**.

У вікні **NCD_Output** натискаємо кнопку **Start**. По закінченню процесу оптимізації у вікні **Optimization Progress** будуть виведені значення параметрів регулятора.

Оптимізація параметрів ПІ-регулятора зовнішнього контуру дала наступні їх значення:

- $K_{P1} = 1.34$;

- $T_{I1} = 7.8$.

Перехідні процеси в САУ для початкових значень параметрів об'єкту керування представлені на рис. 4.12. (Темним кольором зображено графік перехідного процесу до оптимізації)

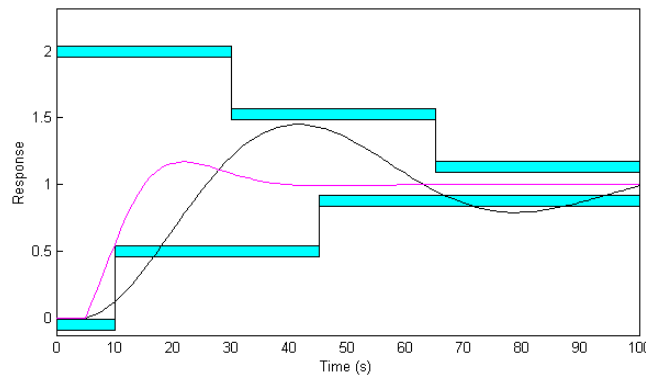


Рис. 4.12 – Перехідні процеси в каскадній САУ до і після оптимізації параметрів ПІ-регулятора зовнішнього контуру

Двоїмпульсна САУ з введенням похідної з проміжної точки та комбінована САУ

Параметрична оптимізація цих двох структур дуже подібна оптимізації одноконтурної САУ, з тією лиш різницею, що у вікні **Tuned Parameters** також задаються параметри диференціатора T_{d1} T_{d2} . Таким чи-

ном для цих двох структур оптимізація проводиться одразу по всіх чотирьох параметрах(K_p , T_i , T_{d1} та T_{d2}).

2. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з програмою параметричного синтезу САУ з накладенням обмежень на перехідний процес.

2. Виконати розрахунки для контрольних прикладів (див. п. 1.5).

3. Для свого варіанту (див. п. 3) розрахувати початкові значення параметрів регуляторів (за допомогою експрес-методів) та виконати розрахунок оптимальних параметрів за допомогою програми параметричного синтезу САУ для звичайного ПІ-регулятора та для ПІ-регулятора зі змінною пропорційною складовою (тільки в одноконтурній САУ).

4. Дослідити вплив початкових умов (початкових значень параметрів регуляторів) на процес оптимізації.

5. Дослідити вплив значення періоду квантування на процес оптимізації.

6. Зробити висновки.

3. Варіанти завдань

№ варіанту	САУ, що досліджуватиметься
1	1. САУ рівня води в акумуляторному баці деаератора ДП-1000 (ПІ-регулятор та ПІ-регулятор зі змінною П-частиною) 2. САУ температурного режиму водогрійного котла ПТВМ-50
2	1. САУ рівня води в акумуляторному баці деаератора ДП-1000 (ПІ-регулятор та ПІ-регулятор зі змінною П-частиною) 2. САУ температурного режиму водогрійного котла ПТВМ-50
3	1. САУ рівня води в акумуляторному баці деаератора ДП-1000 (ПІ-регулятор та ПІ-регулятор зі змінною П-частиною) 2. САУ пароперегрівника парогенератора ТП-47
4	1. САУ рівня води в акумуляторному баці деаератора ДП-1000 (ПІ-регулятор та ПІ-регулятор зі змінною П-частиною) 2. САУ прямоточного парогенератора ПК-38 дубль-блока 150 МВт

Примітка : Кожна з сталих часу об'єктів керування модифікується шляхом додавання $2 \cdot N$ секунд, де N – номер варіанту. Кожна з сталих часу транспортного запізнення об'єктів керування модифікується шляхом додавання N секунд, де N – номер варіанту. Налаштування проводиться по каналу "збурення – вихід". Зняти перехідні процеси в САУ по каналу "збурення - вихід" до і після оптимізації параметрів.

САУ тиску в колонці деаератора ДП-1000

Регулювання тиску здійснюється зміною витрати пари на вході в деаератор. Структура такої САУ є одноконтурною. Передатна функція об'єкту керування по каналу "витрата пари – тиск в колонці деаератора" має наступний вигляд:

$$W_{OB}(p) = \frac{3,5}{50p+1} \cdot e^{-5p}.$$

САУ температурного режиму водогрійного котла ПТВМ-50

Температура прямої мережевої води регулюється зміною витрати палива. Структура такої САУ є каскадною з двома регуляторами. Передатна функція швидкісної частини об'єкта управління, а саме каналу "відсоток ходу регулюючого органу на газопроводі палива – витрата палива, м³/с" має вигляд:

$$W_{ШВ} = \frac{1}{(20 \cdot p + 1)(20 \cdot p + 1)}.$$

Передатна функція інерційної частини об'єкта управління, а саме каналу "відсоток ходу регулюючого органу на газопроводі палива – температура мережевої води, °С" має наступний вигляд:

$$W_{IH} = \frac{1,5}{(80 \cdot p + 1)(30 \cdot p + 1)} e^{-30 \cdot p}.$$

САУ пароперегрівника парогенератора ТП-47

Структура САУ пароперегрівника парогенератора є двоконтурною з введенням похідної з проміжної точки. Передатна функція швидкісної частини об'єкта управління має вигляд:

$$W_{ШВ} = \frac{1}{(20 \cdot p + 1)(2,2 \cdot p + 1)}.$$

Передатна функція інерційної частини об'єкта управління має вигляд:

$$W_{IH} = \frac{1}{(57,6 \cdot p + 1)(12,9 \cdot p + 1)} e^{-30 \cdot p}.$$

САУ прямооточного парогенератора ПК-38 дубль-блока 150 МВт

Регулювання вологості пари за перехідною зоною здійснюється зміною витрати палива в топку парогенератора. В структуру САУ вводиться пристрій введення впливу від зовнішнього збурення по витраті живильної води. Структура такої САУ є комбінованою. Передатна функція по основному каналу ("паливо – вологість") має вигляд:

$$W_{П-В} = \frac{1}{9700 \cdot p^3 + 1590 \cdot p^2 + 71 \cdot p + 1}.$$

Передатна функція по каналу ("живильна вода – вологість") має вигляд:

$$W_{Ж.В.-В} = \frac{1}{1320 \cdot p^2 + 70 \cdot p + 1}.$$

4. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості.
3. Вихідні дані та постановка задачі параметричного синтезу.

4. Simulink-модель САУ, що досліджувалась.
5. Результати дослідження та графіки перехідних процесів в САУ.
6. Висновки.

5. Контрольні запитання

1. Призначення пакету Simulink Response Optimization.
2. Постановка задачі оптимального параметричного синтезу з накладенням обмежень на перехідний процес.
3. Структурна схема системи параметричної оптимізації САУ з накладенням обмежень на перехідний процес.
4. Склад системи параметричної оптимізації.
5. Методика роботи з системою.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Параметричний синтез САУ з допомогою оптимізації методом Хука-Дживса

Мета роботи: вивчення методу параметричного синтезу САУ з допомогою оптимізації методом Хука-Дживса з інтегрально-квадратичним критерієм.

1. Теоретична частина

1.1 Постановка задачі оптимізації

На практиці важливе значення має автоматизація процесу налаштування параметрів регуляторів на стадії проектування і під час експлуатації промислових САУ. Останнє обумовлено тим, що фіксовані параметри налаштування не завжди забезпечують задані якісні показники ведення технологічного процесу внаслідок змін режимів роботи машин і апаратів, їхніх характеристик і параметрів, що призводять відповідно до зміни статичних і динамічних властивостей САУ. Зазначені задачі вирішуються автоматичними системами оптимізації та адаптації.

Методи аналізу і синтезу, засновані на моделюванні й оптимізації, є досить універсальними, вони можуть використовувати будь-який опис системи, лінійний чи нелінійний, неперервний чи дискретний, будь-яку комбінацію диференціальних, різницевих, алгебраїчних чи логічних рівнянь. Така універсальність вимагає додаткового часу для обчислень. Для реалізації цього підходу також необхідно відповідне програмне забезпечення.

Засоби моделювання використовують для визначення сигналу помилки $e(t)$ у системі з регулятором. Для цього сигналу помилки і (чи) вихідного сигналу системи може бути обраний критерій, на основі якого оптимізують параметри регулятора. Таким чином, для будь-якої лінійної чи нелінійної системи і будь-якої структури регулятора можна використовувати необхідний критерій у сполученні з обмеженнями кінцевої і нескінченної розмірності, представленими у вигляді функцій штрафу.

Оптимізація є засобом проектування. Вона не дозволяє безпосередньо розрахувати параметри регулятора. Вирішення оптимізаційної задачі визначає оптимальні настройки регулятора, що залежать від обраного критерію, структури регулятора і незмінних параметрів регулятора.

Одна з можливих математичних постановок задачі оптимального параметричного синтезу САУ може бути представлена наступним чином:

Передатна функція об'єкту керування:

$$W_{OK} = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0} g e^{-t p}, \quad m > n. \quad (5.1)$$

Критерій оптимальності:

$$I = \int_{t_n}^{t_k} f(a, y_{em}(t), y(t), y^*(t), u(t), t) \cdot dt \rightarrow \min_q. \quad (5.2)$$

Рівняння регулятора:

$$u(t) = f(e(t), \bar{q}). \quad (5.3)$$

Сигнал розбалансу:

$$e(t) = y_{зад}(t) - y(t), \quad (5.4)$$

де y, y_m – вихідні величини об'єкту і еталонної моделі, $\bar{q}$ – вектор параметрів регулятора, a – параметр критерію якості.

Оптимальний синтез САУ може проводитись з використанням еталонної моделі для завдання бажаного перехідного процесу, ідеальної еталонної моделі.

Бажані показники якості можуть бути задані також за допомогою коефіцієнтів критерію оптимізації, або шляхом введення допустимих меж для перехідних процесів вихідних змінних чи змінних стану системи регулювання.

Для рішення задачі параметричного синтезу регулятора одним з найбільш придатних методів є метод Хука-Дживса та його модифікації. Суть цього методу полягає в наступному. Задаються деякою початковою точкою $\bar{q}[0]$. Змінюючи компоненти вектора $\bar{q}$, обстежують область навколо даної точки, у результаті чого знаходять напрямок, у якому відбувається зменшення критерію I . В обраному напрямку здійснюють спуск доти, доки значення функції зменшується. Після того як у даному напрямку не вдається знайти точку з меншим значенням функції, зменшують величину кроку. Якщо послідовні дроблення кроку не приводять до зменшення функції, від обраного напрямку спуска відмовляються і здійснюють нове обстеження околиці і т.д.

Структурна схема системи параметричної оптимізації з еталонною моделлю (ЕМ) представлена на рис. 5.1.

При заданих початкових значеннях параметрів регулятора на вхід системи подається сигнал $Y^*(t)$, або $\lambda_v(t)$, наприклад у вигляді ступінчатої функції,

розраховують величину критерію оптимізації $I(Y, Y_M)$, значення якого надходить в алгоритм оптимізації, за допомогою якого розраховується нове значення $q_i^{(k)}$ на черговому кроці K оптимізації.

Для дослідження методу параметричного синтезу використовується програма OptSim в середовищі MATLAB.

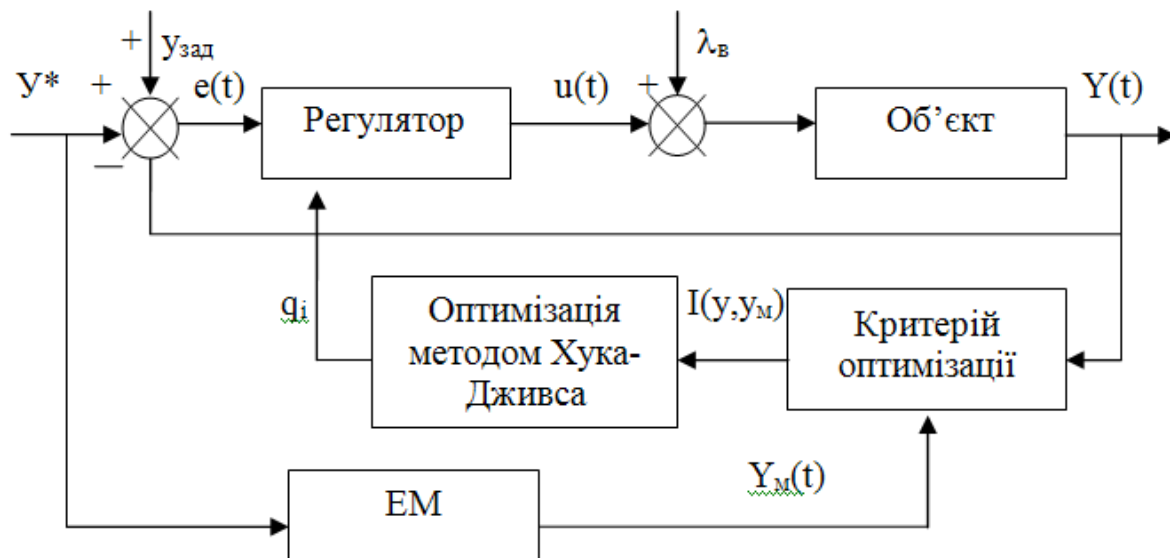


Рис. 5.1 – Структурна схема системи параметричної оптимізації з еталонною моделлю

1.2 Робота з програмою OptSim

1.2.1 Функції програми

1. Виконання розрахунків оптимальних параметрів настроювання одно контурних САУ, каскадних, комбінованих, САУ з введенням похідної з проміжної точки об'єкту.

2. Дослідження процесів оптимізації з використанням інтегральних критеріїв різного виду. Для реалізації цієї функції передбачена візуалізація перехідних процесів $Y(t)$, а також $q_i(k)$, $I(k)$, де k – номер кроку розрахунку.

3. Багатоваріантні дослідження САУ з метою вибору закону керування або структури САУ.

1.2.2 Структура програмного забезпечення

Структура програмного забезпечення зображена на рис. 5.2.

Програма складається з трьох основних блоків: блоку моделювання, розрахункової частини, блоку візуалізації (рис. 5.2).

Блок моделювання цілком реалізований у вигляді Simulink-схеми. Такий підхід збільшує наочність, а також дозволяє моделювати об'єкти та регулятори практично будь-якої складності.

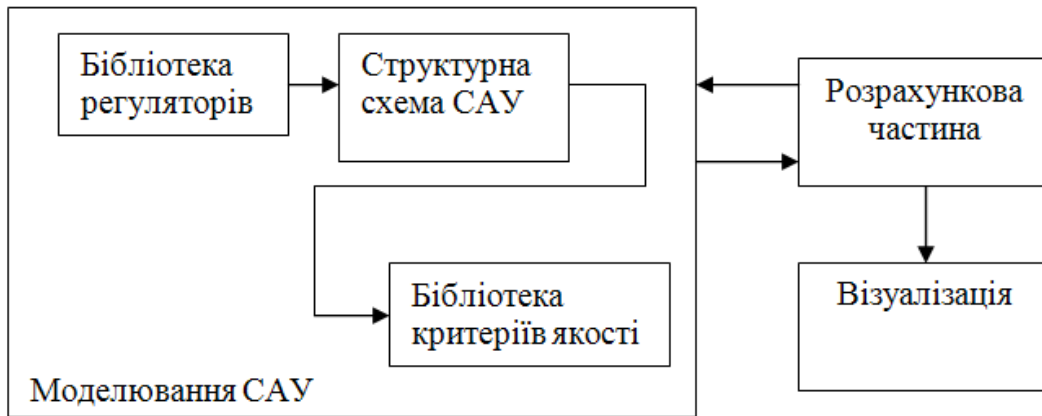


Рис. 5.2 – Структура програми

Розрахункова частина написана на інтегрованій в пакет Matlab мові програмування, в ній реалізовано пошук оптимальних параметрів САУ.

В блоці візуалізації реалізовано відображення поточної та кінцевої інформації.

1.2.3 Склад системи

В програму входять наступні структури САУ:

- одноконтурна САУ;
- каскадна САУ з двома регуляторами;
- двоімпульсна САУ з введенням похідної з проміжної точки;
- комбінована САУ.

В цих системах можуть бути використані такі закони регулювання:

- ПІ;
- ПІД;
- ПП напівпропорційний закон регулювання;
- ПІ з відключенням І – складової;
- ПІ зі змінною структурою;
- адаптивний ПІД.

Оптимізація може проводитися за таким критеріями:

$$1. I = \int_{t_n}^{t_k} e^2 \cdot t^a \cdot dt$$

$$2. I = \int_{t_n}^{t_k} |e| \cdot t^a \cdot dt$$

$$3. I = \int_{t_n}^{t_k} e^2 \cdot dt$$

$$4. I = \int_{t_n}^{t_k} |e| \cdot \exp(a \cdot t) \cdot dt$$

$$5. I = \int_{t_n}^{t_k} \Delta u^2(t) \cdot dt$$

$$6. I = \int_{t_n}^{t_k} (e^2 + r \cdot u^2) \cdot dt$$

$$7. I = \int_{t_n}^{t_k} (Y_M - Y_{об})^2 \cdot dt$$

Система працює під керівництвом пакету MATLAB і складається з наступних файлів:

- `OptSim_fig.m` – файл з текстом програми на інтегрованій в пакет MATLAB мові;

- `OptSim_fig.fig` – файл в якому зберігається інформація о формі окна програми;

- `odnokont.mdl` – Simulink-модель одноконтурної САУ;

- `kaskad.mdl` – Simulink-модель каскадної САУ з двома регуляторами;

- `deriv.mdl` – Simulink-модель двоімпульсної САУ з введенням похідної з проміжної точки;

- `komb.mdl` – Simulink-модель комбінованої САУ.

Загальний вид вікна програми показано на рис. 5.3.

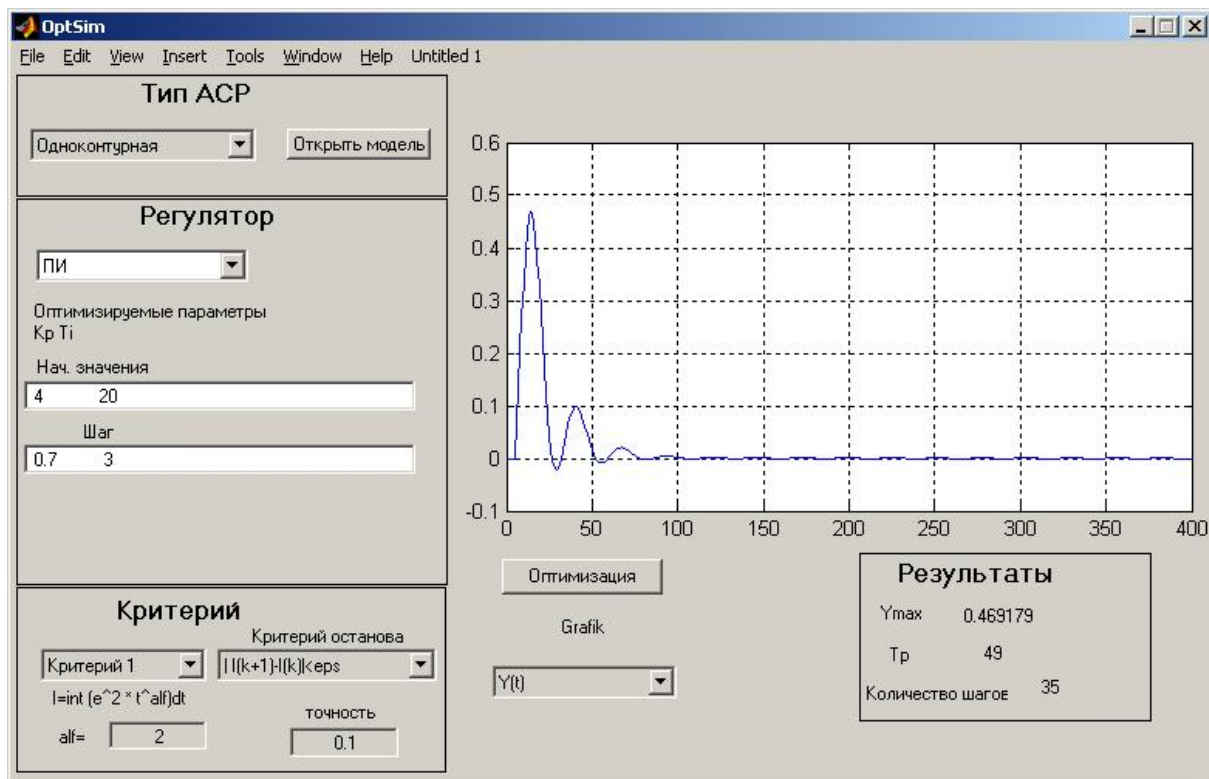


Рис. 5.3 – Загальний вид вікна програми

Simulink-моделі всіх вказаних структур САУ зображені на рис. 5.4 – 5.7.

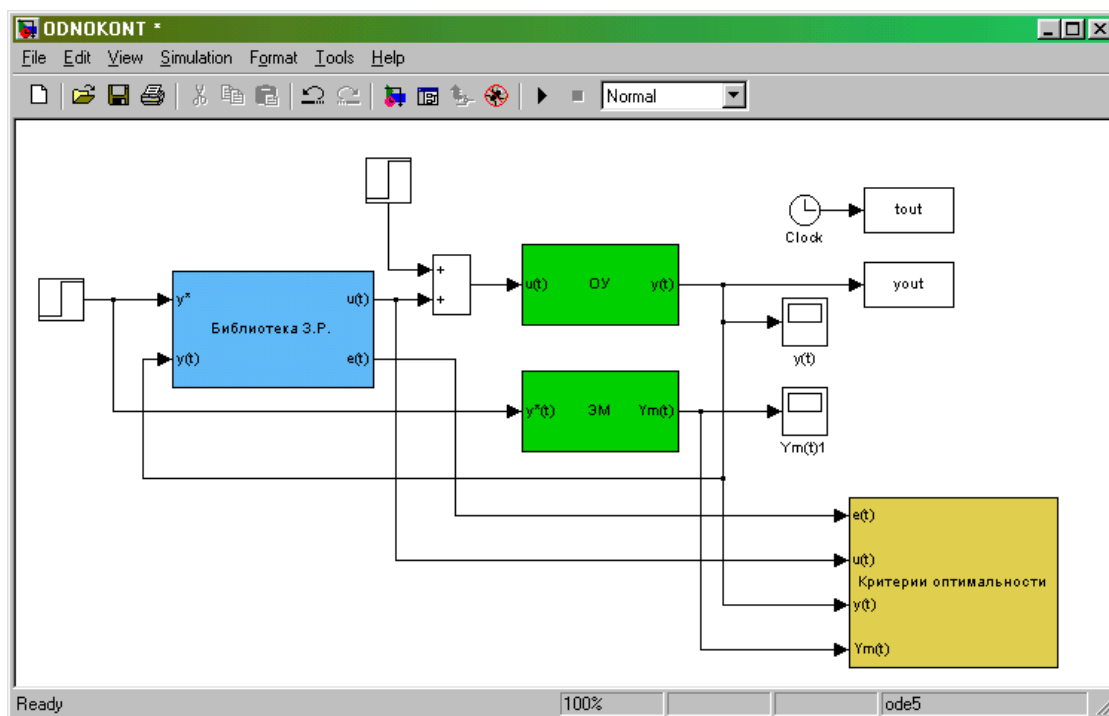


Рис. 5.4 – Simulink-модель одноконтурної САУ

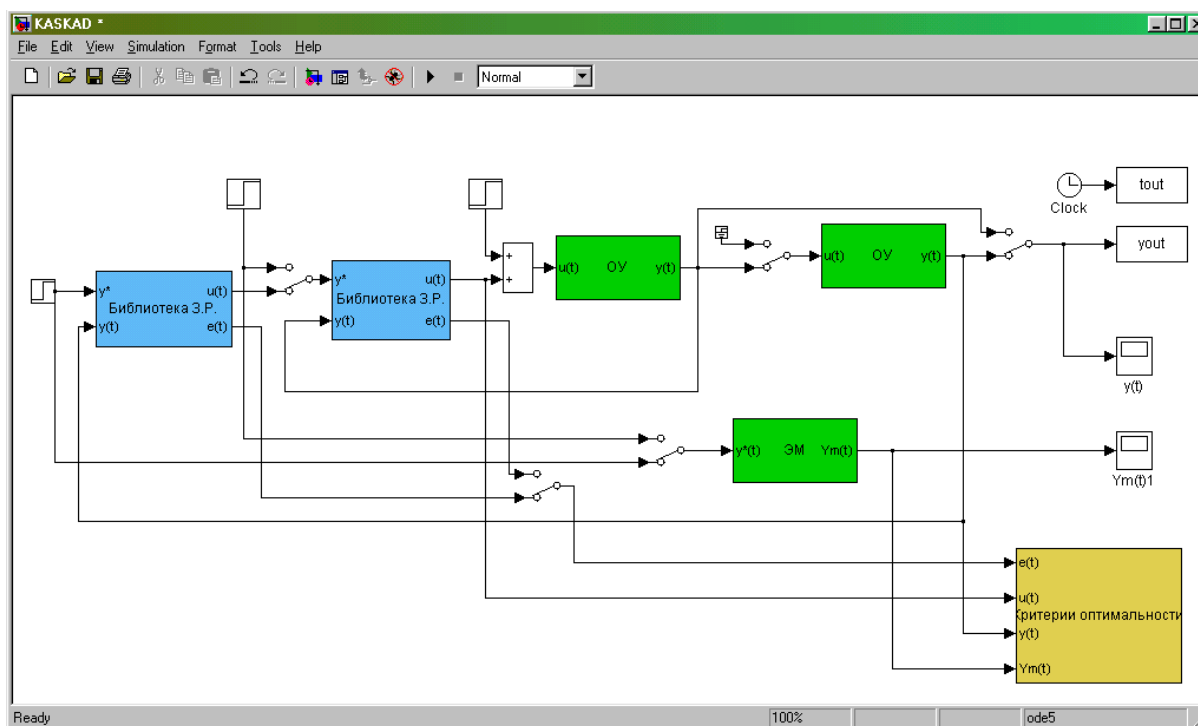


Рис. 5.5 – Simulink-модель каскадної САУ з двома регуляторами

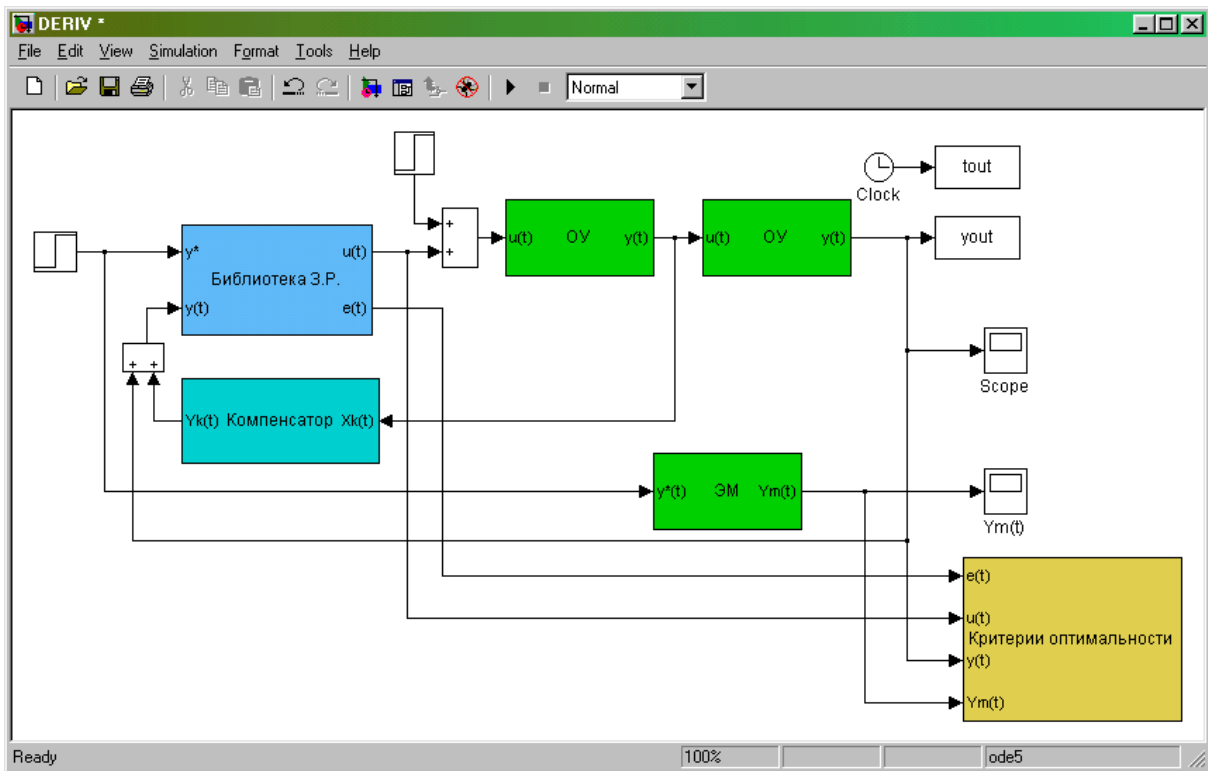


Рис. 5.6 – Simulink-модель двоімпульсної САУ з введенням похідної з проміжної точки

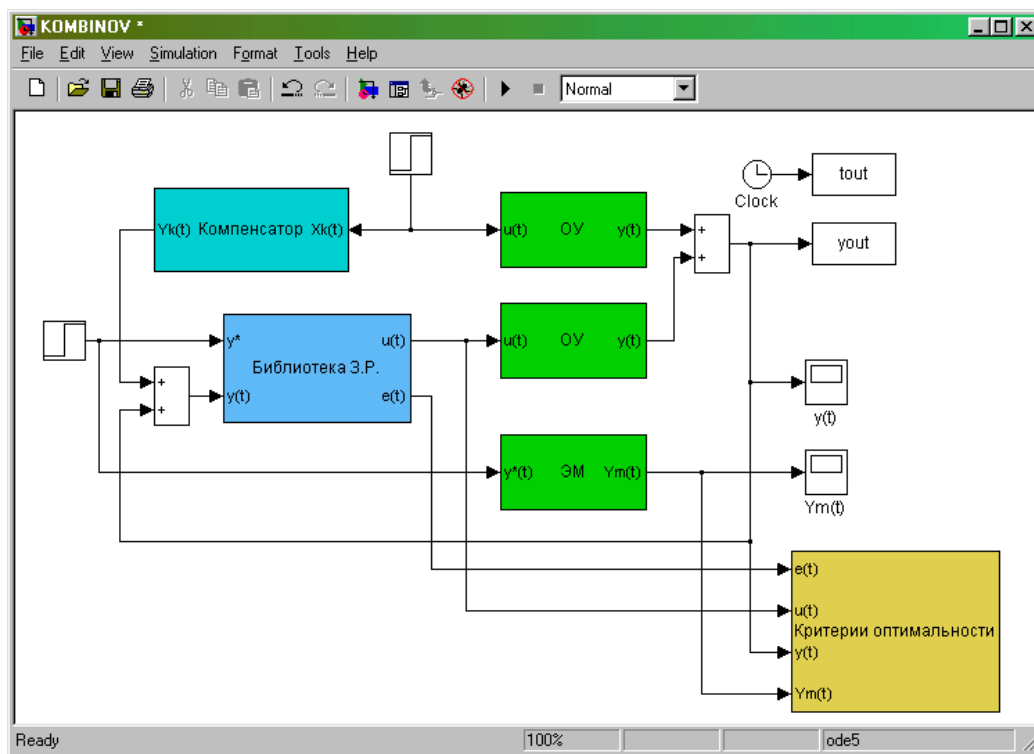


Рис. 5.7 – Simulink-модель комбінованої САУ

1.2.4 Методика роботи з системою

Для запуску системи необхідно виконати наступні кроки:

1. Запустити пакет MATLAB.
2. В якості робочої папки обрати папку, в якій розташована програма. В командному вікні MATLAB ввести команду OptSim_fig. При цьому на екран виведеться головне вікно програми (рис. 5.3).
3. Обрати потрібний тип САУ з списку в головному вікні програми.
4. Натиснути кнопку **Открыть модель** При цьому відкриється обрана Simulink-модель САУ (рис. 5.4 – 5.7).
5. Задати об'єкт управління за допомогою стандартних блоків програми Simulink пакету MATLAB (рис. 5.8).

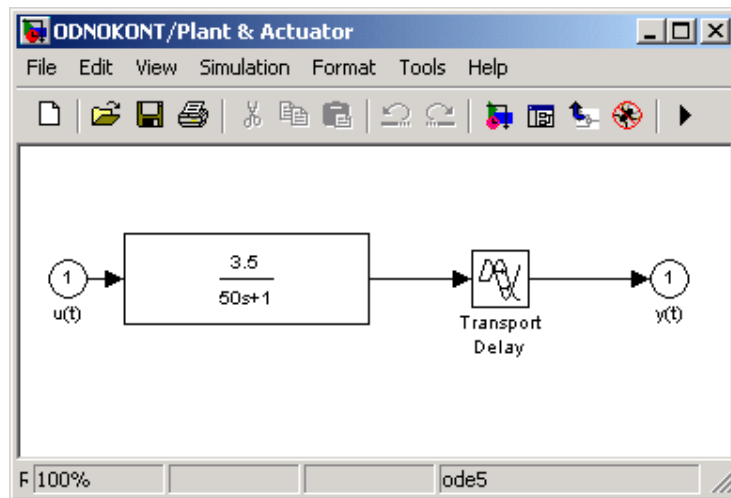


Рис 5.8 – Simulink-модель об'єкта управління

6. Обрати потрібний регулятор із списку в вікні програми
7. Якщо потрібно знайти параметри компенсатора (для САУ з введенням похідної з проміжної точки та комбінованої САУ), встановити прапорець **Налаштувати компенсатор** в вікні програми.
8. Задати початкові значення параметрів регулятора та компенсатора (якщо потрібно), початковий крок алгоритму оптимізації по кожному з параметрів в відповідних полях вводу вікна програми.
9. Обрати критерій оптимізації з списку.
10. Встановити потрібну точність знаходження параметрів.
11. Натиснути на кнопку **Оптимізація**.

1.2.5 Рекомендації по вибору початкових параметрів алгоритму оптимізації

Початкові значення параметрів ПІ та ПІД регуляторів найкраще встановлювати рівними розрахованим по інженерній методиці. Якщо немає змоги обчислювати по інженерному методу, то встановити $K_p = 1$, $T_i = T_{об}$, $T_d = 0,1 * T_i$. Для інших регуляторів рекомендується залишити параметри встановлені програмою.

Початкові значення кроків рекомендується встановлювати (0.05-0.3) від початкового значення параметру. Також для зменшення кількості кроків оптимізації потрібно встановлювати менші значення кроків при великій кількості параметрів оптимізації.

1.2.6. Приклад виконання оптимізації САУ різних структур

Параметричну оптимізацію всіх чотирьох типів САУ розглянемо на конкретних прикладах.

В якості об'єкту керування оберемо передатну функцію виду:

$$W_{OB}(p) = \frac{K_{OB} e^{-t_{OB} p}}{T_{OB} p + 1} = \frac{3.5 e^{-5p}}{50p + 1}. \quad (5.5)$$

Для завдання параметрів об'єкта запускаємо програму, обираємо тип САУ. Після цього потрібно натиснути кнопку **Открыть модель**. У вікні, що з'явиться, розкрити блок **ОУ** та відредагувати потрібні елементи.

В усіх системах в якості регуляторів оберемо ПІ-регулятори.

Одноконтурна САУ

Задамося початковими параметрами ПІ-закону регулювання:

- $K_p = 4$;
- $T_I = 20$.

Початковий крок встановлюємо відповідно 0.7 та 3. Критерій зупинки розрахунку обираємо $|I(k-1) - I(k)| < \epsilon_{ps}$. Точність встановлюємо рівною 0.1. Виконуємо оптимізацію.

Результат роботи програми показаний на рис. 5.9. Інформацію про хід процесу оптимізації та знайдені настройки можна переглянути в командному вікні MATLAB (рис 5.10).

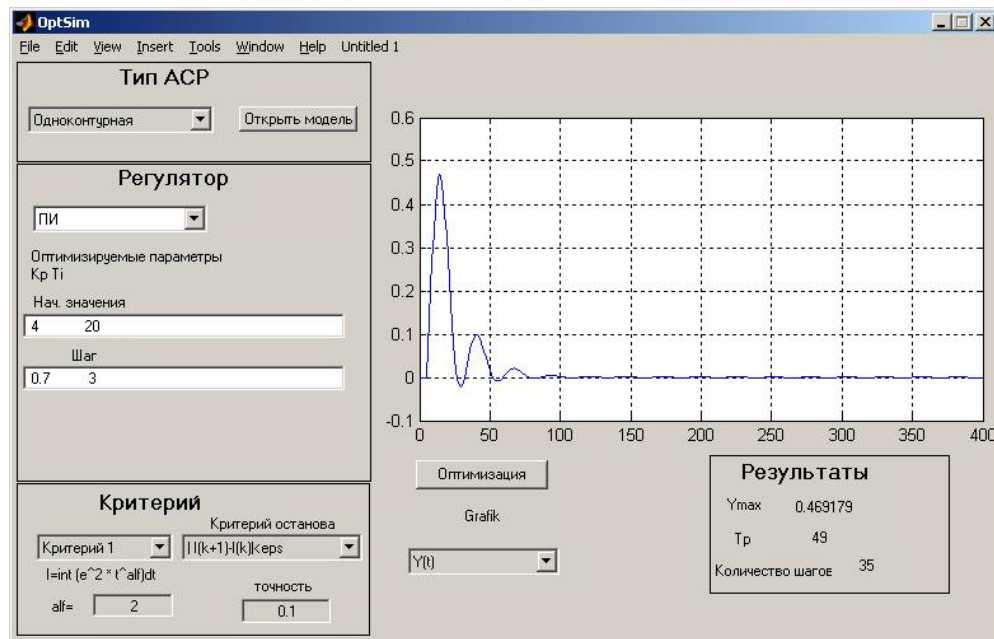


Рис 5.9 – Вікно програми

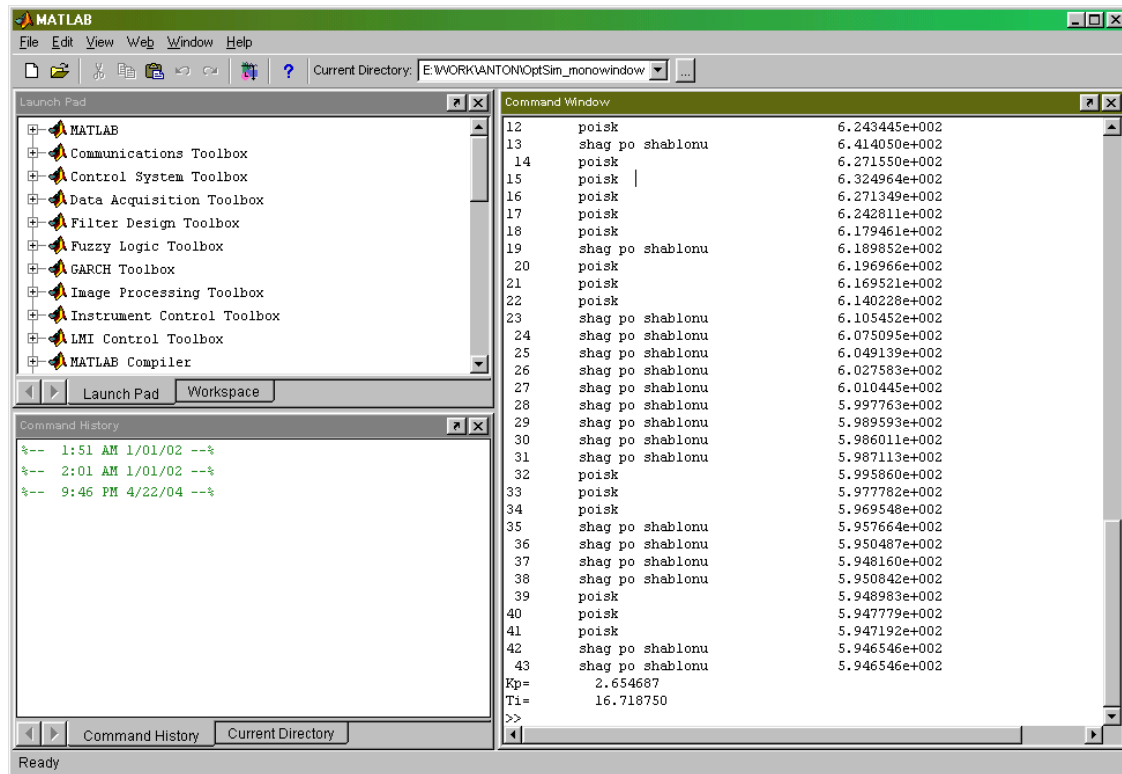


Рис. 5.10 – Командне вікно MATLAB

Оптимізація параметрів ПІ-регулятора дала наступні їх значення:

- $K_p = 2.654687$;
- $T_i = 16.718750$.

Каскадна САУ з двома регуляторами

Налагодження каскадної САУ будемо провадити в два етапи. Спочатку будемо знаходити оптимальні параметри ПІ-регулятора швидкодіючого (внутрішнього) контуру при відключеному інерційному (зовнішньому). Після налагодження ПІ-регулятора швидкодіючого контуру будемо налагоджувати ПІ-регулятор інерційного контуру при працюючому швидкодіючому. Такий підхід забезпечує більш якісне налагодження ніж варіювання параметрами ПІ-регуляторів обох контурів одразу. До того ж, такий підхід забезпечує вдале налагодження при досить невдало обраних початкових значеннях параметрів закону регулювання.

Задамося початковими параметрами ПІ-регулятора внутрішнього контуру:

- $K_{p2} = 4$;
- $T_{i2} = 20$.

Початковий крок встановлюємо відповідно 0.7 та 3. Точність встановлюємо рівною 0.1. Виконуємо оптимізацію.

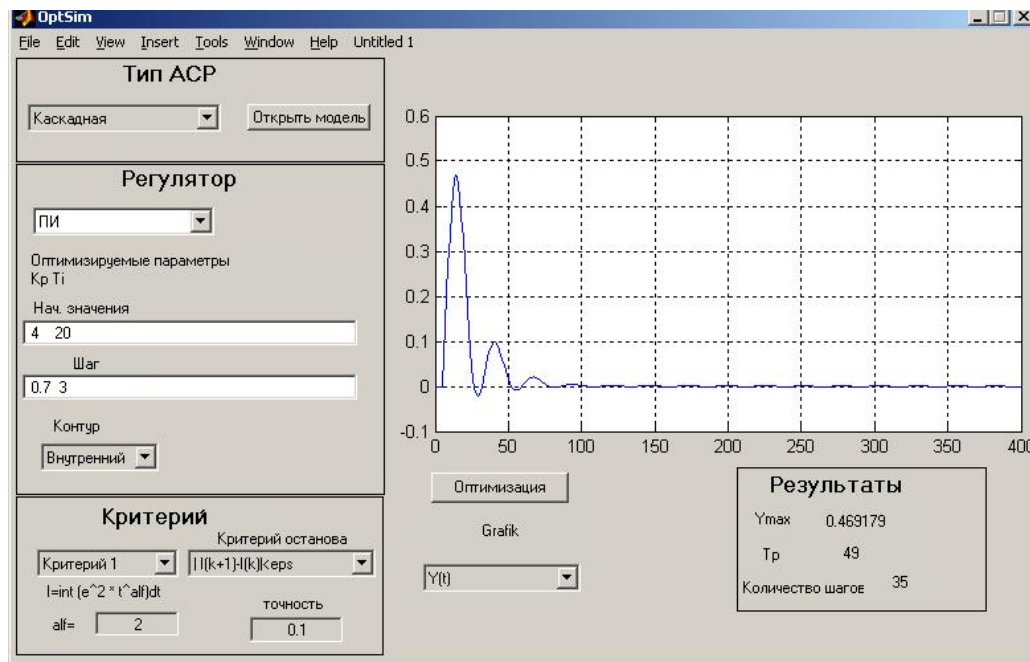


Рис. 5.11 – Оптимізація внутрішнього контуру

Оптимізація параметрів ПІ-регулятора внутрішнього контуру дала наступні їх значення:

- $K_p = 2.654687$;
- $T_i = 16.718750$.

Тепер перейдемо до налагодження ПІ-регулятора зовнішнього контуру.

У блок-схемі Simulink переключаємо перемикачі у нижнє положення.

Задасмо початковими параметрами ПІ-регулятора зовнішнього контуру (параметри налагодження ПІ-регулятора внутрішнього контуру взято оптимальні):

- $K_{p1} = 0,1$;
- $T_{i1} = 10$.

Початковий крок встановлюємо відповідно 0.05 та 7. Точність встановлюємо рівну 10. Виконуємо оптимізацію.

Оптимізація параметрів ПІ-регулятора зовнішнього контуру дала наступні їх значення:

- $K_p = 0.85$;
- $T_i = 104.5$.

Двоімпульсна САУ з введенням похідної з проміжної точки та комбінована САУ

Параметрична оптимізація цих двох структур дуже подібна оптимізації одноконтурної АСР, з тією лиш різницею, що можна додатково оптимізувати параметри диференціатора T_{d1} T_{d2} . Таким чином для цих двох структур оптимізація проводиться одразу по всіх чотирьох параметрах (K_p , T_i , T_{d1} та T_{d2}).

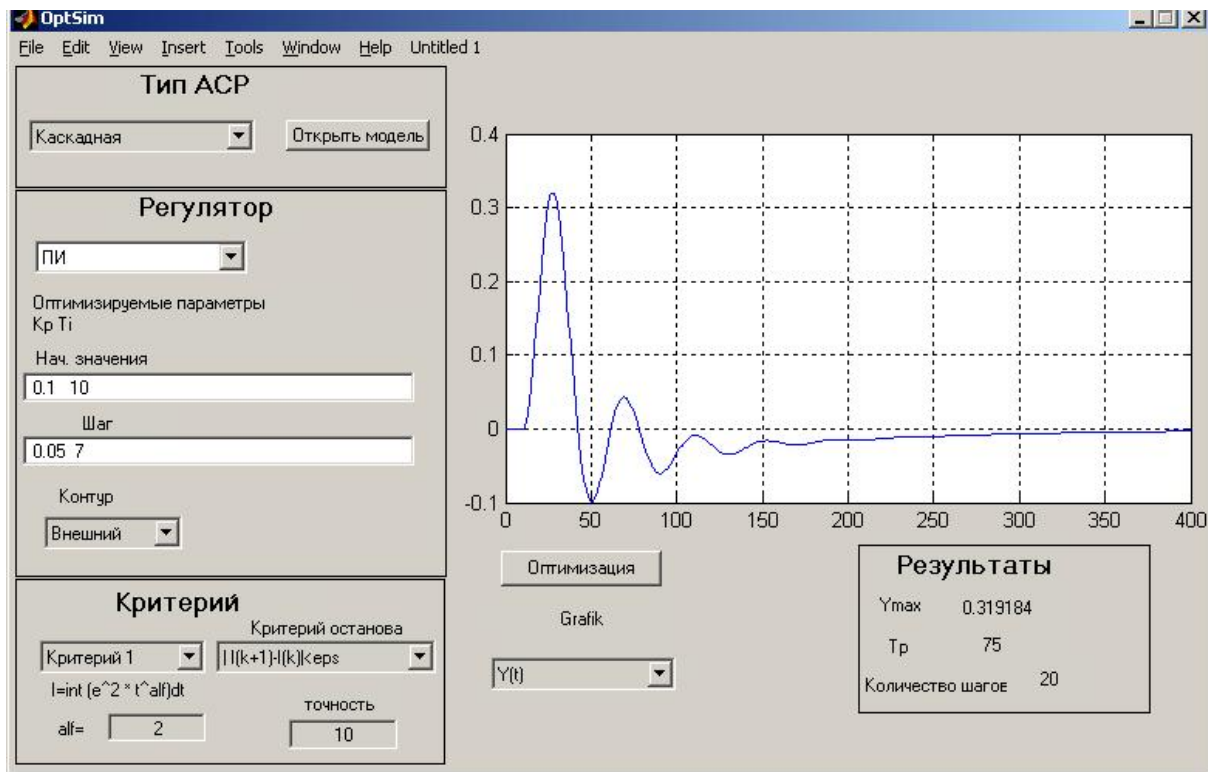


Рис. 5.12 – Оптимізація зовнішнього контуру

2. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з програмою параметричного синтезу OptSim.
2. Виконати розрахунок для контрольних прикладів (див. п. 1.2.6).
3. Для свого варіанту виконати пошук оптимальних параметрів за допомогою програми параметричного синтезу САУ для ПІ-регулятора в САУ (тип САУ обирається згідно з завданнями до лабораторної роботи №4). Критерій оптимізації:

$$I = \int_{t_n}^{t_k} y^2 \cdot t^a \cdot dt, a = 2.$$

Початковий крок обрати рівним 0.3 від початкового значення параметра. Критерій зупинки вибрати $|I(k+1) - I(k)| < \epsilon$. Точність встановити рівною 1.

4. Дослідити вплив коефіцієнта α на швидкість процесу оптимізації та якість отриманого перехідного процесу $Y(t)$. Побудувати графік залежності $N(\alpha)$, де N – кількість кроків оптимізації. Порівняти показники якості оптимальних перехідних процесів при різних α

5. Дослідити вплив величини початкового кроку оптимізації одного з параметрів на швидкість процесу оптимізації.

6. Виконати пошук оптимальних параметрів ПІ регуляторів в САУ (тип САУ обирається згідно з варіантом) з використанням еталонної моделі. Критерій оптимізації:

$$I = \int_{t_n}^{t_k} (y - y_{em})^2 \cdot dt,$$

де y – вихідний сигнал об’єкту ; y_{em} – вихідний сигнал еталонної моделі. Передатна функція еталонної моделі $W = \frac{1}{55p^2 + 5p + 1} e^{-5p}$. Оптимізацію проводити при збуренні з боку завдання. Привести графіки перехідних процесів еталонної моделі ($y_{em}(t)$) та отриманий перехідний процес з оптимальними настройками $y(t)$.

7. Порівняти результати оптимізації з різними критеріями (динамічну похибку, час регулювання, кількість кроків оптимізації)

8. Виконати дослідження впливу типу критерію зупинки на швидкість оптимізації та точність результату.

3. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості.
3. Вихідні дані та постановка задачі параметричного синтезу.
4. Simulink-модель САУ, що досліджувалась.
5. Результати дослідження та графіки перехідних процесів в САУ.
6. Висновки.

4. Контрольні запитання

1. Постановка задачі оптимального параметричного синтезу з еталонною моделлю.
2. Оптимізація методом Хука-Дживса.
3. Функція та структура програми OptSim.
4. Склад програми OptSim.
5. Методика роботи з системою.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Дослідження адаптивної САР

Мета роботи: вивчення методу адаптації, заснованого на аналізі початкової стадії перехідного процесу в замкненій системі регулювання.

1. Теоретична частина

1.1 Теоретичні основи методу адаптації

Промислові об’єкти керування характеризуються нестационарністю характеристик. Тому для якісного управління такими об’єктами необхідно іденти-

фікувати в процесі їх нормального функціонування параметри, що змінюються у часі, а потім використовувати їх для підстроювання регуляторів.

Багато промислових об'єктів можуть бути описані моделями:

$$W_o(s) = \frac{k_o}{(T_o \cdot s + 1)^m}, \quad (5.6)$$

$$W_o(s) = \frac{k_o \cdot \exp(-t \cdot s)}{T_o \cdot s + 1}. \quad (5.7)$$

Причому, якщо для моделі (6.2) справедливе відношення $\frac{t}{T_o} \leq 1$, то з нею може бути зіставлена модель (6.1).

При побудові адаптивних систем керування необхідна ідентифікація параметрів моделей (6.1) або (6.2), причому ідентифікація, наприклад, параметрів m, T_o, k_o моделі (6.1) дозволяє при необхідності перейти до моделі (6.2).

Розглянемо метод ідентифікації, що заснований на аналізі поведінки похідної перехідної характеристики об'єкта у точці її перегину. Точка перегину наявна при $m \geq 2$ або $\frac{t}{T_o} \geq 0.1$.

Характеристичне рівняння, що відповідає (6.1), може бути записане у вигляді:

$$\sum_{i=1}^m a_i \cdot l^i + 1 = 0. \quad (5.8)$$

У випадку змін у часі динамічних параметрів об'єкта, наприклад, постійної часу T_o , можна ввести параметр a_i , що враховує ці зміни. Тоді (6.3) запишемо у вигляді:

$$\sum_{i=1}^m a_i(t) \cdot l^i(t) + 1 = (a \cdot T_o \cdot l + 1)^m = 0, \quad (5.9)$$

$$0 < a_{\min} < a < a_m.$$

Для регульованої координати $x(t)$ введемо позначення $x_{k_o, a}(t)$, що показує в загальному випадку її залежність від статичного k_o і динамічного a_i параметрів об'єкта.

Тоді диференціальне рівняння, що відповідає (6.1), для випадку подачі на вхід об'єкта одиничного ступінчастого сигналу можна записати наступним чином:

$$\sum_{i=1}^m a_i(t) \cdot x_{k_o, a}^{(i)}(t) + x_{k_o, a}(t) = k_o(t) \cdot 1(t). \quad (5.10)$$

Позначимо через $t_1 = f(a)$ момент часу в який перша похідна рівняння (6.5) момент часу, в який перша похідна рівняння (6.5) приймає максимальне

значення $\dot{x}_{k_o a}(t)|_{t_1} = \max \dot{x}_{k_o a}(t)$, а друга похідна $\ddot{x}_{k_o a}(t)|_{t_1} = \ddot{x}_{k_o a}(t_1) = 0$, що ілюструється малюнком 6.1. Для розв'язання $x_{k_o a}(t)$ рівняння (5) доведене наступне твердження:

Розв'язання рівняння (6.5) при умові (6.4) є функцією статичного k_o і динамічного a_i параметрів об'єкта керування $x_{k_o a} = f(k_o, a, t)$, причому момент часу t_1 , у котрий $\ddot{x}_{k_o a}(t_1) = 0$, залежить тільки від a_i (динамічних властивостей об'єкту):

$$t_1 = f(a) = a \cdot t_2, \quad t_2 = \text{const}, \quad (5.11)$$

а добуток $\dot{x}_{k_o a}(t_1) \cdot t_1$ залежить тільки від k_o (статичних властивостей об'єкта).

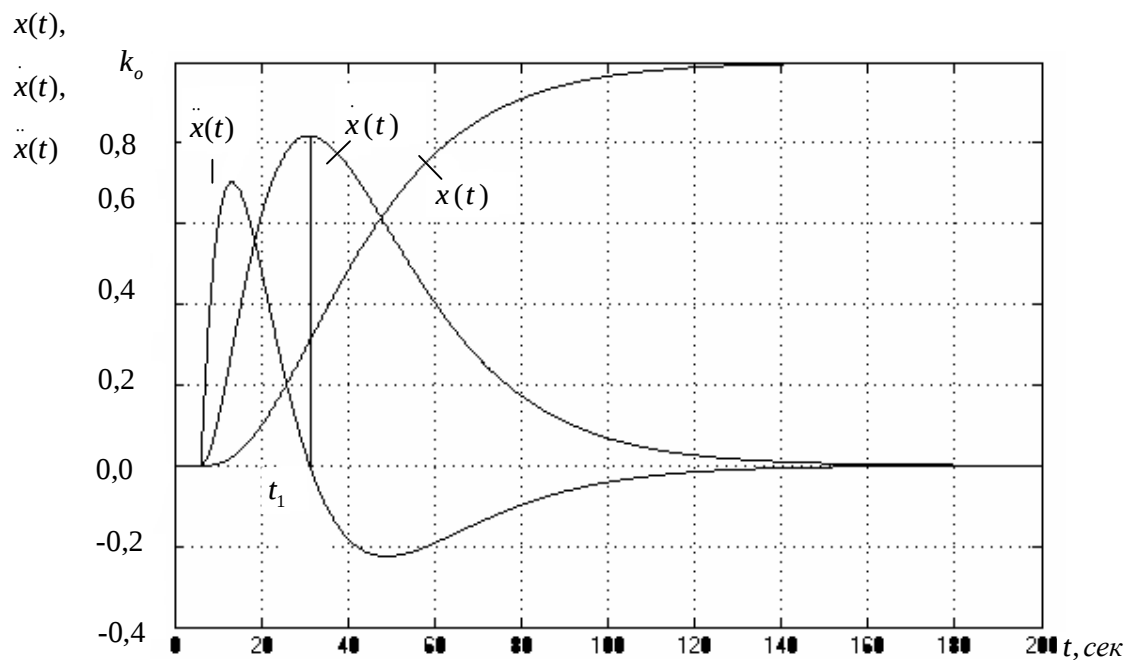


Рис. 6.1 – Перехідна характеристика, перша і друга похідні від неї.

$\dot{x}(t), \ddot{x}(t)$ зображені у збільшеному масштабі: $\dot{x}(t) \cdot 1000, \ddot{x}(t) \cdot 10000$

При нульових початкових умовах рівняння (6.5) та при від'ємних коренях характеристичного рівняння (6.3) характер розв'язання $x_{k_o a}(t)$, як це видно з малюнку 6.1, такий, що перша похідна має одне екстремальне значення при $t > 0$ у точці $t = t_1$, причому в цій точці друга похідна $\ddot{x}_{k_o a}(t_1)$ дорівнює нулю незалежно від значення k_o .

1.2 Алгоритм адаптивного ПІД-регулятора

Алгоритм ПІД-регулятора записується наступним чином:

$$u = k_p \left(e(t) + k_u \int e(t) dt + k_o \frac{de(t)}{dt} \right).$$

При $k_o = 0$, маємо ПІ-регулятор. При використанні ПІД-закону регулювання, k_o і k_u пов'язані між собою алгебраїчною залежністю.

Відомо, що при невеликому діапазоні зміни параметрів об'єкту в 1.5 – 2 рази однопараметрична настройка регулятора в достатній мірі забезпечує якість керування при збереженні співвідношення між складовими закону керування. Виходячи з розглянутих вище властивостей розв'язання рівняння об'єкту, використовується наступний алгоритм адаптації:

$$K_p^{n+1} = a \cdot K_p^n \cdot \frac{|e(t_1)|}{t_1 \cdot \max |e(t_1)|}, \quad (5.12)$$

де K_p^n - значення загального коефіцієнту підсилення регулятора перед адаптацією, K_p^{n+1} - нове значення загального коефіцієнту підсилення регулятора, $e(t)$ - сигнал розузгодження, t_1 - момент досягнення максимуму модуля першої похідної від модуля сигналу розузгодження, n – номер кроку адаптації. Коефіцієнт вибирається в межах $a = 1...1.8$. Значення, що рекомендується $a = 1.44$.

Цей алгоритм базується на раніше приведених залежностях при збуренні по вихідній величині об'єкту і проведенні аналізу початкової стадії перехідного процесу в замкненій системі регулювання. У цьому випадку величина $t_1 \cdot \dot{e}(t_1)$ залежить від $k_p = k_p(k_o)$.

1.3 Структурна схема адаптивної САР

Структурна схема адаптивної САР наведена на рис. 6.2.

В аналізаторі реалізується наступний алгоритм:

$$\left| \dot{e}(t_1) \right| = \max \dot{e}(t),$$

$$t_1 = t, \text{ при } \dot{e}(t) = \max \dot{e}(t),$$

$$e(t_1) = e(t), \text{ при } t = t_1.$$

$k_p^{(0)}, T_u^{(0)}, T_o^{(0)} = k_o \cdot T_u^{(0)}$ – визначаємо по апіорним даним про об'єкт за формулами інженерного розрахунку настройок регулятора.

Фільтр $W_\phi(s)$ вводиться для гарантованого забезпечення $m \geq 2$, а також для зменшення впливу шумів.

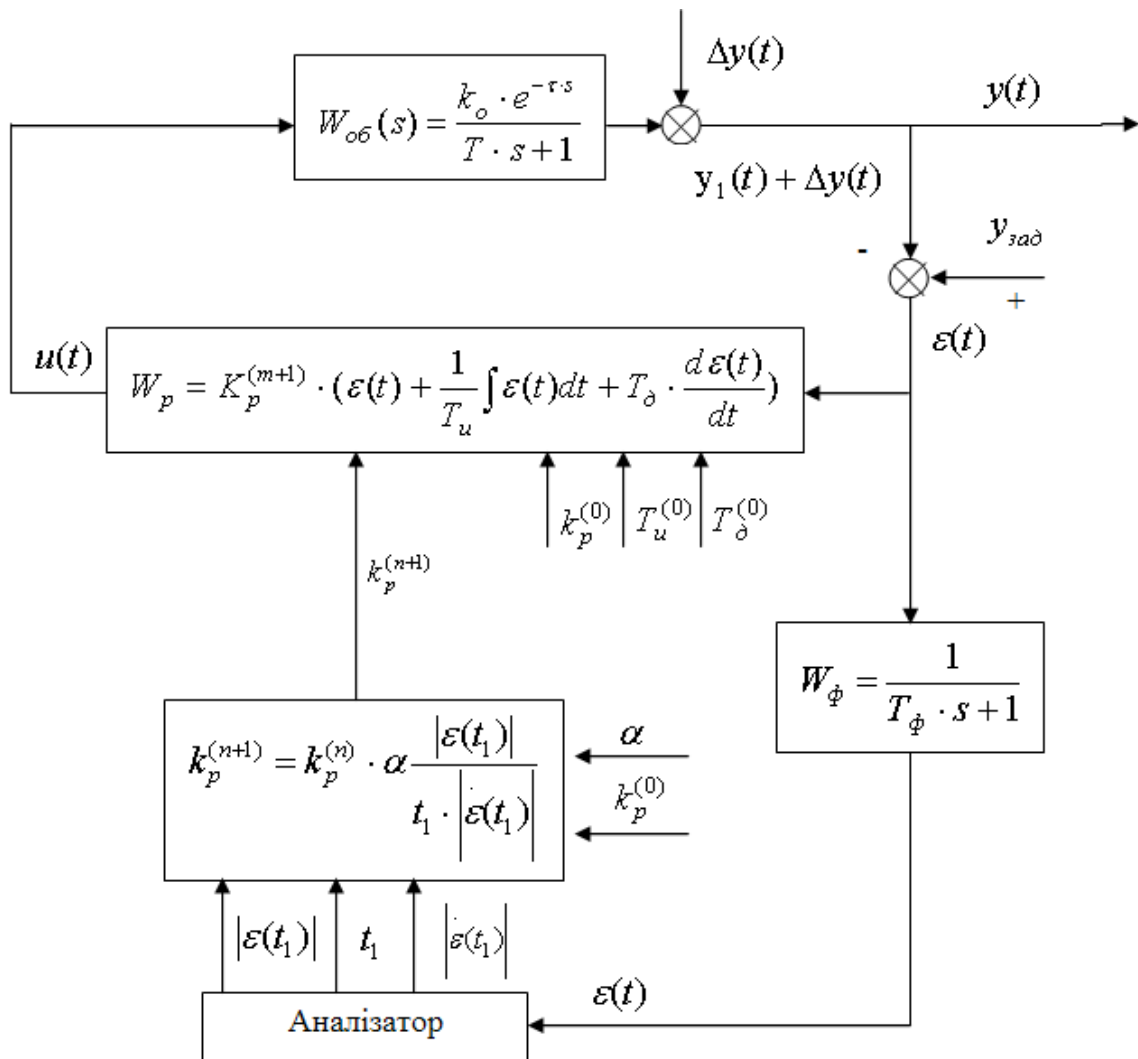


Рис. 6.2 – Структурна схема адаптивної САР

1.4 Методика роботи з програмою

Для дослідження адаптивної САР необхідно виконати наступні кроки:

1. Відкрити файл `Pid.mdl`.
2. Встановити параметри об'єкту управління.
3. Подати збурення за вихідною величиною об'єкту.
4. Подвійним клацанням лівої кнопки миші на блоці **Adaptivniy p-p** відкрити вікно налаштувань настройок регулятора (рис. 6.3) і встановити їх початкові значення.

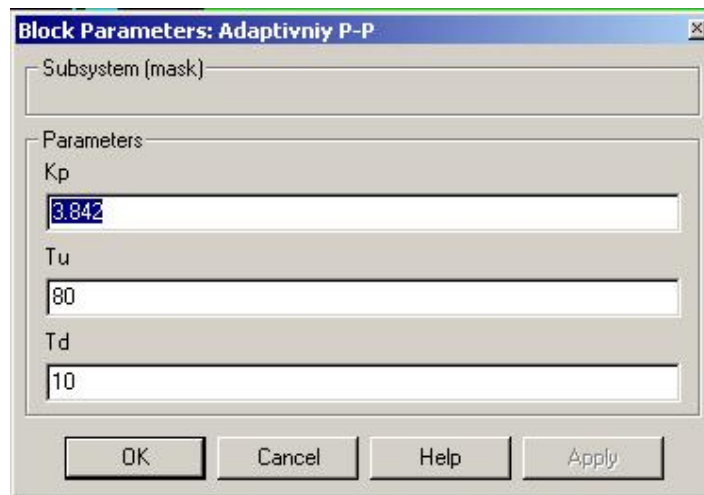


Рис. 6.3 – Вікно налаштувань настройок регулятора

5. Натиснути кнопку ОК і запустити процес моделювання.

6. Відкрити блок **Scope1** і зняти нове значення загального коефіцієнту підсилення регулятора.

7. Порівняти нове значення загального коефіцієнту підсилення регулятора з попереднім. Якщо різниця між ними менше заданої точності розрахунку, то процес адаптації завершено, в іншому випадку необхідно повторити моделювання встановивши нове значення загального коефіцієнту підсилення регулятора.

2. Порядок виконання роботи

1. Вибрати об'єкт управління, а також тип регулятора згідно з варіантом (див. п. 3).

2. За допомогою інженерних методів розрахувати початкові настройки регулятора.

3. Виконати адаптацію з використанням додатку Pid.mdl в середовищі Matlab, встановлюючи на кожному кроці нове значення загального коефіцієнту підсилення регулятора, що було знайдено на попередньому кроці. Критерій зупинки адаптації $|K_p^{(m+1)} - K_p^{(m)}| < e$. Виконати дослідження при $e = 0.01; 0.005$. Зробити висновки про якість настроювання регулятора в залежності від e .

4. Виконати адаптацію для змінених параметрів об'єкту $\pm 50\%$ по $k_{об}, T_{об}, t_{об}$ для $e = 0,01$. Початкові настройки регулятора беруться з пункту 2.

5. Виконати адаптацію для змінених параметрів об'єкту $\pm 50\%$ по $k_{об}, T_{об}, t_{об}$ для $e = 0,01$ при початкових настройках регулятора, що обчислені по наближеним формулам для зміненого об'єкту.

6. Зробити висновки по пунктах 6 и 7.

7. Виконати настроювання регулятора з початковими параметрами поза зоною стійкості. Зробити висновки.

3. Варіанти завдань

1. Передатна функція об'єкту управління:

$$W_{об}(p) = \frac{0.4 \cdot (6 - n)}{(30 + n \cdot 15) \cdot p + 1} \cdot e^{\frac{30 \cdot (n+1)}{n} \cdot p},$$

де n – номер варіанту.

2. Тип регулятора

n	Тип регулятора
1	ПІ
2	ПІД
3	ПІ
4	ПІД
5	ПІ

4. Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості.
3. Результати виконання завдань.
4. Висновки.

5. Контрольні запитання

1. Метод адаптації.
2. Залежність загального коефіцієнту підсилення регулятора від статичних властивостей об'єкту.
3. Залежність загального коефіцієнту підсилення регулятора від динамічних властивостей об'єкту.
4. Вплив e на збіжність процесу.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия "Библиотека профессионала". – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.: ил.
2. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. СПб.: Питер. 2001.
3. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.: ил.
4. Кузовков Н.Т., Карабанов В.А., Салычев О.С. Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение, 1978.
5. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
6. Половко А.М., Бутусов П.Н. MATLAB для студента. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 320 с.: ил.