

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ
З КУРСУ “ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ”
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
151 – АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП’ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ЧАСТИНА 3 – ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ АСР

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

Дніпро ДВНЗ УДХТУ 2018

Методичні вказівки до лабораторних занять з курсу “Теорія автоматичного керування” для спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології. Частина 3 – Дослідження нелінійних АСР / Укл.: Тараненко Ю.К., Швачка О.І. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2018. – 37 с.

Укладачі: Ю.К. Тараненко, д-р. техн. наук
О.І. Швачка, канд. техн. наук

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

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних занять
з курсу “Теорія автоматичного керування” для студентів спеціальності
151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології.
Частина 3 – Дослідження нелінійних АСР

Укладачі: ТАРАНЕНКО Юрій Карлович
ШВАЧКА Олександр Іванович

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

Підписано до друку 10.08.18. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 1,68. Обл.-вид. арк. 1,75. Тираж 100 прим. Зам. № 33.
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015

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

Редакційно-видавничий відділ

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ТА ІМПУЛЬСНИХ АСР

Мета роботи – моделювання типових нелінійностей і фіксація процесів на вході і виході кожної нелінійної ланки засобами пакета Matlab Simulink.

7.1 Вивчення типових нелінійностей

В роботі розглядаються типові нелінійності з симетричними характеристиками, наведеними на рис. 7.1.

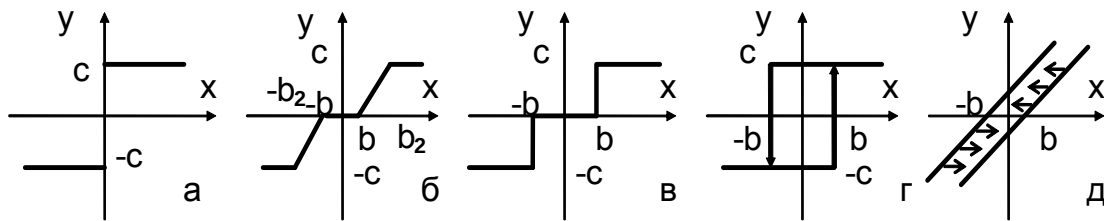


Рисунок 7.1 – Характеристики нелінійних елементів: а – ідеальне двопозиційне реле; б – підсилювач з обмеженням і зоною нечутливості; в – трипозиційне реле; г – двопозиційне реле з гістерезисом; д – люфт

Як джерело (генератора) вхідного впливу слід використовувати вільні коливання на виході коливальної ланки, описуваного передаточною функцією при ненульових початкових умовах

$$W(p) = 1 / (T^2 p^2 + 2\xi T p + 1). \quad (7.1)$$

Варіюючи декремент загасання (коефіцієнт демпфірування – ξ) і постійну часу (T) або інші пов'язані з ними параметри коливальної ланки, можна домогтися як гармонійних, так і згасаючих коливальних процесів. Гармонійний сигнал різної амплітуди дозволяє протестувати роботу нелінійності «по частинах», тобто спостерігати вплив окремих ділянок характеристики нелінійності на перетворення вхідного сигналу. За допомогою затухаючого тестового сигналу можна перевірити роботу нелінійності в цілому, спостерігаючи у часі загасання процесу і всі можливі еволюції сигналу на виході нелінійного елемента (НЕ), пов'язані з його впливом, а також побудувати характеристику НЕ (при цьому максимальне значення амплітуди тестового сигналу, природно, має бути задано більшим, ніж значення параметрів b або b_2 , залежно від типу нелінійності).

7.2 Вибір значень параметрів нелінійних елементів і генератора

Параметри НЕ і час загасання коливального процесу на виході генератора слід задавати відповідно до варіанта, наведеними в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Значення параметрів нелінійних елементів і генератора

Параметр	Номер варіанта														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
c	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
b	0.1	0.2	0.25	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.3	1.5
b ₂	1.1	1.7	2.25	2.75	3.3	3.85	4.4	5	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	8.8	9.5
t ₃	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Знайти кутову частоту затухаючих коливань і коефіцієнт загасання коливальної ланки відповідно до заданого в табл. 7.1 часом загасання коливального процесу і числом періодів, рівним $10 \square 20$ на інтервалі t_c .

Рівняння, що описує вільні коливання на виході коливальної ланки, має такий вигляд:

$$g(t) = A \cdot \cos(\lambda t) \cdot e^{-\gamma t}, \quad (7.2)$$

$$\gamma = \frac{\xi}{T} = \xi \Omega, \quad \lambda = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T} = \Omega \sqrt{1 - \xi^2}, \quad (7.3)$$

де t – час; A – амплітуда гармонійних коливань (при $\xi = 0$) або амплітуда згасаючих коливань в початковий момент часу (при $\xi \neq 0$); Ω – кутова частота гармонійних коливань.

Амплітуда (A) задається довільно, а параметри (λ , γ) необхідно пов'язати з вихідними даними про необхідний час загасання коливального процесу і заданою кількістю періодів коливань за цей час.

Загасання процесу можна вважати закінченими в момент часу, що приблизно дорівнює трьом постійним часу експоненти, тобто:

$$t_3 = \frac{3}{\gamma} = \frac{3}{\xi \Omega}, \quad (7.4)$$

а кутову частоту (λ) слід обчислювати за рівнянням:

$$\lambda = 2\pi \cdot \frac{N}{t_3} = \Omega \sqrt{1 - \xi^2}, \quad (7.5)$$

де N – кількість коливань (періодів) за час загасання процесу.

Вирішуючи систему рівнянь:

$$\begin{cases} \xi = \frac{3}{\Omega t_c}, \\ \Omega = \frac{2\pi N}{t_c \sqrt{1 - \xi^2}}, \end{cases} \quad (7.6)$$

отримаємо вираз для (ξ):

$$\xi = \frac{1.5}{\sqrt{(\pi N)^2 + 2.25}} \quad (7.7)$$

після чого можна обчислити:

$$\Omega = \frac{2\pi N}{t_3 \sqrt{1-\xi^2}} \quad (7.8)$$

У підсумку розраховуються коефіцієнт загасання (γ) за формулою:

$$\gamma = \xi \Omega \quad (7.9)$$

і кутова частота за формулою:

$$\lambda = 2\pi \cdot \frac{N}{t_3} \quad (7.10)$$

або

$$\lambda = \Omega \sqrt{1-\xi^2} \quad (7.11)$$

7.3 Використання пакету Matlab для дослідження НЕ

Для проведення моделювання створити 2 файли: файл-сценарій TN_prog.m і файл моделі TN_mod.mdl. Вони взаємопов'язані: змінні, визначені в m файлі, використовуються при завданні параметрів блоків моделі, модель запускається на виконання також командою з m файлу, а при проведенні моделювання в Simulink результати записуються в робочу область пам'яті (Workspace), звідки зчитуються при побудові підсумкових графіків командами з m файлу. Приклад файлу TN_prog.m наводиться нижче.

Вивчення типових нелінійностей

Використовувані позначення:

НЕ - нелінійний елемент.

clear all% очищення пам'яті

close all% закриття всіх попередніх рисунків

Завдання значення змінної, визначається положенням перемикача

% Конфігурації у файлі TN_mod.mdl

% 1 – НЕ - ідеальне двопозиційне реле

% 2 – НЕ - підсилювач з обмеженням і зоною нечутливості

% 3 – НЕ - трипозиційне реле без гістерезису

% 4 – НЕ - двопозиційне реле з гістерезисом

% 5 – НЕ - люфт

config = 5;

% Встановлення значення строкової змінної nlin

switch config

case 1,

nlin = ід. 2 х поз. реле ';

case 2,

nlin = 'ус-ль з огр. і зоною нечувст. ';

case 3,

nlin = '3 х поз. реле без ГИСТ. ';

case 4,

nlin = '2 х поз. реле з ГИСТ. ';

case 5,

```

nlin = 'люфт';
end
% Константи, що описують нелінійні елементи
c = 6;
b = 1;
b2 = 7;
% Параметри моделювання
t_end = 10; % Час моделювання, с
step = 1e 3;% крок моделювання, с
% Опис генератора згасаючих коливань
N = 15; % Кількість коливань за час моделювання
A = 10; % Амплітуда в початковий момент часу
lambda = 2 * pi * N / t_end; % Кутова частота згасаючих коливань
ksi = 1.5 / sqrt ((pi * N) ^ 2 + 2.25); % Декремент загасання
% Ksi = 0;
omega = (2 * pi * N) / (t_end * sqrt (1 ksi ^ 2));% кутова частота гармонійних
коливань
gamma = ksi * omega; % Коефіцієнт загасання
% Виклик моделі
open_system ('TN_mod.mdl');
% Запуск моделювання
sim ('TN_mod');
% Побудова процесів в часі (рис. 1)
figure (1)% відкриття вікна рисунка
title ([ 'Процеси e (t) і y (t). HE -', nlin, ', b =', num2str (b), ', b2 =', num2str (b2), ...
', C =', num2str (c)])% заголовок малюнка
xlabel ('t - час, c')% назву осі X
ylabel ('e - вхід HE, g - вихід HE')% назву осі Y
grid on% включення сітки
hold on
plot (t, e, '-r')% побудова першого графіка малюнка із зазначенням
% імен масивів точок, виведених по осях X і Y, і
% установкою кольору і типу лінії графіка
plot (t, g, '-b')% другий графік - аналогічно
legend ('вхід HE', 'вихід HE', 4)% висновок на рисунок, що пояснює написи, яка
показала
% відповідність між кольором графіка і його назвою
% Побудова характеристики нелінійності (рис. 2)
figure (2)
title ([ 'Хар-ка Нелін-ти g (e). HE -', nlin, ', b =', num2str (b), ', b2 =', num2str (b2),
...
', C =', num2str (c)])
xlabel ('e - вхід HE')
ylabel ('g - вихід HE')
% Ручна установка меж по осях X і Y: [Xmin, Xmax, Ymin, Ymax]

```

```

if config == 5
axis ([-A * 1.1 A * 1.1 - (A-b) * 1.1 (A-b) * 1.1])
else
axis ([-A * 1.1 A * 1.1 - c * 1.1 c * 1.1])
end
grid on
hold on
plot (e, g, '-r')

```

У файлі-сценарії необхідно задати значення констант, що описують нелінійності, задати крок і час моделювання, рівний часу загасання коливань на виході генератора, а також значення змінної config, що управляє конфігурацією нелінійної частини моделі. В процесі виконання m файлу розраховуються параметри генератора, викликається і запускається модель, результати у вигляді тимчасових процесів на вході і виході НЕ, а також залежність вихідного сигналу від значень вхідного за допомогою команд побудови двовимірних графіків виводяться в окремі графічні вікна.

Файл моделі повинен містити генератор і з'єднаний з ним нелінійний елемент. Можна передбачити одночасне наявність в схемі всіх п'яти розглянутих НЕ, а їх вибір робити за допомогою селектора (рис. 7.2). З огляду на можливість перейменування функціональних блоків в Matlab, рекомендується давати їм змістовні назви.

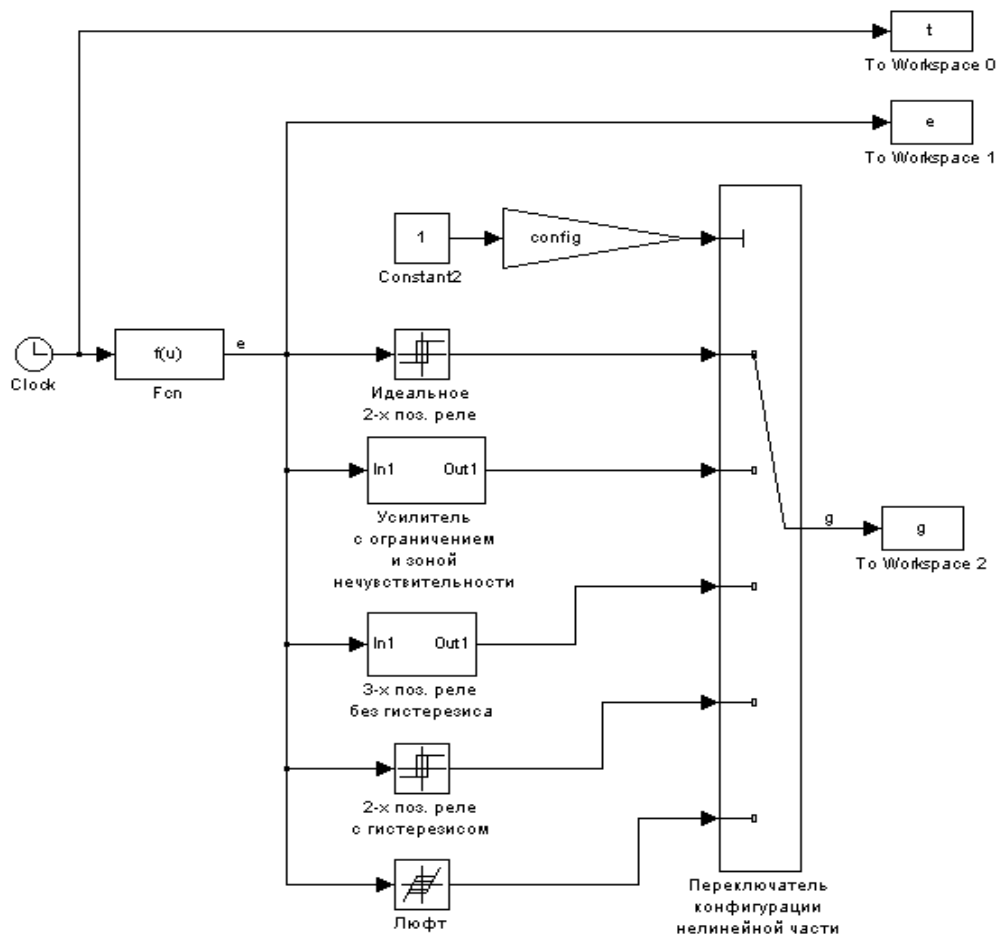


Рисунок 7.2 – Структурна схема моделі

В налаштуваннях параметрів моделювання слід вказувати спеціально призначені для цієї мети змінні, значення яких задані у файлі-сценарії. Параметри моделювання повинні бути вказані в вікні «Simulation parameters», доступному через меню Simulation \ Simulation parameters вікна, в якому відкрито mdl файл (рис. 7.3).

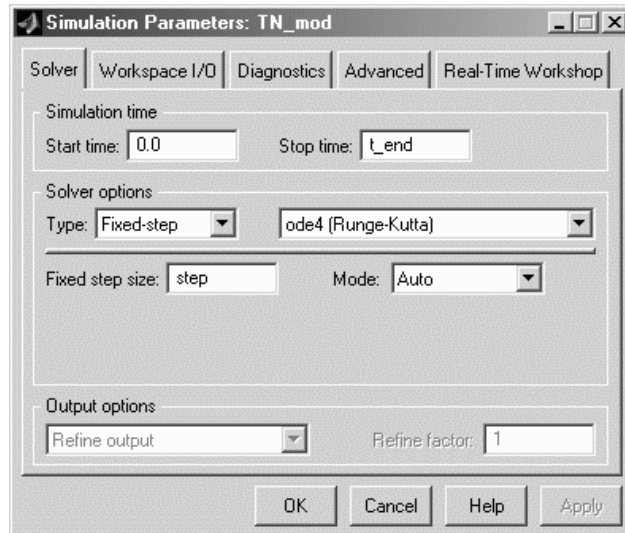


Рисунок 7.3 – Налаштування параметрів моделювання

Надалі в настройках блоків використовуються змінні, задані в m файлі. Такий підхід допомагає економити час при налаштуванні і перенастроювання моделі.

За допомогою блоків Constant (константа) з бібліотеки Sources, Gain (коефіцієнт посилення) з бібліотеки Math і змінної config можна задавати різне значення керуючого входу перемикача конфігурації нелінійної частини (блоку Multiport Switch з бібліотеки Nonlinear).

Як генератор вільних коливань можна використовувати блок Fcn з бібліотеки Functions & Tables із записаним в нього виразом для вільних коливань за формулою (1.1). Налаштування блоку Fcn показані на рис. 7.4.

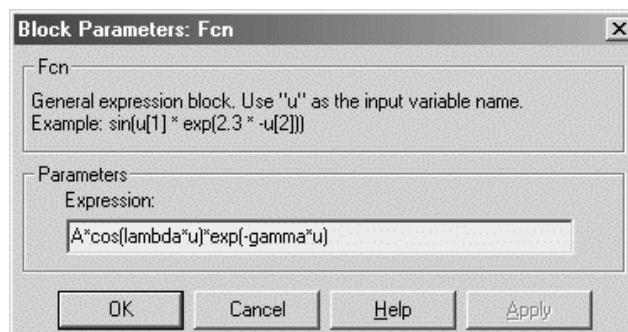


Рисунок 7.4 – Налаштування блоку Fcn

На вхід блоку Fcn слід підключити джерело модельного часу – блок Clock з бібліотеки Sources (рис. 7.5).

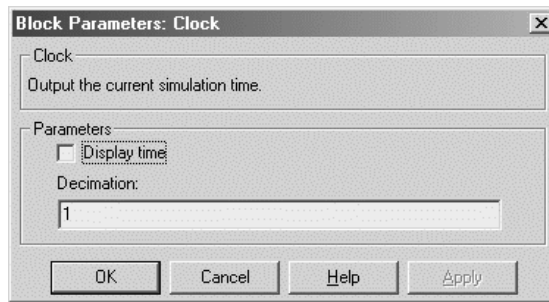


Рисунок 7.5 – Налаштування блоку Clock

Для створення п'яти досліджуваних НЕ слід скористатися чотирма блоками бібліотеки Nonlinear: Backlash (люфт), Dead Zone (підсилювач з одиничним коефіцієнтом посилення і зоною нечутливості), Saturation (підсилювач з одиничним коефіцієнтом посилення і обмеженням), Relay (двопозиційне реле з гістерезисом).

Як двохпозиційного реле з гістерезисом слід використовувати блок Relay (рис. 7.6).

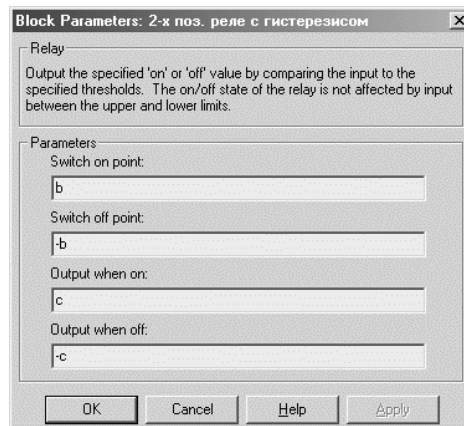


Рисунок 7.6 – Налаштування двохпозиційного реле з гістерезисом

Ідеальне двопозиційне реле – це блок Relay нульової довжини зони гістерезису (рис. 7.7).

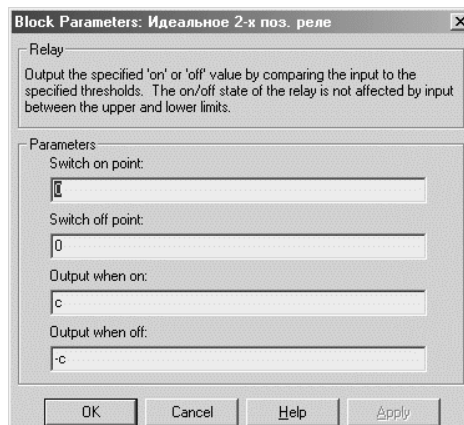


Рисунок 7.7 – Налаштування блоку Relay при моделюванні ідеального двохпозиційного реле

Підсилювач з обмеженням і зоною нечутливості – це послідовне з'єднання трьох ланок: Dead Zone, Gain і Saturation (рис. 7.8, 7.9).

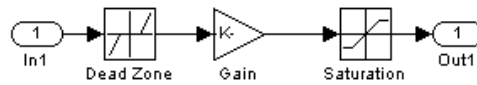
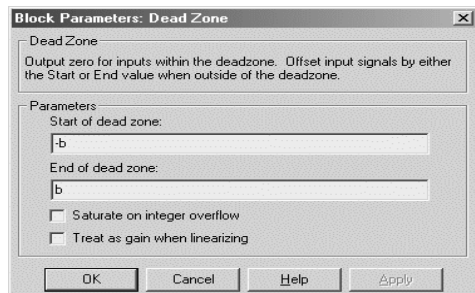
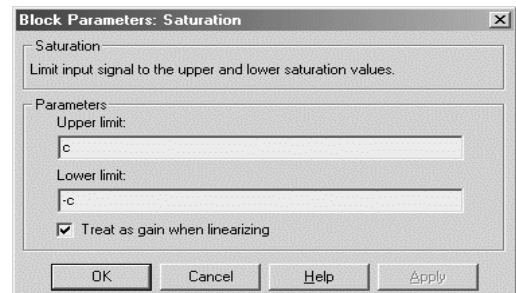


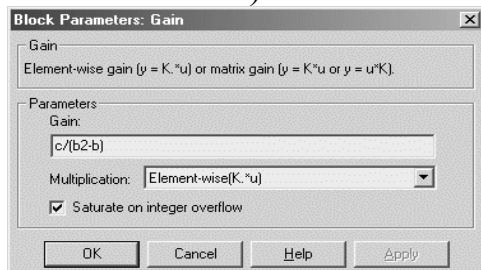
Рисунок 7.8 – Схема моделювання підсилювача з обмеженням і зоною нечутливості



а)



б)



в)

Рисунок 7.9 – Налаштування блоків, що входять до складу підсилювача з обмеженням і зоною нечутливості:

а – блоку Dead Zone;

б – блоку Saturation;

в – блоку Gain

Трипозиційне реле без гістерезису можна організувати за допомогою паралельного з'єднання двох ідеальних двохпозиційних реле (рис. 7.10, 7.11).

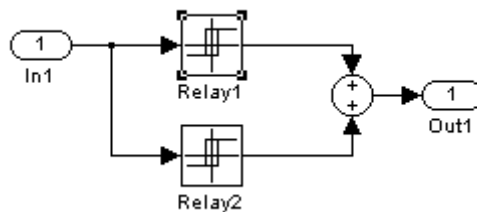
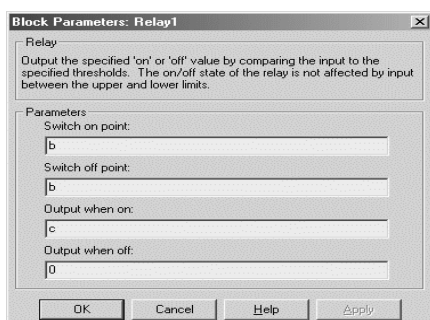
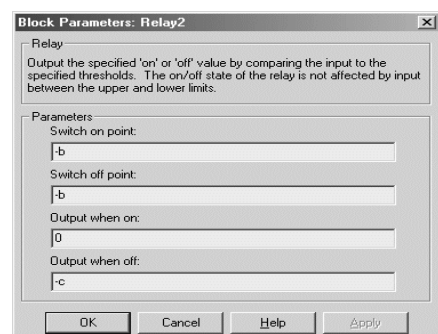


Рисунок 7.10 – Схема моделювання трипозиційного реле



а)



б)

Рисунок 7.11 – Налаштування блоків трипозиційного реле: а – Relay1; б – Relay2

Для організації НЕ «Люфт» необхідний блок Backlash (рис. 7.12).

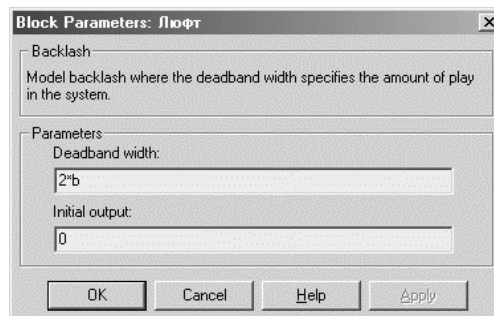


Рисунок 7.12 – Налаштування блоку Backlash

Значення поточного модельного часу, а також сигналів на вході і виході нелінійності слід виводити в робочу область пам'яті за допомогою блоків To Workspace (з бібліотеки Sinks), вказавши в кожному блоці ім'я змінної, призначеної для зберігання даних в обраному форматі. По завершенні моделювання в Simulink збережена інформація буде використана при побудові графіків в процесі подальшого виконання файлу-сценарію.

При використанні блоку To Workspace для виведення в робочу область пам'яті поточного модельного часу для цього блоку необхідно зробити наступні налаштування:

- формат запису (Save format) ☐ Array (масив);
- ім'я масиву (Variable name) ☐ t;
- кількість точок в масиві (Limit data points to last) не обмежується inf;
- такт роботи блоку (Simple time) успадковується від попереднього ☐ (-1);
- проріджування масиву (Decimation) не провадиться – ☐ 1 (в пам'ять записується значення часу на кожному такті роботи блоку).

Вікно налаштувань блоку показано на рис. 7.13.

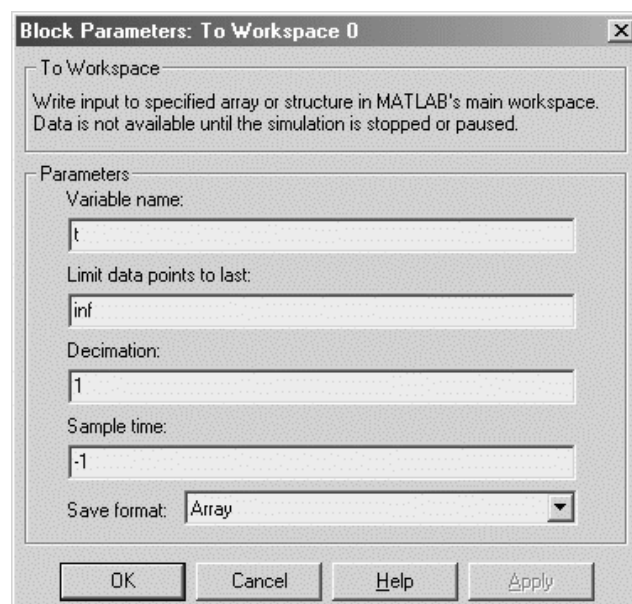


Рисунок 7.13 – Налаштування блоку To Workspace, що відповідає за виведення в робочу область пам'яті поточного модельного часу

7.4 Порядок проведення роботи

7.4.1 Розмістити створені при підготовці файл-сценарій і файл моделі в робочій директорії. Відкрити `TN_prog.m`, перевірити відповідність записаних в нього вихідних даних номеру варіанта і за допомогою змінної `config` вибрати для моделювання один з нелінійних елементів. Для забезпечення роботи генератора в режимі з загасанням вихідного сигналу розраховувати значення коефіцієнта демпфірування відповідно до формули (7.7). Значення початкової амплітуди сигналу повинна перевищувати значення параметра b_2 нелінійності в разі підсилювача з обмеженням і зоною нечутливості, 0 – у разі ідеального двохпозиційного реле і b – у всіх інших випадках.

7.4.2 Запустити `m` файл на виконання. У разі безпомилкової організації файлу-сценарію і файлу моделі буде запущено моделювання в Simulink, а по його завершенні побудовані три результуючих графіка (суміщені залежності вхідного і вихідного сигналів НЕ від часу і характеристика нелінійності, тобто залежність вихідного сигналу від значень вхідного). Наявність на графіках зламів є ознакою вибору занадто великого кроку моделювання; в цьому випадку слід провести повторний експеримент, зменшивши крок моделювання. Скопіювати інформацію, виведену в графічні вікна шляхом виконання команди меню «Edit \ Copy Figure», після чого зберегти її за допомогою будь-якої програми, наприклад текстового редактора MS Word.

7.4.3 Встановити нульове значення коефіцієнта демпфірування і провести 2-3 експерименти при різній амплітуді гармонійного сигналу на виході генератора ($0 < A < b$, $b < A < b_2$, $A > b_2$ – для підсилювача з обмеженням і зоною нечутливості; $0 < A < b$, $A > b$ – у всіх інших випадках, крім ідеального двохпозиційного реле, для якого подібний експеримент не потрібно). При цьому значення часу моделювання повинно бути вибрано таким, щоб на інтервалі моделювання «вкладалося» 2-3 періоду гармонійного сигналу. Амплітуда тестового сигналу також не повинна бути обрана надмірно великий, щоб при суміщенні графіків часових залежностей вихідний сигнал НЕ не «загубився» на тлі вхідного. При виконанні цього пункту слід зберігати тільки графіки часових залежностей вхідного і вихідного сигналів НЕ.

7.4.4 Повторити для інших досліджуваних в даній лабораторній роботі нелінійностей заведеною вище методикою.

7.4.5 Результати моделювання кожної нелінійності:

- графік з характеристикою нелінійності (залежність «вихід-вхід» НЕ);
- суміщені графіки залежностей вхідного і вихідного сигналів НЕ від часу при згасаючому тестовому сигналі і гармонійному тестовому сигналі різної амплітуди.

7.4.5 При оформленні результатів моделювання необхідно звернути увагу на інформаційний супровід рисунків: осі повинні бути забезпечені позначеннями, мати коментарі. Крім того, на всіх графіках повинні бути відзначені характерні точки із зазначенням числових значень по осях, тобто точки, які пов'язані з параметрами НЕ (b , b_2 , c) і амплітудою (A) тестового

сигналу. Також за графіками слід розрахувати величину фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами НЕ.

7.4.5 Пояснення отриманих результатів по кожному НЕ. Пояснення вимагають такі події, як наявність або відсутність сигналу на виході НЕ, обмеження сигналу, відмінність в амплітудах вхідного і вихідного сигналів НЕ, фазовий зсув вихідного сигналу НЕ щодо вхідного. Описують ці події числові дані графіків повинні бути підтверджені аналітичним розрахунком.

7.5 Контрольні питання

1. Коливальний ланка: передаточна функція, характеристичне рівняння, полюси, назви і взаємозв'язок параметрів.
2. Текст програми: призначення змінної config.
3. Текст програми: з яких міркувань вибирається крок моделювання і час моделювання?
4. Модель в Simulink: можливі способи організації генератора.
5. Модель в Simulink: створення підсилювача з обмеженням і зоною нечутливості зі стандартних блоків бібліотеки Nonlinear.
6. Модель в Simulink: створення трипозиційного реле без гістерезису зі стандартних блоків бібліотеки Nonlinear. Як організувати трипозиційне реле з гістерезисом?
7. Обґрунтувати необхідність використання нелінійних елементів при моделюванні АСР
8. Основні типи нелінійностей та їх характеристики.
9. Навести приклади АСР з використанням типових нелінійностей та охарактеризувати їх.
10. Які нелінійності використовуються при реалізації реального ПІД - регулятора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ФАЗОВОЇ ПЛОЩИНИ

Мета роботи – познайомитися з особливостями дослідження нелінійних систем методом фазового простору, вивчення процесів в запропонованій системі на фазовій площині і в тимчасовій області за допомогою пакета математичного моделювання Matlab Simulink.

7.1 Структурна схема моделі дослідження

В роботі досліджується нелінійна система з нелінійним елементом (ідеальним двохпозиційним реле або реле з гістерезисом) і лінійної частиною другого порядку (двома інтеграторами з коефіцієнтом посилення або інерційним ланкою та інтегратором), що представлена на рис. 8.1.

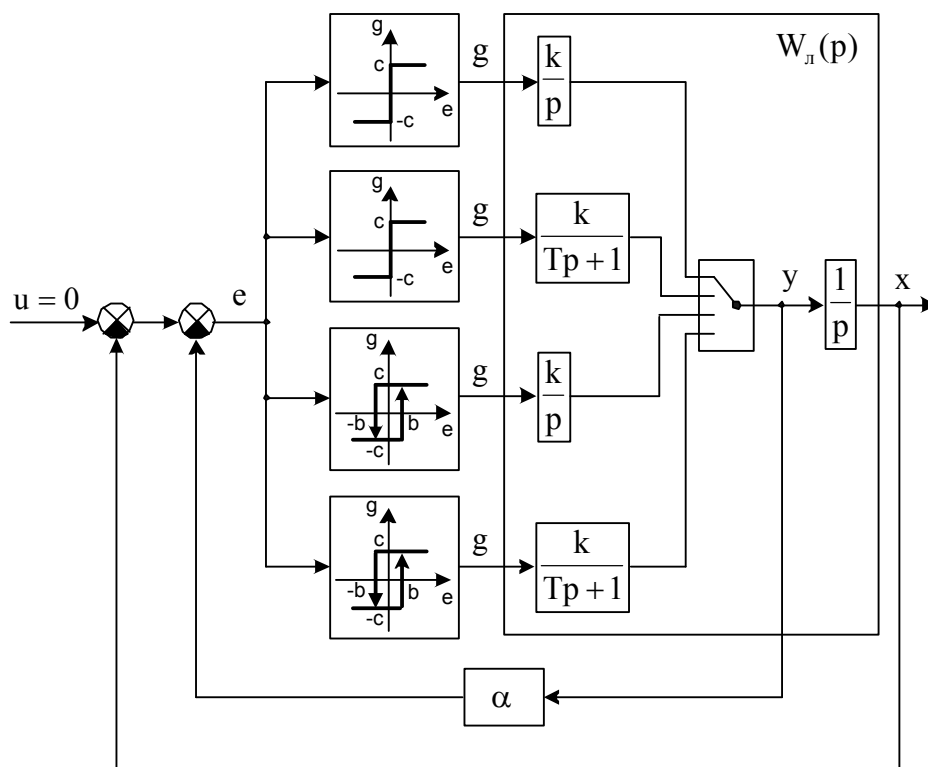


Рисунок 8.1 – Структурна схема системи: u – вхідний сигнал системи; e – сигнал на вході нелінійного елемента (НЕ); g – сигнал на виході НЕ; x – вихідний сигнал системи; y – його похідна (швидкість зміни); α – коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості ($\alpha \geq 0$); k – статичний коефіцієнт передачі; c, b – параметри НЕ; $W_{\text{л}}(p)$ – передаточна функція лінійної частини

Параметри НЕ і лінійної частини (ЛЧ) слід задавати відповідно до варіанта, наведеними в табл. 8.1.

Таблиця 8.1
Значення параметрів нелінійного елемента і лінійної частини

Параметри	Номер варіанта														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
c	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
b	0.1	0.2	0.25	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.3	1.5
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5

У процесі підготовки до даної лабораторної роботи необхідно ескізно з побудовою ліній перемикання зобразити фазові портрети для чотирьох варіантів конфігурації системи, зображеної на рис. 8.1:

1) ідеальне двопозиційне реле + лінійна частина:

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{k}{p^2} \quad (8.1)$$

2) ідеальне двопозиційне реле + лінійна частина:

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{k}{(Tp + 1)p} \quad (8.2)$$

3) двопозиційне реле з гістерезисом + лінійна частина:

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{k}{p^2} \quad (8.3)$$

4) двопозиційне реле з гістерезисом + лінійна частина:

$$W_{\text{л}}(p) = \frac{k}{(Tp + 1)p} \quad (8.4)$$

Для кожної конфігурації проаналізувати, за яких виникає змінний режим.

7.2 Використання пакету Matlab для побудови фазових портретів

Підготувати текст програми (m файл) і модель в Simulink (mdl файл). Як і в попередній роботі, зручно зв'язати їх один з одним: змінні, визначені в m файлі, використовуються при завданні параметрів блоків моделі, модель запускається на виконання також командою з m файлу, а при проведенні моделювання в Simulink результати записуються в робочу область пам'яті (Workspace), звідки зчитуються при побудові підсумкових графіків командами з m файлу. Приклад m файлу (FP_prog.m) наведено нижче.

```
% Дослідження нелінійної системи методом фазової площини (файл
FP_prog.m)
% Підключається файл: FP_mod.mdl.
% Використовувані позначення: НЕ - нелінійний елемент, ЛЧ - лінійна частина.
% Очищення всіх змінних в пам'яті і закриття всіх попередніх малюнків
clear all
close all
% Встановлення змінної, що визначає положенням перемикача
% конфігурації нелінійної системи в файлі FP_mod.mdl
% 1 – НЕ - ідеальне двопозиційне реле, ЛЧ -  $k / p^2$ 
% 2 – НЕ - ідеальне двопозиційне реле, ЛЧ -  $k / [(Tp + 1)p]$ 
% 3 – НЕ - двопозиційне реле з гістерезисом, ЛЧ -  $k / p^2$ 
% 4 – НЕ - двопозиційне реле з гістерезисом, ЛЧ -  $k / [(Tp + 1)p]$ 
config = 1;
% Визначення значень строкових змінних nlin і lin
switch config
case 1,
nlin = 'ід. 2 х поз. реле'; lin = 'k / p ^ 2';
case 2,
nlin = 'ід. 2 х поз. реле'; lin = 'k / [(Tp + 1) p]';
case 3,
nlin = '2 х поз. реле з ГИСТ. '; lin = 'k / p ^ 2';
case 4,
```

```

nlin = '2 x поз. реле з ГИСТ. '; lin = 'k / [(Tp + 1) p]';
end
% Час моделювання, с
t_end = 20;
% Обмеження кроку моделювання
step_max = 0.005;
% Параметри нелінійного елемента
b = 0.1;
c = 1;
% Параметри лінійної частини
k = 1;
T = 0.4;
% Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості
alfa = 0,0;
%Початкові умови:
% Задаючи різні початкові умови для системи, отримуємо набір
% фазових траєкторій, тобто фазовий портрет в системі координат оху;
    % Безліч початкових умов по x: [x0_min, x0_max];
% Безліч початкових умов по y: [y0_min, y0_max];
% При переборі початкових умов рухаємося від низу до верху з кроком
dy
% і зліва направо з кроком dx
% Призначення діапазонів зміни початкових умов
x0_min = -1.5;
y0_min = -1.5;
x0_max = 1.5;
y0_max = 1.5;
% Крок при переборі початкових умов
dx = 0.8;
dy = 0.9;
% Вихідного значення початкових умов
x0 = x0_min;
y0 = y0_min;
% Завдання колірної гами для малювання фазових траєкторій
% 'R' - red, червоний;
% 'G' - green, зелений;
% 'C' - cyan, блакитний;
% 'M' - magenta, пурпурний;
% 'K' - black, чорний;
% 'Y' - yellow, жовтий;
% 'B' - blue, синій
color = [ 'r'; 'g'; 'c'; 'm'; 'k'];% багатобарвні картинка
% Color = 'r'; % одноколірні картинка
% Підготовка рисунка з фазовим портретом
figure (1)

```

```

xlabel ('x')
ylabel ('y')
title ([ 'Фазовий портрет. НЕ -', nlin, ', b =', num2str (b), ', c =', num2str (c), ';
ЛЧ -', ...
lin, ', k =', num2str (k), ', T =', num2str (T), '; alfa = ', num2str (alfa)])
hold on
grid on
% Виклик моделі
open_system ('FP_mod.mdl');
% Початкової установки номера кольору
i = 0;
% Перебір початкових умов; при будь-якому вигляді початкових умов
запускає
% моделювання, а після його закінчення будується фазова траєкторія
while x0 <= x0_max
i = i + 1; % Номер поточного кольору
if i == length (color) + 1
i = 1;
end
x0_ = x0; % Запам'ятовування значень НУ
y0_ = y0; % Для поточної фазової траєкторії
sim ('FP_mod'); % Запуск моделювання
gr1 = plot (x, y); % X і y - масиви з workspace
set (gr1, {'Color'}, {color (i)});
y0 = y0 + dy;
if y0 > y0_max
y0 = y0_min;
x0 = x0 + dx;
end
end
% Рисування лінії / ліній перемикавання
y1 = [-2.5; 2.5];
if (config == 1) | (Config == 2)
x1 = - alfa. * y1; % Рівняння лінії перемикавання, НЕ - ід. 2 х поз. реле
gr2 = plot (x1, y1);
set (gr2, {'Color'}, {'b'});
else
x11 = - alfa. * y1 + b; % Рівнянь ліній
x12 = - alfa. * y1 - b; % Перемикавання, НЕ - 2 х поз. реле з ГИСТ.
gr2 = plot (x11, y1);
set (gr2, {'Color'}, {'b'});
gr2 = plot (x12, y1);
set (gr2, {'Color'}, {'b'});
end
% Побудова процесів в часі, відповідно

```

```

% останньої фазової траєкторії
figure (2)
xlabel ( 't, сек')
ylabel ( 'x, y')
title ([ 'x (t) і y (t). HE -', nlin, ', b =', num2str (b), ', c =', num2str (c), '; ЛЧ -',
...
lin, ', k =', num2str (k), ', T =', num2str (T), '; alfa = ', num2str (alfa), ...
'; x0 = ', num2str (x0_),'; y0 = ', num2str (y0_)])
hold on
grid on
gr3 = plot (time, x);
set (gr3, { 'Color'}, { 'r'});
gr4 = plot (time, y);
set (gr4, { 'Color'}, { 'b'});
legend ( 'x (t)', 'y (t)', 4);

```

В m-файлі необхідно задати значення констант-параметрів нелінійностей і лінійної частини, значення коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості, задати крок і час моделювання, діапазони зміни початкових умов для сигналів x і y , крок при їх переборі і їх вихідні значення, а також значення змінної `config`, що управляє конфігурацією моделі.

В процесі виконання m-файлу відбувається підготовка графічного вікна для виведення фазового портрета, виклик і циклічний запуск моделі нелінійної системи при різних початкових умовах по x і y . За результатами моделювання будуються фазовий портрет системи і тимчасові процеси $x(t)$ і $y(t)$, що відповідають останній з відтворених на фазовому портреті фазових траєкторій. Для отримання рисунка із зображенням лише однієї фазової траєкторії необхідно задати однакові значення для кордонів зміни початкових умов по x і y .

При складанні моделі в Simulink використовуються елементи бібліотек Simulink (Math, Nonlinear, Sinks і Sources) і Simulink Extras (Additional Linear), доступні через Simulink Library Browser. Схема моделювання з файлу-прикладу `FP_mod.mdl` представлена на рис. 8.2.

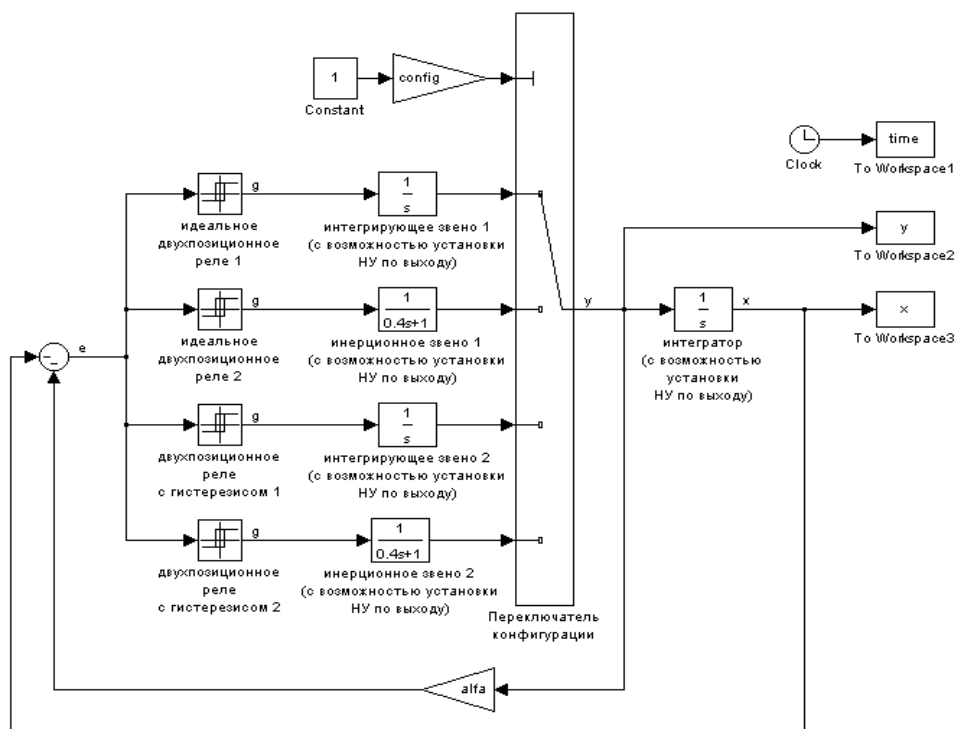


Рисунок 8.2 – Схема моделювання

Інтегрують і інерційні ланки з можливістю установки початкових умов щодо виходу знаходяться в додатковій бібліотеці Simulink □ Simulink Extras \ Additional Linear.

Управління перемикачем конфігурації системи здійснюється через змінну config, значення якої задається в m-файлі.

В настройках параметрів моделювання слід вказувати спеціально призначені для цієї мети змінні, значення яких задані у файлі-сценарії. Параметри моделювання повинні бути вказані в вікні «Simulation parameters», доступному через меню Simulation \ Simulation parameters вікна, в якому відкрито mdl файл (рис. 8.3).

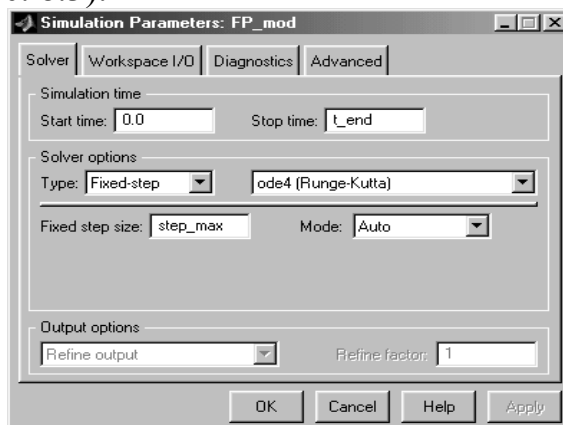


Рисунок 8.3 – Параметри моделювання

Установку параметрів різних функціональних блоків моделі пояснюють рис. 8.4–8.6. В налаштуваннях блоків використовуються змінні, задані в m файлі. Такий підхід допомагає економити час при налаштуванні і перенастроюванні моделі.

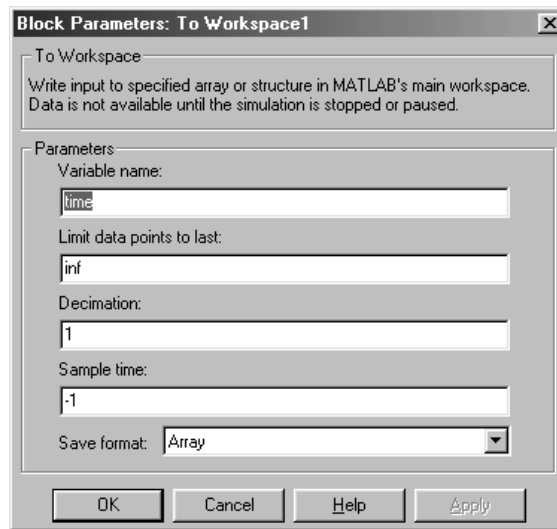
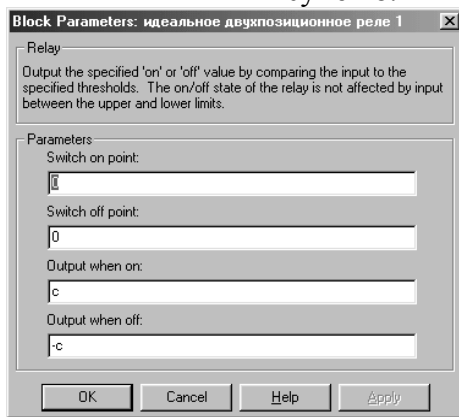
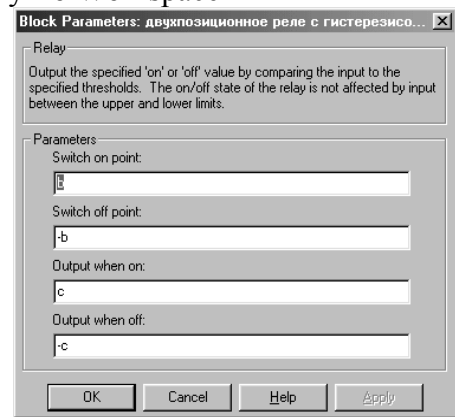


Рисунок 8.4 – Параметры блока To Workspace



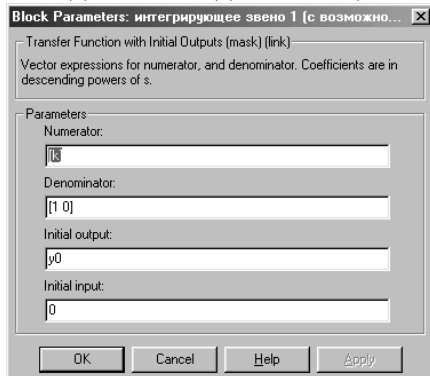
а)



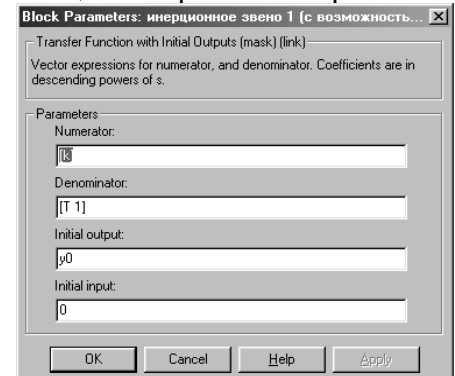
б)

Рисунок 8.5 – Параметры нелинейных элементов модели:

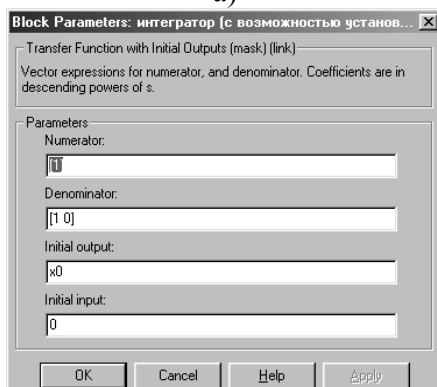
а – идеального двухпозиционного реле; б – двухпозиционного реле с гистерезисом



а)



б)



в)

Рисунок 8.6 – Параметры блоков линейной части системы:

а – интегрирующей ланки;

б – инерционной ланки;

в – интегратора

7.3 Порядок виконання роботи

7.3.1 Отримайте і зафіксуйте фазовий портрет системи з ідеальним двохпозиційним реле і лінійною частиною без зворотного зв'язку за швидкістю. Для одного варіанта початкових умов отримаєте зображення фазової траєкторії і процесів у часі $x(t)$ і $y(t)$.

7.3.2 Введіть негативний зворотний зв'язок по швидкості ($\alpha \approx 0.1-0.5$) так, щоб при цьому не виник ковзаючий режиму. Зафіксуйте фазовий портрет, фазову траєкторію і тимчасові процеси.

7.3.3 Збільште значення (α) до величини, при якій в системі виникає змінний режим і зображає точка переміщається по лінії перемикавання. Зафіксуйте фазовий портрет, фазову траєкторію і тимчасові процеси.

7.3.4 Змініть конфігурацію моделі системи, активувавши комбінацію блоків «ідеальне двопозиційне реле + лінійна частина ($k / [(T_p + 1)p]$)», після чого повторіть дії представлені вище.

7.3.5 Змініть конфігурацію моделі системи, активувавши комбінацію блоків «двопозиційне реле з гістерезисом + лінійна частина (k/p^2) і відключивши зворотний зв'язок по швидкості. Зафіксуйте фазовий портрет системи, при цьому діапазон зміни і крок зміни початкових умов слід задати таким чином, щоб отримати фазові траєкторії, що беруть початок як в області між лініями перемикавання ($|x(0)| < b$), так і поза нею ($|x(0)| > b$). Для одного варіанта початкових умов отримаєте зображення фазової траєкторії і процесів у часі $x(t)$ і $y(t)$.

7.3.6 Введіть в модель зворотний зв'язок по швидкості ($\alpha \approx 0.1 - 0.5$) так, щоб при цьому не виник ковзаючий режим. Зафіксуйте фазовий портрет системи, забезпечивши такі варіанти початкових умов, при яких фазові траєкторії починаються як в області між лініями перемикавання, так і поза її: а) $|x(0)| < b, y(0) = 0$; б) $|x(0)| > b, |y(0)| > b/\alpha$. Побудуйте дві фазові траєкторії і відповідні їм процеси в часі для таких варіантів початкових умов.

7.3.7 Збільште α до величини, при якій в системі виникає змінний режим і зображає точка переміщається в даному випадку між двома лініями перемикавання. Зафіксуйте фазовий портрет, дві фазових траєкторії і відповідні їм тимчасові процеси.

7.3.8 Змініть конфігурацію моделі системи, активувавши комбінацію блоків «двопозиційне реле з гістерезисом + лінійна частина ($k / [(T_p + 1)p]$)». Зафіксуйте фазовий портрет, фазову траєкторію і тимчасові процеси при відсутності зворотного зв'язку за швидкістю.

7.3.9 Введіть зворотний зв'язок по швидкості і зафіксуйте фазовий портрет, фазову траєкторію і тимчасові процеси як при відсутності, так і при наявності змінного режиму.

7.3.10 Підготовча частина: ескізи фазових портретів і супроводжуючі розрахунки (диференціальні рівняння, що описують лінійну частину; рівняння, що описують нелінійні елементи; рівняння фазових траєкторій і ліній

перемикання). Результати моделювання (фазові портрети, фазові траєкторії, тимчасові процеси $x(t)$ і $y(t)$). Аналіз результатів (знаходження відповідності між видами фазових траєкторій і процесів у часі, аналіз впливу коефіцієнта зворотного зв'язку на вид фазового портрета, на виникнення ковзного режиму в системі та ін.). Висновки (аргументоване підтвердження відповідності попередніх розрахунків і результатів експерименту).

7.4. Контрольні питання

1. Визначення фазової траєкторії і фазового портрета.
2. Визначення лінії перемикання. Від чого залежить нахил лінії (ліній) перемикання?
3. Визначення змінного режиму. Умови його появи.
4. Граничний цикл: визначення, умови виникнення та графічне зображення на фазовій площині.
5. Визначення системи, стійкої / нестійкою в малому / великому.
6. Наведіть приклад фазової траєкторії і знайдіть відповідний йому процес у часі.
7. У чому схожість фазових портретів стійких (нестійких, на кордоні стійкості) систем?
8. Охарактеризуйте типові фазові траєкторії.
9. Основні принципи методу фазового простору.
10. Переваги та недоліки методу фазового простору.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ГАРМОНІЙНОГО БАЛАНСУ

Мета роботи – вивчити методику проведення гармонічного балансу та виконати визначення частоти та амплітуди автоколивального режиму, оцінка стійкості періодичних режимів; моделювання нелінійної системи і визначення параметрів коливань за отриманим процесу; перевірка виконання гіпотези фільтра засобами пакету Matlab Simulink.

9.1 Характеристика системи що досліджується

У роботі необхідно провести дослідження нелінійної системи (рис. 8.1).

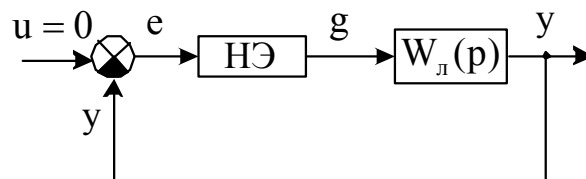


Рисунок 9.1 – Структурна схема системи:
НЕ – нелінійний елемент; $W_{л}(p)$ – передаточна функція лінійної частини (ЛЧ)

Як нелінійний елемент використовується: двопозиційне реле з гістерезисом (рис. 9.2,а), трипозиційне реле без гістерезису (рис. 9.2,б) або люфт (рис. 3.2,в).

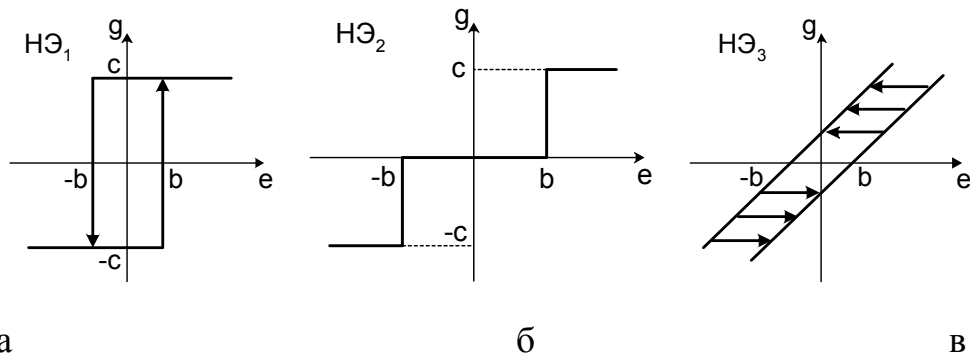


Рисунок 9.2 – Характеристики нелінійних елементів: а – двопозиційне реле з гістерезисом; б – трипозиційне реле без гістерезису; в – люфт

Таблиця 9.1

Варіанти лінійної частини	
Номер ЛЧ	Передаточна функція ЛЧ
1	$W_{\epsilon 1}(\delta) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}$
2	$W_{\epsilon 2}(\delta) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)p}$
3	$W_{\epsilon 3}(\delta) = \frac{k \cdot (T_1 p + 1)}{(T_2 p - 1)^2 \cdot (T_3 p + 1)^2}$
4	$W_{\epsilon 4}(\delta) = \frac{k \cdot (T_1 p + 1)}{(T_2 p - 1) \cdot p}$

Метод гармонійного балансу дозволяє визначити, чи можуть в нелінійній системі виникнути періодичні коливання, і якщо так, то оцінити їх амплітуду (A_n) і частоту (ω_n), а також оцінити стійкість цих періодичних режимів. Метод застосовується, якщо виконується гіпотеза фільтра, тобто лінійна частина забезпечує придушення високочастотних складових вхідного негармонічного сигналу, який надходить з виходу нелінійного елемента. Умовою виникнення періодичного режиму є проходження еквівалентної частотної передаточної функції через критичну точку $(-1, j0)$, тобто виконання рівності:

$$W_L(j\omega)W_H(jA) = -1, \quad (9.1)$$

яке для вирішення представляється в більш зручному вигляді:

$$W_L(j\omega) = -\frac{1}{W_H(jA)} \quad (9.2)$$

9.2 Характеристика програми дослідження

За даними рис. 9.2 і табл. 9.1 і 9.2 відповідно до свого варіантом обрати:

- 1) передаточну функцію лінійної частини і значення її параметрів;
- 2) типи нелінійних елементів і значення їх параметрів.

Таблиця 9.2

Значення параметрів лінійної частини і нелінійних елементів

Варіанта		1	2	3	4	5	6	7	8
$W_{л(p)}$		1	2	3	4	1	2	3	4
Тип НЕ		1, 2	2, 3	1, 3	1, 3	2, 3	1, 3	1, 2	1, 2
Параметри	k	6	5	3	4	15	2	10	8
	T_1	0.1	0.2	10	0.4	0.5	0.6	9	0.8
	T_2	0.2	0.4	5	0.8	1.0	1.2	6	1.6
	T_3	1	-	0.1	-	5	-	0.2	-
	b	0.1	0.2	0.25	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5
	c	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
Варіант		9	10	11	12	13	14	15	16
$W_{л(p)}$		1	2	3	4	1	2	3	4
Типи НЕ		1, 3	1, 2	1, 2	1, 3	1, 2	2, 3	1, 3	1, 3
Параметри	k	15	10	9	6	7	8	5	7
	T_1	0.9	1.0	7	0.6	0.2	0.3	9	0.7
	T_2	1.8	2.0	5	1.2	0.3	0.5	4	1.5
	T_3	9	-	0.3	-	1.5	-	0.2	-
	b	0.5	1.0	0.5	0.35	0.3	0.35	0.35	0.45
	c	5	6	5.5	3	2	2.5	3	4

Експерименти проводитимуться для обраного варіанта лінійної частини та нелінійності спочатку першого типу, а потім другого.

Для кожного типу нелінійності свого варіанта підготуйте на підставі довідкових даних вирази для коефіцієнтів гармонійної лінеаризації $q(A)$ і $q_1(A)$ і запишіть еквівалентний комплексний коефіцієнт передачі.

Запишіть комплексний коефіцієнт передачі лінійної частини свого варіанту $W_{л}(j\omega)$, побудуйте (ескізно) її ЛАЧХ і ФЧХ, після чого для кожного типу нелінійності приведіть спільні характеристики лінійної частини (АФХ лінійної частини $W_{л}(j\omega)$) і нелінійності.

Проведіть якісне дослідження системи: оцініть можливість виникнення періодичних режимів та їх стійкість. Там, де це можливо, запишіть вирази для критичного коефіцієнта посилення ЛЧ, при якому в нелінійній системі виникають автоколивання.

Вивчіть текст програми (файл GB_prog.m) і структуру моделей (файли GB_mod.mdl і R_Fourie.mdl).

Графічний розрахунок параметрів періодичних режимів з використанням методу гармонійного балансу проводиться за сценарієм, записаному в файлі GB_prog.m. Моделювання нелінійної системи здійснюється за допомогою файлів GB_prog.m і GB_mod.mdl, а аналіз спектрального складу періодичного режиму на виході лінійної частини – за допомогою файлів GB_prog.m і R_Fourie.mdl.

Зміст файлу GB_prog.m:

% Дослідження нелінійних систем методом гармонійного балансу

% Використовувані файли: GB_prog.m, GB_mod.mdl і R_Fourie.mdl.

```

% Використовуваних позначень: НЕ - нелінійний елемент, ЛЧ - лінійна
частина.
% Очищення всіх змінних в пам'яті
clear all
% Закриття всіх попередніх малюнків
set (0, 'ShowHiddenHandles', 'on')
delete (get (0, 'Children'))
% Встановлення змінної, що визначає положенням перемикача
% Конфігурації нелінійної частини в файлі GB_mod.mdl
% 1 – НЕ - двопозиційне реле з гістерезисом
% 2 – НЕ - трипозиційне реле без гістерезису
% 3 – НЕ - люфт
config_nlin = 2;
% Встановлення змінної, що визначає положенням перемикача
% Конфігурації лінійної частини в файлі GB_mod.mdl
% 1 - ЛЧ -  $W_{л1}(p) = k / [(T1 * p + 1) (T2 * p + 1) (T3p + 1)]$ 
% 2 - ЛЧ -  $W_{л2}(p) = k / [(T1 * p + 1) (T2 * p + 1) p]$ 
% 3 - ЛЧ -  $W_{л3}(p) = [k (T1 * p + 1)] / [(T2 * p + 1)^2 (T3 * p + 1)^2]$ 
% 4 - ЛЧ -  $W_{л4}(p) = [k (T1 * p + 1)] / [(T2 * p + 1) p]$ 
config_lin = 2;
k = 5;
T1 = 0.1;
T2 = 0.2;
T3 = 1;
b = 0.1;
c = 1;
% Графічний розрахунок параметрів періодичних режимів с
використанням
% методу гармонійного балансу
% Опис лінійної частини
switch config_lin
case 1,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення частоти (в рад)
w = [0.02: 0.01: 100];
% Комплексний коефіцієнт передачі ЛЧ
W_lin = k. / ((T1 * j * w + 1). * (T2 * j * w + 1). * (T3 * j * w + 1));
% Певне значення строкової змінної lin
lin = 'Wл1 (p)';
case 2,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення частоти (в рад)
w = [2: 0.01: 100];
% Комплексний коефіцієнт передачі ЛЧ
W_lin = k. / ((T1 * j * w + 1). * (T2 * j * w + 1). * (J * w));
% Визначення значення строкової змінної lin
lin = 'Wл2 (p)';

```

```

case 3,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення частоти (в рад)
w = [0.01: 0.01: 300];
% Комплексний коефіцієнт передачі ЛЧ
W_lin = (k * (T1 * j * w + 1)) ./ ((T2 * j * w + 1). ^ 2. * (T3 * j * w + 1). ^ 2);
% Певне значення строкової змінної lin
lin = 'Wл3 (p)';
case 4,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення частоти (в рад)
w = [1: 0,01: 100];
% Комплексний коефіцієнт передачі ЛЧ
W_lin = (k * (T1 * j * w + 1)) ./ ((T2 * j * w + 1). * (J * w));
% Певне значення строкової змінної lin
lin = 'Wл4 (p)';
end
% Опис ЛЧ як частотної характеристики через W_lin (jw)
SYSL = frd (W_lin, w);
% -
% Опис нелінійної частини
switch config_nlin
case 1,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення амплітуди на вході НЕ
A = [b: 0.01: 3.0];
% Коефіцієнти гармонійної лінеаризації
q = 2 * c / (pi * b). * ((2 * b. / A). * sqrt (1 - (b./A).^2));
q1 = -2 * c / (pi * b). * 2 * (b./A). ^ 2;
% Певне значення строкової змінної nlin
nlin = '2 х поз. реле з ГИСТ. ';
case 2,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення амплітуди на вході НЕ
A = [b + 0.0001: 0.005: b * sqrt (2)];
A_ = [b * sqrt (2): 0.005: 3.0];
% Коефіцієнти гармонійної лінеаризації
q = (4 * c. / (pi * A)). * sqrt (1 - (b./A).^2);
q1 = 0;
q_ = (4 * c. / (pi * A _)). * sqrt (1 - (b./A _).^2);
q1_ = 0;
% Еквівалентний комплексний коефіцієнт передачі W_nlin (jA) НЕ
W_nlin_ = q_ + j * q1_;
% Характеристика -1 / W_nlin (jA)
S_ = -1./W_nlin_;
% Опис НЕ як амплітудної характеристики через -1 / W_nlin (jA)
SYSN_ = frd (S_, A_);
% Певне значення строкової змінної nlin
nlin = '3 х поз. реле без ГИСТ. ';

```

```

case 3,
% Початкове значення, крок і кінцеве значення амплітуди на вході HE
A = [b + 0.001: 0.01: 100];
% Коефіцієнти гармонійної лінеаризації
alfa = asin (1-2 * b. / A);
q = (1 / pi) * (pi / 2 + alfa + 0.5 * sin (2 * alfa));
q1 = - (4 * b). * (1 b./A)./ (pi * A);
% Певне значення строкової змінної nlin
nlin = 'люфт';
end
% Еквівалентний комплексний коефіцієнт передачі W_nlin (jA) HE
W_nlin = q + j * q1;
% Характеристика -1 / W_nlin (jA)
S = -1./W_nlin;
% Опис HE як амплітудної характеристики через -1 / W_nlin (jA)
SYSN = frd (S, A);
% -
% візуалізації
% Побудова W_lin (jw) і -1 / W_nlin (jA) за допомогою plot (загальний
вигляд)
figure (1)
gr_W_lin = plot (real (W_lin), imag (W_lin));
set (gr_W_lin, { 'Color'}, { 'r'});
hold on
gr_S = plot (real (S), imag (S));
set (gr_S, { 'Color'}, { 'b'});
title ([ 'Розрахунок гарм. балансу. HE -', nlin, ', b =', num2str (b), ', c =',
num2str (c), '; ЛЧ -', ...
lin, ', k =', num2str (k), ', T1 =', num2str (T1), ', T2 =', num2str (T2), ...
', T3 =', num2str (T3)])
xlabel ( 're (W lin), re (S)');
ylabel ( 'im (W lin), im (S)');
legend ( 'W lin (jw)', 'S (jA)', 0);
grid on
% -
% Побудова W_lin (jw) і -1 / W_nlin (jA) за допомогою LTI Viewer
if config_nlin == 2
ltiview ({ 'nyquist'}, SYSL, '-b', SYSN, '-r')
ltiview ({ 'nyquist'}, SYSL, '-b', SYSN_, '-r')
else
ltiview ({ 'nyquist'}, SYSL, '-b', SYSN, '-r')
end
% -
% Завершення графічного розрахунку параметрів періодичних режимів
% з використанням методу гармонійного балансу

```

```

% =====
%      ^^^^^^^^^^^^^^^^^      Моделювання      нелінійної      системи      (НС)
%      ^^^^^^^^^^^^^^^^^
% з визначенням параметрів автоколивань
% Завдання часу моделювання
t_end = 15;
% Обмеження кроку моделювання зверху
step_max = 0.005;
% Завдання амплітуди сигналу на виході ЛЧ в початковий момент часу
y0 = 0.5;
% Виклик моделі
open_system ('GB_mod.mdl');
% Запуск моделі
sim ('GB_mod');
% Зчитування фактичних параметрів моделювання
Max_Step_Size = get_param ('GB_mod', 'MaxStep');
Stop_Time = get_param ('GB_mod', 'StopTime');
% Витяг останнього елемента з векторів vec_period і vec_amp
% (Визначення сталого значення періоду та амплітуди автоколивань
% з використанням даних, записаних в робочу область пам'яті)
clc% очищення командного вікна
period = vec_period (length (vec_period));
clear vec_period;
amp_kol = vec_amp (length (vec_amp))% висновок в командне вікно
clear vec_amp;
% Розрахунок частоти сигналу на виході ЛЧ (використовується у
подальшому
% Розрахунку амплітуди гармонік)
frequency = 1 / period;
w_kol = 2 * pi * frequency% висновок в командне вікно
% Побудова процесу в часі на виході ЛЧ
фігура (2)
gr = сюжет (t_and_y (:, 1), t_and_y (:, 2));
set (gr, {'Colour'}, {'r'});
title (['Процес y (t). НЭ -', nlin, ', b =', num2str (b), ', c =', num2str (c), '; ЛЧ -', ...
lin, ', k =', num2str (k), ', T1 =', num2str (T1), ', T2 =', num2str (T2), ...
', T3 =', num2str (T3), ', y0 =', num2str (y0)])
xlabel (['t, сек Ампл.кол. =', num2str (amp_kol), ', Wкол =', num2str (w_kol),
'с ^ -1']);
ylabel ('y');
сітка на
% -
% закрытие модели
% close_system ('GB_mod', 1)

```

```

% =====
%  ^^^^^^^^^^^^^^^^^^ Аналіз спектра автоколивального процесу
%  ^^^^^^^^^^^^^^^^^^

% Виклик програми, що визначає амплітуду гармоніка сигналу на виході
% ЛЧ
open_system ('R_Fourie.mdl');
% Трансляції параметрів моделювання НС 'GB_mod.mdl' в файл
% R_Fourie.mdl
set_param ('R_Fourie', 'MaxStep', Max_Step_Size);
set_param ('R_Fourie', 'StopTime', Stop_Time);
% Запуск програми, вичисляючої амплітуду гармонік
sim ('R_Fourie');
% закриття програми
% close_system ('R_Fourie', 1)
% Вилучення останнього елемента з кожного вектора, що містить
% амплітуди
% гармонік (визначення встановлених значень амплітуд гармонік з
% використання даних, записаних у робочу область пам'яті)
magn_0 = vec_magn_0 (довжина (vec_magn_0));
очистити vec_magn_0;
magn_1 = vec_magn_1 (довжина (vec_magn_1));
очистити vec_magn_1;
magn_2 = vec_magn_2 (довжина (vec_magn_2));
очистити vec_magn_2;
magn_3 = vec_magn_3 (довжина (vec_magn_3));
очистити vec_magn_3;
magn_4 = vec_magn_4 (довжина (vec_magn_4));
очистити vec_magn_4;
magn_5 = vec_magn_5 (довжина (vec_magn_5));
очистити vec_magn_5;
% Перевірка гіпотез фільтра
фільтрація = magn_1 / magn_3
% Побудови гістограм
фігура (3);
бар ([0 1 2 3 4 5], [magn_0 magn_1 magn_2 magn_3 magn_4 magn_5]);
сітка на
Назва (['Гарм. склад у (t). НЭ -', nlin, ', b =', num2str (b), ...
', c =', num2str (c), '; ЛЧ - ', lin, ', k =', num2str (k), ', T1 =', num2str (T1), ...
', T2 =', num2str (T2), ', T3 =', num2str (T3)])
xlabel (['Номер гармоніки ГФ: A1 / A3 =', num2str (фільтрація)]);
ylabel ('Амплітуда гармоніки');

```

У файлі задаються значення параметрів лінійної частини та нелінійної елемента, а також початкові умови по виходу лінійної частини, вказується час моделювання та етап моделювання.

Для проведення графічного обчислення параметрів періодичних режимів у файлі містяться описи ЛЧ (через комплексний передаточний коефіцієнт) та нелінійності (за коефіцієнтами гармонічної лінеаризації та еквівалентний комплексний передавальний коефіцієнт). Спільне відтворення характеристик $W_d(j\omega)$ і $-1/W_i(jA)$ здійснюється двома способами: за допомогою команди plot та команди ltiview. Перша дозволяє спільно вивести зазначені характеристики без виведення комплексно-спряжених характеристик $W_d(j\omega)$ і $-1/W_i(jA)$, але не дозволяє по точці їх перетину визначити частоту та амплітуду періодичних режимів. За допомогою другого одночасно виводяться всі чотири характеристики, але існує можливість визначення частот і амплітуд по точці перетину: команда збільшення контекстного меню, викликаного правою клавішею миші, дозволяє збільшити потрібну область рисунка, після чого потрібно помістити вказівник миші на потрібну характеристику та натиснути на її ліву клавішу – на графіці з'являються відмітка та інформаційне вікно, яке можна перемістити мишею до точки перетину. Для випадку системи з ідеальним трьохпозиційним реле передбачено розділене побудова характеристик до і після точки екстремуму за допомогою двох команд ltiview.

Після завершення графічного розрахунку здійснюється виклик і запуск моделі нелінійної системи (GB_mod.mdl). По закінченню моделювання побудований тимчасовий процес $y(t)$ при виході лінійної частини, визначається частота та амплітуда коливань (їх значення можна побачити в командному вікні та на створеному рисунку).

На етапі аналізу спектрального складу періодичного режиму на виході лінійної частини здійснюється виклик і запуск моделі (R_Fourie.mdl), що визначає амплітуду гармоніка сигналу $y(t)$, записаного в робочу область пам'яті, і побудована результуюча гістограма «Номер гармоніки – амплітуда гармоніки». В командному вікні та вікні з гістограмою виводиться співвідношення амплітуд першого та третього гармоніку, що дозволяє зробити висновок про виконання / невиконання гіпотез фільтра.

9.3 Використання пакету Matlab для виконання гармонічної лінеаризації

При складанні моделей в Simulink (GB_mod.mdl і R_Fourie.mdl) використовуються елементи бібліотеки Simulink (Math, Linear, Nonlinear, Signals & Systems, Sinks and Sources), додаткові можливості Simulink (додаткові лінійні) та Power System Blockset (додаткова бібліотека \ Вимірювання) , доступні через браузер Simulink Library Browser (рис. 9.3–9.6). В моделі нелінійної системи GB_mod.mdl, показаної на рис. 9.3, передбачені перемикачі конфігурації лінійної та нелінійної частин, управління ними здійснюється відповідно через змінні config_lin та config_nlin, значення яких задаються у файлі GB_prog.m.

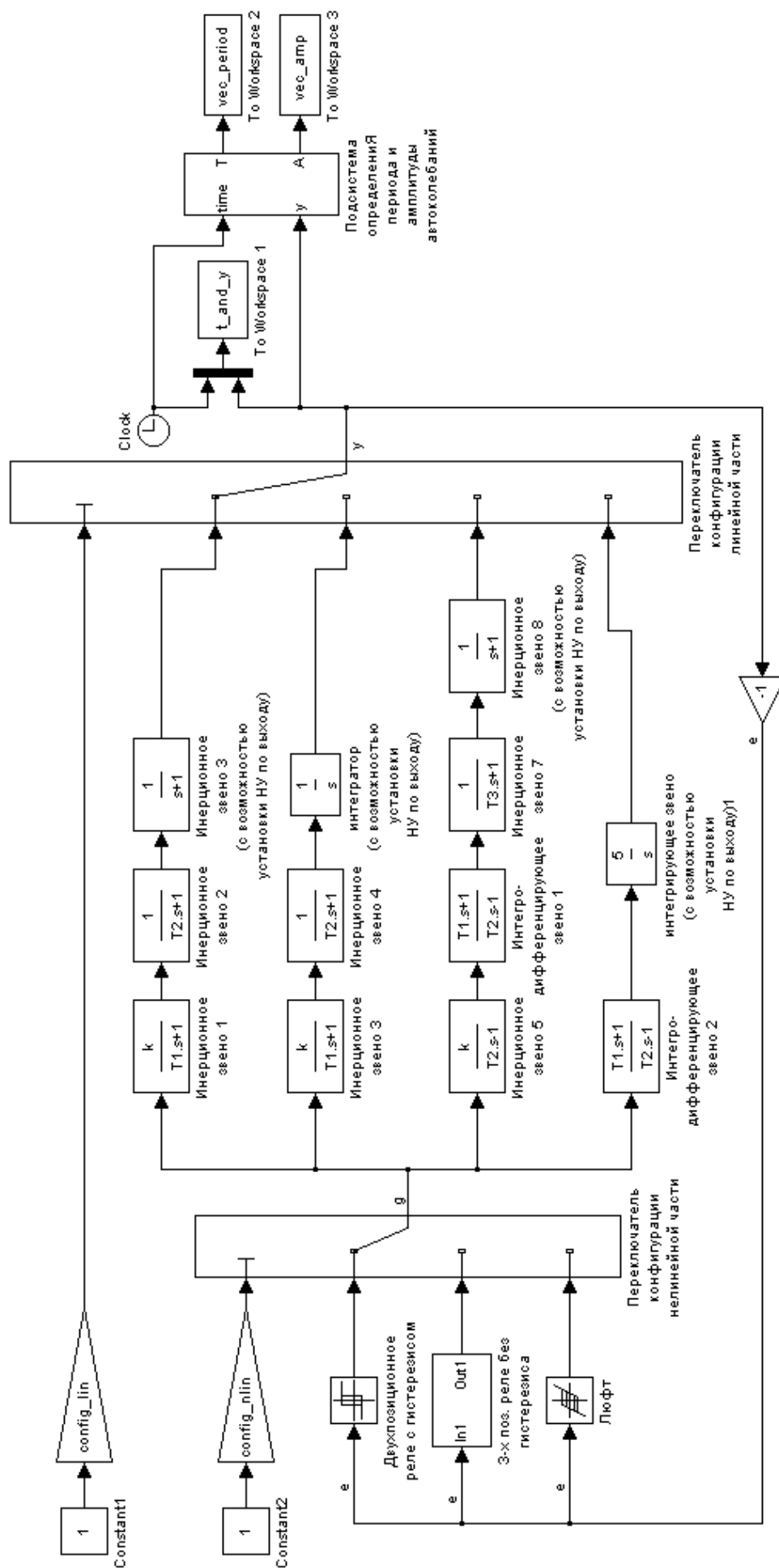


Рисунок 9.3 – Схема моделирования нелинейной системы в Simulink (файл GB_mod.mdl)

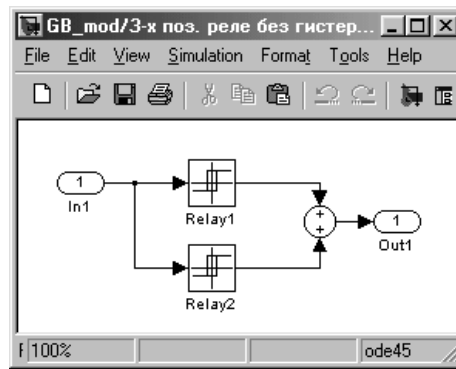


Рисунок 9.4 – Організація трипозиційного реле без гістерезису (Файл GB_mod.mdl)

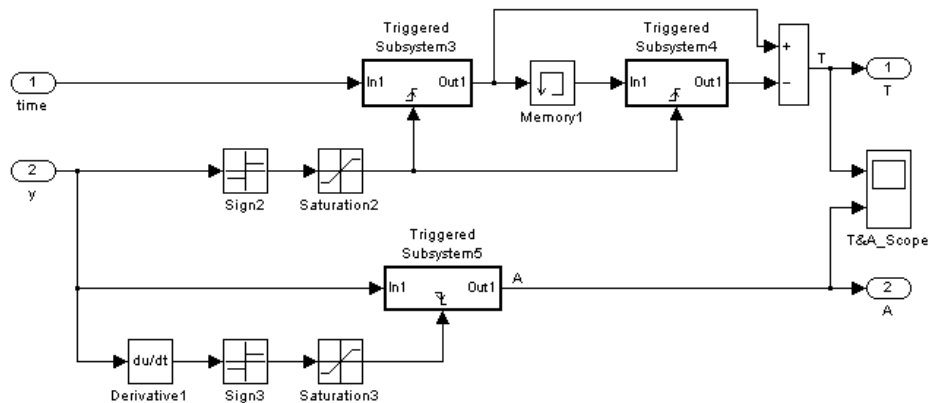


Рисунок 9.5 – Підсистема визначення періоду і амплітуди автоколивань (файл GB_mod.mdl)

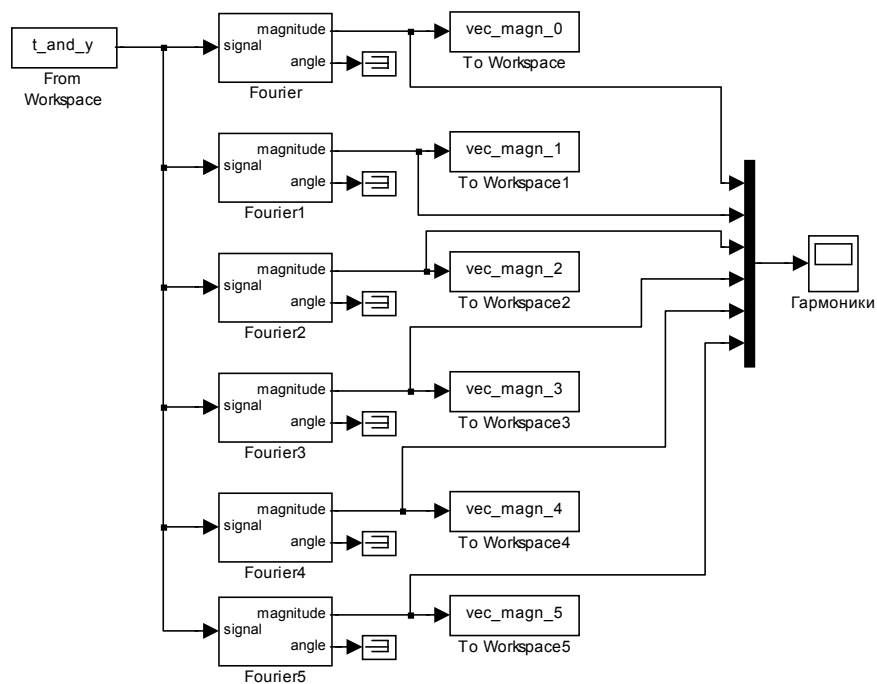


Рисунок 9.6 – Модель в Simulink, що обчислює амплітуду гармонік в складі періодичного процесу на виході лінійної частини (файл R_Fourie.mdl)

Параметри моделювання повинні бути вказані в вікні Параметри моделювання, доступні через меню Simulation \ Simulation параметрів вікна, в якому відкрито mdl файл (рис. 9.7, 9.8).

Параметри моделювання повинні бути вказані в вікні Simulation parameters, що доступне через меню Simulation \ Simulation parameters вікна, в якому відкрито mdl файл (рис. 9.7, 9.8).

Установку параметрів різних функціональних блоків моделей GB_mod.mdl і R_Fourie.mdl пояснюють рис. 9.9–9.15.

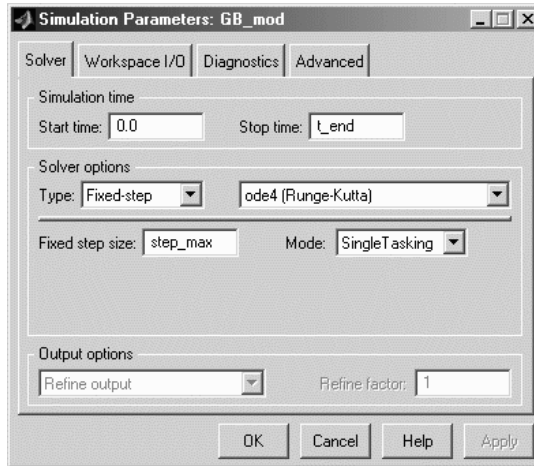


Рисунок 9.7 – Параметри моделювання для файлу GB_mod.mdl

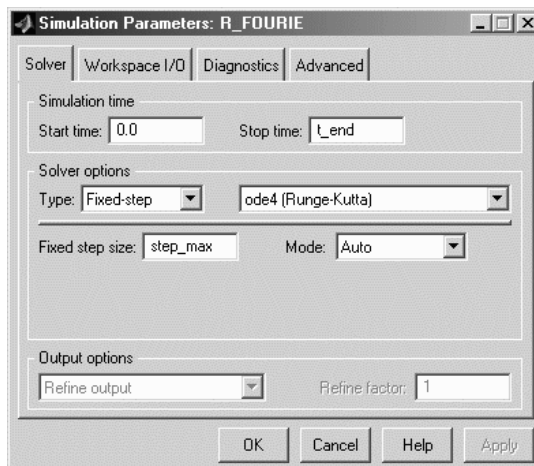
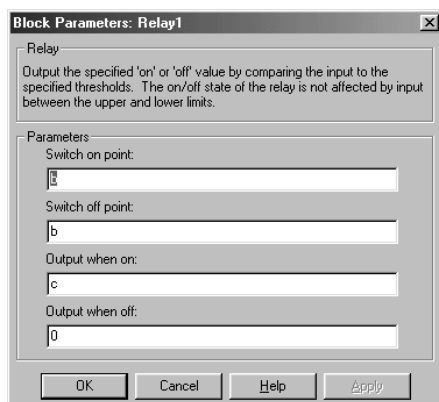
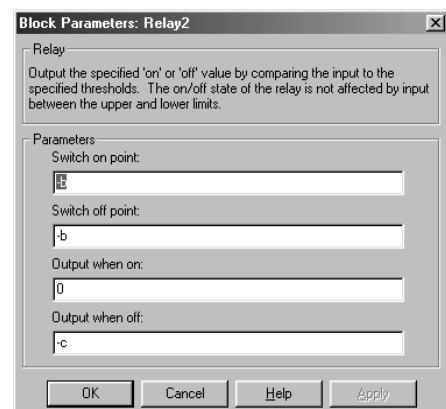


Рисунок 9.8 – Параметри моделювання для файлу R_Fourie.mdl

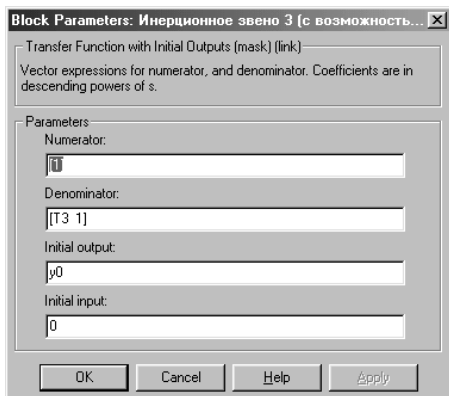


а)

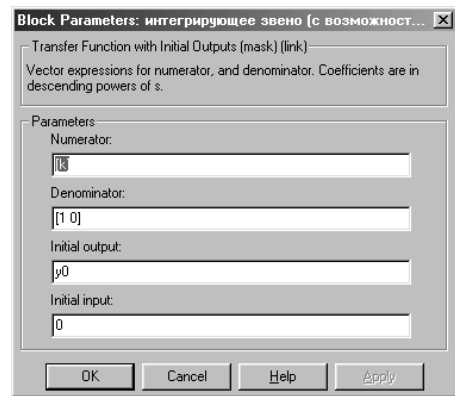


б)

Рисунок 9.9 – Параметри блоків в складі трипозиційного реле без гістерезису (файл GB_mod.mdl): а – блоку Relay1; б – блоку Relay2

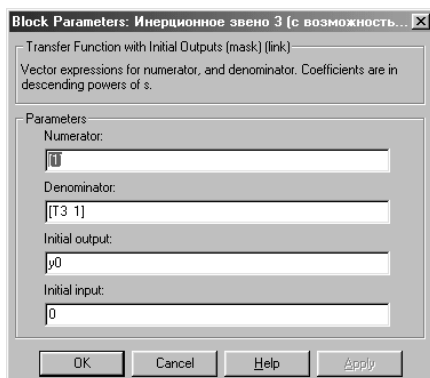


а)

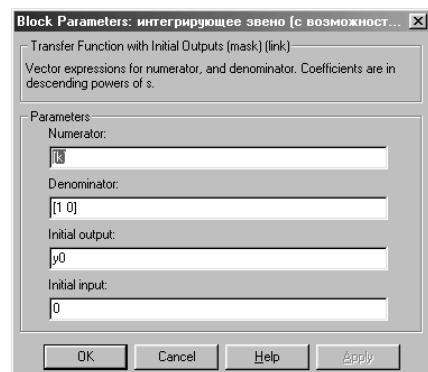


б)

Рисунок 9.10 –Параметры нелинейностей (файл GB_mod.mdl):
а – люфту; б – двухпозиционного реле с гистерезисом



а)



б)

Рисунок 9.11 – Параметры блоков линейной части (файл GB_mod.mdl):
а – инерционной ланки; б – интегрирующей ланки

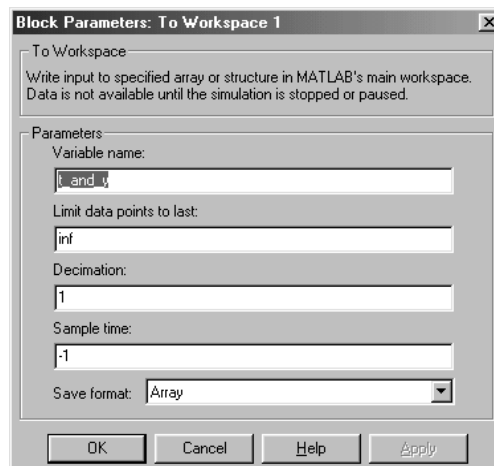
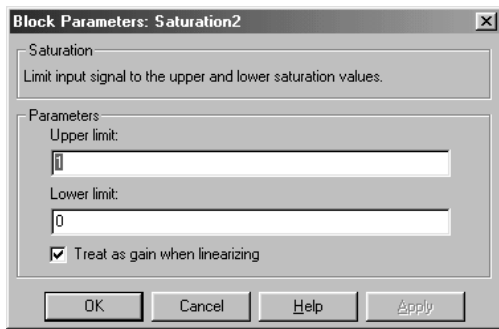
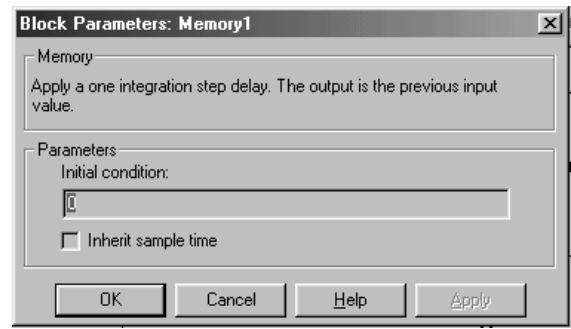


Рисунок 3.12 – Параметры блока To Workspace (файл GB_mod.mdl)



а)



б)

Рисунок 9.13 – Параметри блоків підсистеми визначення періоду і амплітуди автоколивань (файл GB_mod.mdl):

а – блоку обмеження сигналу Saturation2; б – блоку пам'яті Memory1

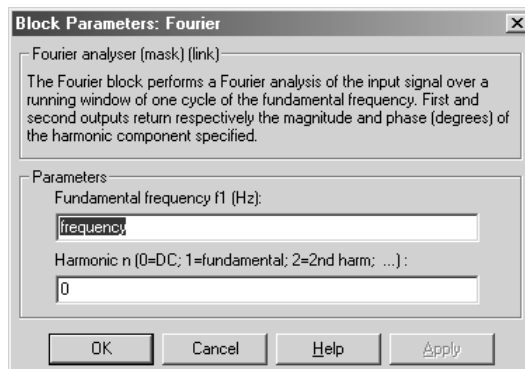


Рисунок 9.14 – Параметри блоку Fourier (файл R_Fourie.mdl)

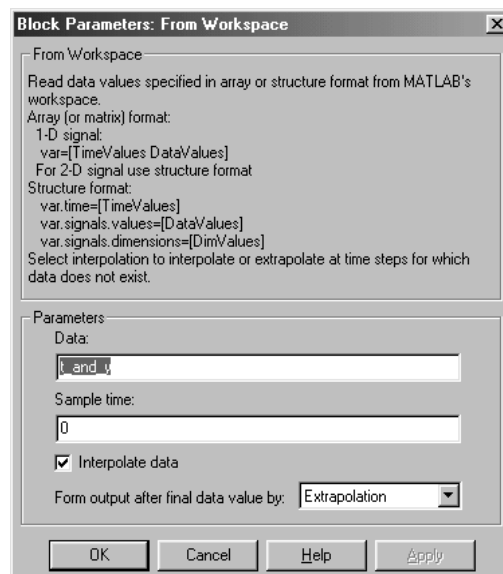


Рисунок 9.15 – Параметри блоку From Workspace (файл R_Fourie.mdl)

9.4 Порядок виконання роботи

9.4.1 Модернізуйте файл сценарію (m - файл) відповідно до свого варіантом: встановіть значення змінних конфігурації, тобто виберіть передаточну функцію лінійної частини і першу з двох нелінійностей варіанту; встановіть задані значення параметрів ЛЧ і нелінійності.

9.4.2 Запустіть m-файл на виконання. Зафіксуйте спільно відтворені командою `plot` частотну характеристику лінійної частини $W_{\text{л}}(-j\omega)$ і характеристику нелінійності $-1/W_{\text{н}}(jA)$. По точках їх перетину визначте $A_{\text{п}}$ і $\omega_{\text{п}}$, використовуючи LTI Viewer.

9.4.3 Оцініть стійкість знайдених періодичних режимів, задаючи різні початкові умови по виходу ЛЧ (для кожного періодичного режиму досить двох значень з околиці значення $A_{\text{п}}$ – $y(0) < A_{\text{п}}$ и $y(0) > A_{\text{п}}$). Слід провести кілька експериментів, запускаючи m - файл з різними значеннями початкових умов і фіксуючи процеси в часі $y(t)$.

9.4.4 Для стійкого періодичного режиму зафіксуйте значення амплітуди і частоти автоколивань, гистограму з їх гармонійним складом і співвідношення амплітуд першої і третьої гармонік, при цьому за допомогою осцилографа «гармоніки», що знаходиться в моделі `R_Fourie.mdl`, проконтролюйте досягнення амплітудами гармонік своїх сталих значень, переконайтеся в тому, що обраний час моделювання є достатнім для завершення перехідних процесів в системі; в іншому випадку збільште його і повторіть експеримент.

9.4.5 Знайдіть критичний коефіцієнт посилення ЛЧ: підберіть таке значення параметра k , при якому точка перетину характеристик нелінійності та ЛЧ починає зникати. Порівняйте з теоретично розрахованим значенням.

9.4.6 Виберіть другу з двох нелінійностей вашого варіанта, встановивши відповідне значення конфігураційної змінної `config_nlin` в m файлі, і повторіть процедуру дослідження.

9.4.7 Результати моделювання (суміщені характеристики нелінійності і лінійної частини, побудовані на комплексній площині, із зазначенням значень параметрів періодичних режимів, знайдених по точках перетину; процеси в часі $y(t)$ при різних варіантах початкових умов із зазначенням значень параметрів сталих періодичних режимів; гістограми гармонійного складу сталих періодичних режимів).

9.4.8 Аналіз результатів (знаходження відповідності між результатами попередньої підготовки, графічного розрахунку за методом гармонійного балансу і моделювання нелінійної системи щодо стійкості / нестійкості періодичних режимів, щодо значення амплітуди і частоти автоколивань, значення критичного коефіцієнта).

9.4.9 Висновки (зробити висновок про виконання / невиконання гіпотези фільтра, про погрішності визначення значень параметрів періодичних режимів за методом гармонійного балансу).

9.5 Контрольні питання

1. Метод гармонічного балансу: призначення, умови застосування.
2. Основне рівняння методу гармонічного балансу.
3. Суть методу гармонічної лінеаризації.
4. Гіпотези фільтра методу гармонічної лінеаризації.
5. Основні положення методу Д-розбиття.

6. Визначення комплексного передавального коефіцієнта нелінійної ланки.
7. Характеристичне рівняння замкнутої системи.
8. Як виконується штриховка при Д-розбитті?
9. Обмеження на реалізацію методу гармонічного балансу.
10. Яке призначення методу Д-розбиття?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юревич Е.И. Теория автоматического управления [Текст] / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления [Текст] / В.Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
3. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем [Текст] / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1986. – 309 с.
4. Классические методы автоматического управления [Текст] / под ред. А.А. Ланнэ. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 640 с.
5. Лукас, В.А. Теория автоматического управления [Текст] / В.А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
6. Никулин, А.Е. Основы теории автоматического управления [Текст] / А.Е. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 640 с.
7. Попович, М.Г. Теорія автоматичного керування [Текст] : підручник. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
8. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления [Текст] / под ред. В.А. Бессекерского. - М.: Наука, 1978. – 512с.
9. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования [Текст] / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 535 с.
10. Солодовников, В.В. Теория автоматического регулирования техническими системами [Текст] : учеб. пособие / В.В. Солодовников, А.В. Яковлев. – М.: Издат-во МГТУ, 1993. – 492 с.
11. Шаруда, В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління [Текст] : навч. Посібник / В.Г. Шаруда. – Дніпропетровськ: Національна гірнича академія України, 2002. – 414 с., іл. 133.