

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 53 / 1

**ЗАТВЕРДЖЕНО**  
науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»  
протокол від 16.12.2022р.  
№ 13

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
**для проведення лабораторних робіт**  
**з навчальної дисципліни**  
**«ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ**  
**УПРАВЛІННЯ»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності код спеціальності «Метрологія та інформаційно-вимірювальна  
техніка»  
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані та інформаційно-  
вимірювальні системи»  
факультет Комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки  
кафедра Метрології на інформаційно-вимірювальній техніки

Рекомендовано на засіданні  
кафедри метрології та  
інформаційно-вимірювальної техніки  
30 серпня 2022р., протокол № 8

Розробники: старший викладач кафедри метрології та інформаційно-  
вимірювальної техніки ЛУГОВИХ Оксана

Житомир  
2022

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 53 / 2</i>

Методичні рекомендації для проведення лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Основи моделювання автоматизованих систем управління» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи» / Розробник О.О. Лугових. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. – 53 с.

Розробники: О.О. Лугових

Рецензенти:

к.т.н., доцент кафедри РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна В.А. Кирилович.,

к.т.н., доцент кафедри РЕ та А ім. Проф. Б.Б. Самотокіна Ю.О.Шавурський

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 53 / 3

## ЗМІСТ

Лабораторна робота 1. Робота з даними «ДАТА», обчисленнями по формулам та графікам програми Microsoft Excel.....	4
Лабораторна робота 2. Обчисленнями по формулам та побудова графіків в програмі Matab.....	8
Лабораторна робота 3. Введення в програму matlab математичних моделей систем управління та дослідження їх характеристики в Simulink.....	13
Лабораторна робота 4. Введення в програму matlab математичних моделей систем управління та дослідження їх характеристик за допомогою М-файлу .....	24
Лабораторна робота 5. Дослідження стійкості систем управління за допомогою частотних та часових характеристик.....	27
Лабораторна робота 6. Дослідження стійкості систем управління за допомогою математичних критеріїв стійкості.....	32
Лабораторна робота 7. Проектування регулятора для системи управління часовими методами.....	37
Лабораторна робота 8. Проектування регулятора для системи управління частотними методами.....	42

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 4

**Лабораторна робота 1**  
**Робота з даними «ДАТА»,**  
**обчисленнями по формулам та графікам**  
**програми Microsoft Excel**

**Метароботи:**

- вивчення принципів роботи електронних таблиць **Microsoft Excel** з даними формату **ДАТА** і функціями, які задають і змінюють дати, вводяться в комірки **Книги Microsoft Excel**;
- освоєння методики введення дат, їх копіювання і перенесення;
- вивчити особливості копіювання послідовностей, сформованих при використанні засобів автоматизації;
- освоєння способів виконання математичних обчислень за формулами;
- освоєння засобів побудови графіків (діаграм).

**Хід роботи:**

1. Вивчити довідку (**F1**) за форматами **Дата** і функціями, використовуваними в п. 2 ... 5.
  2. Використовуючи будь-який стандартний формат **Дата** (формат без \*), ввести в комірку **A1** перше число дати місяця року, найменування якого наведено в табл. 3.1. Номер варіанта і рік вказує викладач.
  3. Використовуючи функцію **ДЕНЬНЕД** і функцію автозаповнення ввести в стовпець **B** нумерацію днів тижня у форматі 2.
  4. Використовуючи функцію **ТЕКСТ** і функцію автозаповнення ввести в стовпець **C** нумерацію днів тижня у форматі «**дддд**».
  5. Введіть у пам'ять не менше 8 рядків розшифрованих дат і створіть три їхні копії в послідовно розташованих стовпцях **D, L**. Поміняйте параметри уявлення формату **Дата** і функцій **ДЕНЬНЕД** і функцію **ТЕКСТ**. Причому у форматі **Дата** обов'язково має бути використаний тип, який в розшифровці представлений як «\*14 марта2001 г.». Усуньте можливі неточності.
  6. У масиві **E2:K8** скласти місячний календар з розбивкою по тижнях і зазначенням днів. Календар повинен бути зручний для сприйняття.
  7. Вивчіть довідку (**F1**) за формулами і функціям, використовуваними в п. 8 – 11.
  8. Перейти на **Лист 2** і в комірки **A1:A3** введіть позначення  $\Delta$ ,  $X_0$ ,  $v$ . Вирівняйте їх по правому краю.
  9. Введіть в комірки **B1:B3** значення перерахованих вище констант, взяті з табл. 3.1. Вирівняйте їх по лівому краю.
- У комірках діапазону **C4:C14** сформууйте арифметичну прогресію – послідовність чисел, що відрізняються один від одного на постійну величину. Стосовно до введенням позначенням вираз для визначення значень членів арифметичної прогресії задаються виразом:

$$X_{i+1} = X_i + \Delta, \quad (1.1)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 5

де  $X_i$  і  $X_{i+1}$  – попередній і наступний члени арифметичної прогресії.

В якості початкового члена арифметичної прогресії використовуйте число  $X_0$ , значення якого введіть (з клавіатури) в комірку **C4**. В комірку **C5** помістіть другий член прогресії, розрахувавши його величину по *формуле* (2.1). Аргументами формули (в **строке формул**) повинні бути адреси комірок, в яких наведені значення  $X_0$  (комірка **C4**) і  $\Delta$  (комірка **B1**).

10. Використовуючи **маркер розпространения** забезпечте заповнення решти комірок діапазону **C6:C14**. Якщо отримана послідовність не відповідає арифметичній прогресії, проаналізуйте і усуньте причини. Проведенню аналізу сприяє використання інструменту **Влияющие ячейки** групи **Зависимости формул** вкладки **Формулы**. Переконайтеся в неможливості продовжити процес у бік убуваючих її членів.

11. Переконайтеся, що переміщення, як всієї послідовності, так і її частини не призводить до зміни чисел, що утворюють зрушену послідовність.

12. Скопіюйте в будь-який сусідній діапазон комірок послідовність цілком, а також *только часть* послідовності (без першого члена). При розбіжності копії з вихідною частиною проаналізуйте причину і усуньте її, не збільшуючи число скопійованих осередків (див. вказівку до п. 9).

13. У дві вільні сусідні осередки будь-якого стовпця введіть (за допомогою клавіатури) два числа, що відповідають значенням будь-яких двох послідовних членів щойно розглянутої арифметичної прогресії. Використовуючи **маркер розпространения** заповніть наступні клітинки. Переконайтеся, що послідовність, що збігається з арифметичною прогресією, формується при виділенні не менше двох суміжних клітинок. Переконайтеся, що використовуючи **маркер розпространения** можна продовжити послідовність і в бік убуваючих членів послідовності.

14. У будь-якому діапазоні вільних комірок сформулюйте геометричну прогресію - послідовність чисел, що відрізняються один від одного на постійний коефіцієнт. Члени прогресії визначте на основі формули. Стосовно до введених позначень вираз для визначення значень членів арифметичної прогресії задається виразом:

$$G_{i+1} = a * G_i, \quad (1.2)$$

де  $G_i$  і  $G_{i+1}$  – попередній і наступний члени геометричній прогресії.

В якості початкового члена арифметичної прогресії використовуйте число  $X_0$ , яке введіть у першу комірку прогресії. У наступну комірку введіть другий член прогресії, розрахувавши його величину за формулою (1.2), яку сформулюйте в **строке формул**. Аргументами формули повинні стати адреси використовуваних комірок. Використовуючи функцію **ОКРУГ**, округлите результат з розрядністю 2.

Використовуючи **маркер розпространения**, забезпечте заповнення решти комірок

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117/6

діапазону. Якщо отримана послідовність не відповідає арифметичній прогресії, проаналізуйте і усуньте причини (див. вказівку до п. 9).

15. Виконайте з членами геометричної прогресії операції копіювання і перенесення, передбачені для арифметичної прогресії в п. 9 – 11. Переконайтеся, що шляхом введення, за допомогою клавіатури, кількох членів геометричної прогресії і подальшого використання маркера поширення, неможливо створити співпадаючу послідовність (див. п. 9).

16. Перейдіть на **Лист 3**. Введіть в комірки **A1: A3** вираз  $K=$  ,  $p=$  ,  $M=$ . Вирівняйте їх по правому краю. Введіть (з вирівнюванням по лівому краю) в комірки **B1: B3** значення перерахованих вище констант, взявши їх з табл. 2.1.

В комірку **B4** внести початкове значення діапазону зміни  $x$ . Забезпечити введення в комірки рядка **4** значення  $x$  з кроком 0,1. Провести обчислення за формулою:

$$Y = K \cdot x^P \pm M \sin(2\pi \cdot x), \quad (1.3)$$

вводячи отримані величини в рядок **5** при позитивних значеннях  $M$ , і в рядок **6** – при негативних. Розрахунок провести з округленням результатів до 2-х знаків після коми.

Перенести введені дані рядків **4** і **6** в рядки **5** і **7**. У звільнений рядок **4** ввести заголовок: «*Расчет по формулам*».

17. Побудувати графіки результатів розрахунку за формулами.

18. На **Лист 2** побудувати графіки отриманих арифметичної та геометричної прогресій.

### Звіт

У звіті повинні бути представлені:

- Мета роботи.
- Рядки з розшифровками календарних днів заданого місяця при виконанні п. 5 та потижневий календар.
- Зображення рядка формул при використанні функцій **ДАТА, ДЕНЬ НЕД, ТЕКСТ**.
- Зображення таблиці арифметичної і геометричної прогресій та їх копій (п. 9, 10, 14, 15).
- Зображення зв'язків з комірками, які використовуються при визначенні значень величини членів прогресій у копіях.
- Зображення рядка формул при формуванні копій прогресій.
- Таблиця розрахунку по формулі (3.3).
- Графіки прогресій та функції (3.3).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117/7

Таблиця 3.1

№ варіанта		1	2	3	4	5	6	7	8
Константи	$\Delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	$a$	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
	$X_0$	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення коефіцієнтів	$K$	3	3	1	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$P$	0,75	1,5	2	1,1	1	1	0,5	-0,5
	$M$	3	2	1,5	3	2	3	2	2
Місяць		січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень

№ варіанта		9	10	11	12	13	14	15	16
Константи	$\Delta$	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
	$a$	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
	$X_0$	9	10	11	12	13	14	15	16
Значення коефіцієнтів		1	2	0,5	3	2	2	0,5	1
	$P$	0,5	2	-1	0,75	1,3	0,75	0,5	0,5
	$M$	2	1	2	3	2,5	3	1,5	2
Месяц		вересень	жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень

№ варіанта		17	18	19	20	21	22	23	24
Константи	$\Delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	$a$	1,7	1,9	1,5	1,8	1,2	1,4	1,3	1,6
	$X_0$	9	10	11	12	13	14	15	16
Значення коефіцієнтів		1	0,5	2	3	2	2	0,5	1
	$P$	0,5	-1	2	0,75	1,3	0,75	0,5	0,5
	$M$	2	2	1	3	2,5	3	1,5	2
Месяц		лютий	березень	квітень	травень	червень	квітень	лютий	березень

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 8

## Лабораторна робота 2

# ОБЧИСЛЕННЯМИ ПО ФОРМУЛАМ ТА ПОБУДОВА ГРАФІКІВ В ПРОГРАМІ МАТАВ

Мета роботи: введення та прорахунок формул, побудова графіків функцій

### 1 Теоретичні відомості

#### 1.1. Введення математичних функцій

##### Тригонометричні, гіперболічні та обернені до них функції

**sin** – синус;

**cos** – косинус;

**tan** – тангенс;

**cot** – котангенс;

**sec** ( $\sec(x) = \frac{1}{\cos(x)}$ ) – секанс;

**csc** ( $\csc(x) = \frac{1}{\sin(x)}$ ) – cosecant;

**asin** – арксинус;

**acos** – арккосинус;

**atan** – арктангенс;

**acot** – арккотангенс;

**asec** – арксеканс;

**acsc** – аркcosecant.

При введенні значень (аргументів) функцій в наведені формули відбуваються в радіанах. Зворотні тригонометричні функції повертають результат також в радіанах. Якщо значення аргументів необхідно ввести в градусах, необхідно використовувати наступні функції:

**sind** – синус;

**cosd** – косинус;

**tand** – тангенс;

**cotd** – котангенс;

Гіперболічні функції і зворотні до них:

**sinh** – гіперболічний синус;

**cosh** – гіперболічний косинус;

**tanh** – гіперболічний тангенс;

**coth** – гіперболічний котангенс;

**sech** ( $\sec(x) = \frac{1}{\cos(x)}$ ) – гіперболічний секанс;

**csch** ( $\csc(x) = \frac{1}{\sin(x)}$ ) – гіперболічний cosecant;

**asinh** – гіперболічний арксинус;

**acosh** – гіперболічний арккосинус;

**atanh** – гіперболічний арктангенс;

**acoth** – гіперболічний арккотангенс;

**asech** – гіперболічний арксеканс;



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 9

**acsch** –гіперболічний арккосеканс.

**Експоненціальна функція, логарифми, степеневі функції**

**exp**– експоненціальна функція;

**log** – натуральний логарифм;

**log10** – десятковий логарифм;

**log2**– логарифм за основою 2;

**pow2** – піднесення числа 2 в степінь;

**sqrt** – квадратний корінь;

**nextpow2**–степінь в яку потрібно ввести число 2, щоб отримати найближче число (більше або рівне аргументу), наприклад:

### 1.2. Побудова графіків функцій

Побудова графіків відбувається за допомогою функції **plot(<Масив>)** для побудови графіку значень з масиву **X** від номеру відліку.

В загальному випадку дана функція має вигляд:

**plot(x,y,s),**

де **x,y** – одновимірні масиви однакової розмірності; **x** – масив значень аргументу функції  $y=f(x)$ ; **y** – масив значень функції  $y=f(x)$ ; **s**– строкова константа, що визначає колір лінії, маркер вузлових точок та тип ліній . Ця константа може вміщувати від одного до трьох символів.

Колір лінії визначається символами **y** (жовтий), **m** (фіолетовий), **c** (голубий), **r** (червоний), **g** (зелений), **b** (синій), **w** (білий), **k** (чорний).

Тип вузлової точки визначається символами **.** (точка), **o** (коло), **x** (хрестик), **+** (плюс), **\*** (зірочка), **s** (квадрат), **d** (ромб), **<> ^** (трикутники різної направленості), **p** (п'ятикутник), **h** (шестикутник).

Тип лінії визначаються символами **-** (неперервна), **:** (короткі штрихи), **-.** (штрихпунктир), **--** (довгі штрихи).

Символьною константу **s** можна не вказувати. В цьому випадку по замовчуванню використовується неперервна лінія жовтого кольору. Для побудови в одному вікні декількох графіків можна використати команду

```
plot(x1,y1,s1,x2,y2,s2,x3,y3,s3,...)
```

Приклад

```
% графіки функцій sin x, cos x
```

```
x=0:0.1:2*pi;
```

```
y1=sin(x);
```

```
y2=cos(x);
```

```
plot(x,y1,'k-o',x,y2,'r--*')
```

В результаті виконання цієї програми на екран монітору виводиться графічне вікно з графіком, що представлений на рис. 5.1.

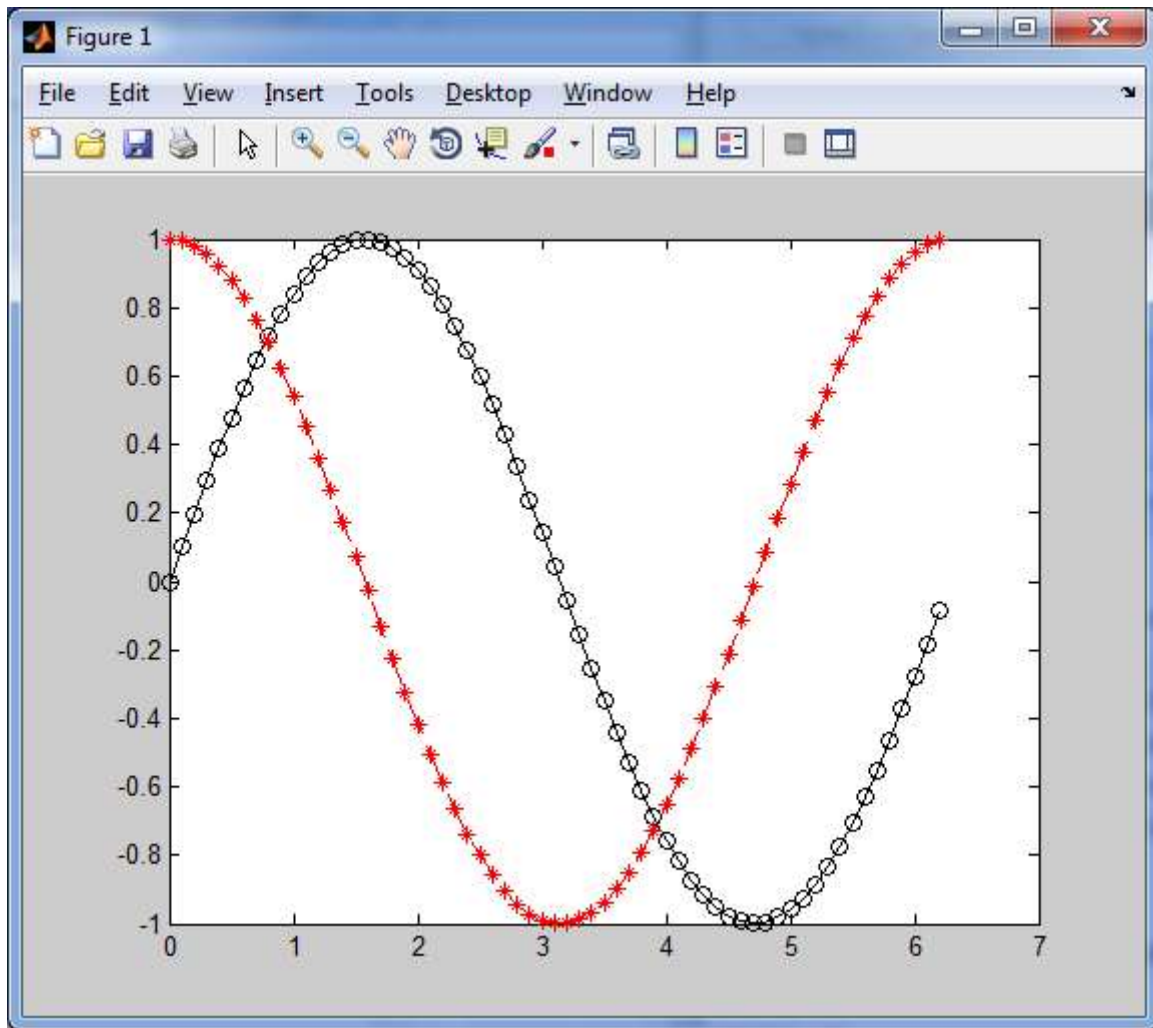


Рис.5.1. Графіки, виконані за допомогою програми plot

Створений графік можна скопіювати в буфер Clipboard, активований в пункті Edit головного меню вікна графіку команду CopyFigure, з метою його подальшого редагування в якомусь графічному редакторі.

Для побудови графіків в логарифмічному та напівлогарифмічних масштабах використовують наступні функції:

- loglog(логарифмічний масштаб по двом осям);
- semilogx(логарифмічний масштаб тільки по осі абсцис);
- semilogy(логарифмічний масштаб тільки по осі ординат).

Сітка на графік наноситься командою gridon, підписи до осей розміщуються за допомогою xlabel, ylabel, заголовок задається командою title. Наявність декількох графіків на одних осях вимагає розміщення легенди командою legend з інформацією про лінії.

Простим та ефективним способом зміни кольорового оформлення графіків є встановлення кольорової палітри за допомогою функції colormap. Для відновлення початкового значення палітри слід використати команду colormap('default'). Цітові палітри представлені в таблиці 5.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 11

Таблиця 5.1

Палітра	Зміна кольору
autumn	плавна зміна червоний-оранжевий-жовтий
bone	схожа на палітру gray, але з легким відтінком синього
colorcube	Кожен колір змінюється від темного до яркого
cool	відтінки блакитного та пурпурового кольорів
copper	відтінки мідного кольору
flag	циклічна зміна червоний-білий-синій-чорний
gray	відтінки сірого
hot	плавна зміна чорний-червоний-оранжевий-жовтий-білий
hsv	плавна зміна кольорів веселки
Jet	плавна зміна синій – блакитний – червоний – зелений жовтий - червоний
Pink	схожа на палітру gray, але з легким відтінком коричневого кольору
Prism	циклічна зміна червоний – оранжевий – жовтий – зелений – синій – фіолетовий
spring	відтінки пурпурового та жовтого
summer	відтінки зеленого та жовтого
Vga	палітра Windows із шістнадцяти кольорів
White	один білий колір
winter	відтінок синього та зеленого

## 2 Завдання для лабораторної роботи

2.1 Згідно свого варіанту обрати табл..5.2 обчислити функцію.

Таблиця 5.2

№варіанту	Завдання
1	$\frac{\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cos \beta}$
2	$\frac{\sin \alpha \cos 4\alpha + \sin 4\alpha \cos \alpha}{\cos 2\alpha \cos 3\alpha - \sin 2\alpha \sin 3\alpha}$
3	$\frac{1 - \cos 2\alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha$
4	$\frac{\sin \alpha \cos(\pi + \alpha) \cdot \cos(\pi - 2\alpha)}{\cos 4\alpha}$
5	$\frac{\sin 4\alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos 4\alpha}{\cos 7\alpha \cos 4\alpha + \sin 7\alpha \sin 4\alpha}$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 12

6	$(4\sin x - 3)(2\sin 2x + 1)$
7	$\operatorname{tg}\left(x + \frac{\pi}{3}\right)$
8	$\sin^2 x - 3\sin x + 2$
9	$\cos^2 x - \cos x$
10	$\frac{\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \sin \beta}$
11	$\frac{\sin \alpha \cos 2\alpha + \sin 2\alpha \cos \alpha}{\cos 2\alpha \cos 3\alpha - \sin 2\alpha \sin 3\alpha}$
12	$(2\sin x - 2)(2\sin 2x + 1)$
13	$\frac{1 - \sin 2\alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha$
14	$\cos^2 x - 3\sin x + 2$
15	$\cos^2 x - \cos x - 1$
16	$\frac{\sin 3\alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos 3\alpha}{\cos 7\alpha \cos 3\alpha + \sin 7\alpha \sin 3\alpha}$
17	$(4\sin x - 2)(2\sin 2x + 3)$
18	$\operatorname{arctg}\left(x + \frac{\pi}{3}\right)$
19	$\frac{1 - \cos 2\alpha}{\sin \alpha} + \cos \alpha$
20	$\frac{1 - \cos 2\alpha}{\sin \alpha} + \cos \alpha$

2.2. Прорухувати вираз, діапазон та крок задати добровільно.

2.3. Побудувати графік функцій виразу табл. 5.2. , діапазон та крок задати добровільно

2.4. Зробити висновки про введення формул та відображення графіків.

### 3 Зміст звіту

3.1 Назва та мета роботи.

3.2 Скріншот вводу функції та її результат

3.3 Графік функції.

3.4 Висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 13

## Лабораторна робота 3

# ВВЕДЕННЯ В ПРОГРАМУ MATLAB МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИ В SIMULINK

Мета роботи: ознайомитися з робочим простором програми Matlab, дослідити методи введення математичних моделей систем управління та отримання їх характеристик в Simulink.

### 1 Теоретичні відомості

#### 1.1 Математичний опис елементів лінійних систем автоматичного керування

**Система автоматичного управління (САУ)** – сукупність об’єкта управління (ОУ) та управляючого об’єкту (УО).

Реальні системи при теоретичних дослідженнях подають у вигляді моделей, які мають деякий формальний опис, найчастіше математичний.

Математична модель системи – це опис процесів, що проходять в системі, мовою математики.

Для створення моделі САУ необхідно попередньо перевести математичні рівняння, що описують систему, в форму простору стану або знайти передаточні функції системи.

Зв'язок між вхідними і вихідними сигналами лінійної ланки з зосередженими параметрами може бути виражений у вигляді диференційного рівняння:

$$\begin{aligned}
 a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) &= \quad (3.1) \\
 = b_n \frac{d^n x}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + b_{n-2} \frac{d^{n-2} x}{dt^{n-2}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x(t)
 \end{aligned}$$

В даному випадку  $x(t)$  – вхідний сигнал,  $y(t)$  – вихідний сигнал,  $a_i$  та  $b_i$  – сталі коефіцієнти. Таким чином, ланка описується наборами коефіцієнтів  $\{a_i\}$  та  $\{b_i\}$ .

Повинна виконуватися нерівність  $m \leq n$ , тобто максимальний порядок похідної вхідного сигналу не може перевищувати максимального порядку похідної вихідного сигналу. Це пов'язано з неможливістю фізичної реалізації операції “чистого” диференціювання аналогової ланки. Значення  $n$  називається *порядком* ланки.

Перетворенням Лапласа називають відношення

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt, \quad (3.2)$$

яке ставить функції  $x(t)$  дійсної змінної  $t$  у відповідність функцію  $X(s)$  комплексної змінної  $s = \sigma + j\omega$ .

При цьому  $x(t)$  називається оригіналом, а  $X(s)$  – зображенням за Лапласом. Зв'язок між  $X(s)$  та  $x(t)$  формально може бути записаний у вигляді:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 14

$$X(s) = L[x(t)], \quad (3.3)$$

де  $L$  – оператор перетворення Лапласа.

Якщо операцію диференціювання замінити на оператор Лапласа  $s = \frac{d}{dt}$ , то рівняння

(1.1) зводиться до виразу передаточної функції ланки в операторній формі.:

$$H(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.4)$$

В формулі (1.4)  $a_i$  та  $b_i$  – такі самі сталі коефіцієнти, як у наведеному вище диференційному рівнянні (3.1).

Отже, передаточною функцією ланки (системи) називають відношення зображення за Лапласом вихідної змінної до зображення за Лапласом вхідної змінної при нульових початкових умовах.

Поняття стійкості системи пов'язане з її здатністю повертатися (з певною точністю) в стан рівноваги після зникнення зовнішніх сил, які вивели її з цього стану. Якщо системи нестійка, то вона не повертається у стан рівноваги, з якого її вивели, вона або віддаляється від нього, або робить навколо нього недопустимі великі коливання.

Для аналізу одновимірних лінійних САУ користуються трьома видами передаточних функцій: за сигналом управління  $W_y(p)$ , за похибкою  $W_\varepsilon(p)$ , за збуренням  $W_f(p)$ . Розглянемо порядок визначення передаточних функцій, користуючись структурною схемою, що наведена на рис.3.1.

Передаточну функцію за сигналом управління  $W_y(p)$  визначають відносно вихідного  $x$  та вхідного  $y$  сигналів (вихід  $\varepsilon$  не розглядають, також вважають  $f=0$ ):

$$W_y(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{W_1(p)W_3(p)}{1 + W_1(p)W_3(p)W_4(p)}. \quad (3.5)$$

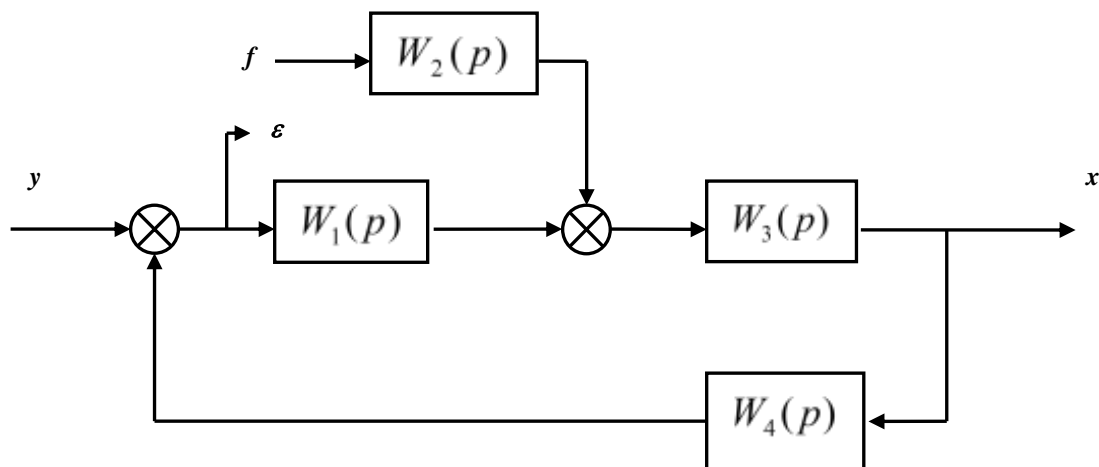


Рис.3.1 – Структурна схема САУ,  $y$  – вхідний (керуючий сигнал),  $\varepsilon$  – похибка,  $f$  – збурення,  $x$  – вихідний сигнал.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117/15

Передаточну функцію за похибкою  $W_\varepsilon(p)$  визначають відносно похибки  $\varepsilon$  та входу  $u$  (вихід не розглядають, також вважають  $f=0$ ):

$$W_\varepsilon(p) = \frac{\varepsilon(p)}{Y(p)} = \frac{1}{1 + W_1(p)W_3(p)W_4(p)}. \quad (3.6)$$

Передаточну функцію за збуренням  $W_f(p)$  визначають відносно вихідного сигналу  $x$  та збурення  $f$  (вихід  $\varepsilon$  не розглядають, також вважають  $u=0$ ):

$$W_f(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = W_2(p) \frac{W_3(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)W_1(p)}. \quad (3.7)$$

### 1.3 Частотні характеристики лінійних САУ

Частотні характеристики лінійних систем (ланок) визначають залежність їх параметрів від частоти. Найчастіше нас буде цікавити:

1. Амплітудна частотна характеристика (**АЧХ**) – залежність відношення амплітуд вихідного та вхідного сигналів від частоти. АЧХ показує, як елемент пропускає сигнали різної частоти (приклад АЧХ наведено на рис.3.2,а);

2. Фазова частотна характеристика (**ФЧХ**) – залежність зсуву фаз між гармонічними вхідними та вихідними системи (ланки). ФЧХ показує, яке запізнення або випередження вихідного сигналу по фазі створює ланка при різних частотах (приклад ФЧХ наведено на рис.1.2,б).

3. Амплітудну і фазову характеристики можна об'єднати в одну загальну - амплітудно-фазову частотну характеристику (**АФЧХ**). АФЧХ являє собою функцію комплексного змінного  $j\omega$ :

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (\text{показникова форма}),$$

де  $A(\omega)$  – модуль функції;  $\varphi(\omega)$  – аргумент функції.

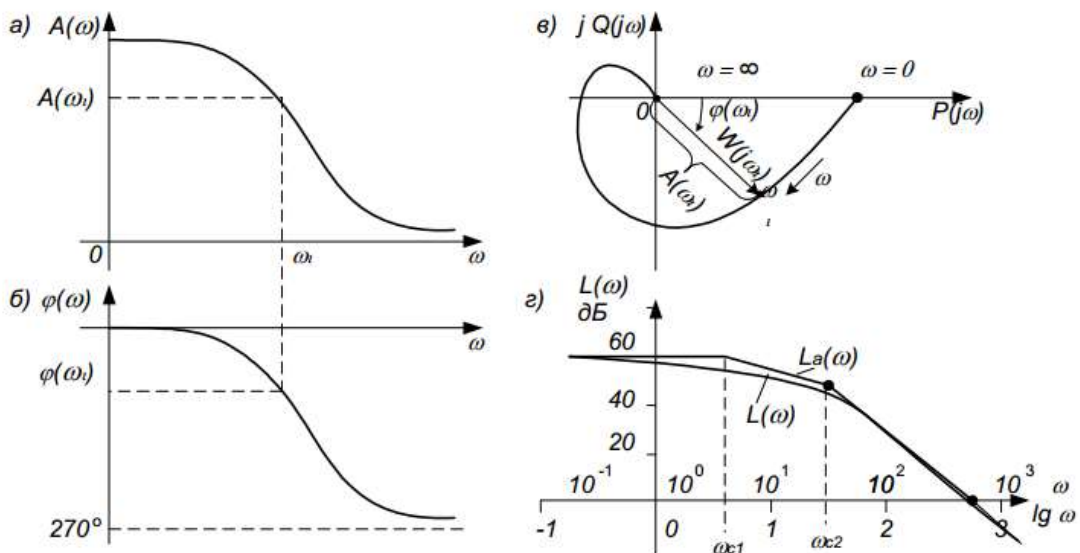


Рис.3.2 Частотні характеристики:

а – амплітудна; б – фазова; в – амплітудно-фазова; г – логарифмічна

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 16

Кожному фіксованому значенню частоти  $\omega_i$  відповідає комплексне число  $W(j\omega_i)$ , яке на комплексній площині можна зобразити вектором, що має довжину  $A(\omega_i)$  і кут повороту  $\varphi(\omega_i)$  (рис. 3.2, в). Від’ємні значення  $\varphi(\omega)$ , що відповідають відставанню вихідного сигналу від вхідного, прийнято відраховувати за годинниковою стрілкою від позитивного напрямку дійсної осі.

При зміні частоти від нуля до нескінченності вектор  $W(j\omega)$  повертається навколо початку координат, при цьому одночасно змінюється довжина вектора. Крива, яку при цьому опише кінець вектора, і є АФЧХ. Кожній точці характеристики відповідає певне значення частоти.

Для аналітичного визначення всіх частотних функцій системи достатньо знайти передаточну функцію на основі перетворення Лапласа  $W(p)$ . У переважній більшості практичних випадків перехід від  $W(p)$  до передатної функції на основі перетворення Фур’є  $W(j\omega)$ , тобто в частотну область, виконується заміною  $s$  на  $j\omega$ .

$$W(s)|_{s=j\omega} \rightarrow W(j\omega),$$

де:  $W(j\omega)$  – амплітудно-фазова частотна характеристики (АФЧХ):

$P(\omega) = \text{Re}[W(j\omega)]$  – дійсна частотна характеристика;

$Q(\omega) = \text{Im}[W(j\omega)]$  – уявна частотна характеристика;

$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$  - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ);

$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \pm k\pi$  - фазочастотна характеристика (ФЧХ),  $k=0,1,2,\dots$ .

На практиці часто використовують логарифмічні частотні характеристики (ЛАХ) – логарифмічну амплітудно-частотну характеристику (ЛАЧХ) та логарифмічну фазочастотну характеристику (ЛФЧХ). Особливість цих характеристик полягає в тому, що по осі абсцис відкладається частота у логарифмічному масштабі, тобто величина  $\Omega = \lg \omega$ . ЛАЧХ (рис.3.2, г) будують в координатах  $\Omega$ ;  $[L(\omega) = 20 \lg A(\omega)]$ , а ЛФЧХ – в координатах  $\Omega$ ;  $\varphi(\omega)$ .

#### 1.4 Часові характеристики лінійних САУ

При проектуванні систем автоматичного управління, крім забезпечення стійкості, доводиться вирішувати проблеми забезпечення потрібних показників якості перехідного процесу (швидкодії, коливальності, перерегулювання, плавності та інших) і точності в усталеному стані.

Розрізняють дві групи показників якості: перша група – показники якості перехідного процесу; друга – показники, що характеризують вимушену (усталену) складову, з якої визначають точність системи.

Показники якості, що визначають безпосередньо за кривою перехідного процесу, називають прямими оцінками якості. У випадках, коли побудова кривої перехідного процесу пов’язана з великими труднощами, використовують непрямі оцінки якості. До непрямих



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 17

оцінок можна віднести запас стійкості системи по фазі та амплітуді.

Оцінку якості перехідного процесу в системі та її швидкодії можна провести за кривою перехідного процесу при наступних типових вхідних діях: одинична ступінчаста функція  $1(t)$ , одинична імпульсна функція  $\delta(t)$ .

До часових характеристик відносять перехідну  $h(t)$  і вагову (імпульсну) характеристику  $w(t)$ .

Перехідною функцією системи називають функцію  $h(t)$ , що описує зміну вихідної координати системи, коли на її вхід при нульових початкових умовах подається одинична ступінчаста дія.

Графік перехідної функції  $h(t)$  від часу  $t$  називають перехідною характеристикою.

Імпульсною перехідною або ваговою функцією системи називають функцію, що описує реакцію системи на одиничну імпульсну дію при нульових початкових умовах; позначають цю функцію  $w(t)$ . Графік імпульсної перехідної функції називають імпульсною перехідною характеристикою.

#### **Зв'язок між часовими характеристиками:**

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \quad h(t) = \int_0^t w(t) dt.$$

Існує кілька методів аналітичного і графо-аналітичного визначення часових характеристик. Найбільш поширені – метод безпосереднього розв'язування диференціального рівняння та метод зворотного перетворення Лапласа – легко реалізуються на ЕОМ. Якщо в диференційне рівняння підставити в якості вхідного сигналу одиничну ступінчасту функцію  $u(t)=1(t)$  і знайти його розв'язок за нульових початкових умов, то одержимо перехідну функцію, тобто  $h(t)=x(t)$ . Аналогічно, при підстановці  $u(t)=\delta(t)$  ( $\delta(t)$  – дельта-функція) одержимо  $w(t)$ . Якщо задана передаточна функція ланки  $W(p)$ , то часові характеристики найпростіше визначити методом зворотного перетворення Лапласа:

$$\begin{aligned} [h(t)] &= L^{-1} \left[ \frac{1}{s} W(p) \right], \\ w(t) &= L^{-1} [W(p)]. \end{aligned}$$

Вагова та перехідна функції, як і передаточна функція, є вичерпними характеристиками системи при нульових початкових умовах.

#### *1.5 Показники якості роботи лінійних САУ*

Якість роботи лінійних САУ оцінюють за допомогою кількох видів показників. Використовують прямі, частотні, кореневі, інтегральні показники якості. Прямі показники якості прийнято визначати за графіком перехідного процесу; такий спосіб є простим, наглядним і має достатню точність. На рис.3.3 представлений типовий коливальний

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 18

перехідний процес і виконано додаткові побудови для визначення прямих показників якості.

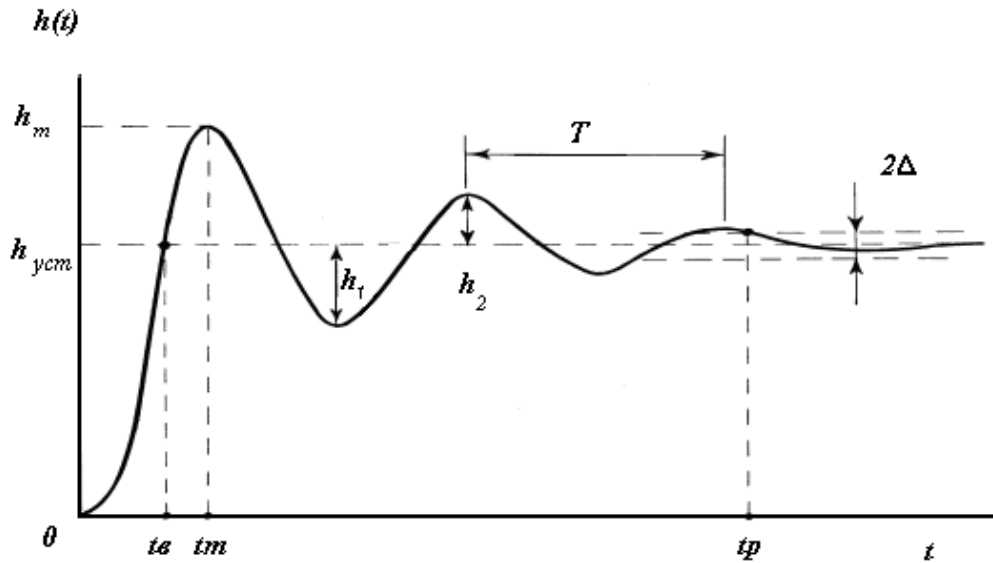


Рис.3.3. Визначення прямих показників якості лінійних САУ

1. Час регулювання (тривалість перехідного процесу)  $t_p$  визначається як час від початку процесу до моменту, після якого функція  $h(t)$  вже не буде відхилятися від усталеного значення  $h_{уст}$  на величину, більшу ніж задана похибка  $\Delta$ . Якщо  $\Delta$  не задана, то її приймають  $\Delta = 0,05h_{уст}$ .

2. Перерегулювання  $\sigma$  характеризує максимальне відхилення  $h(t)$  від усталеного режиму, що визначається у відсотках:

$$\sigma = \frac{h_m - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% \quad (3.8)$$

3. Час виходу на режим  $t_s$  – час від початку перехідного процесу до першого досягнення ним значення  $h_{уст}$ .

4. Час досягнення першого максимуму  $t_m$ .

5.Період коливань  $T_k$  та відповідно, частота коливань  $w_k = 2\pi / T_k$

6. Кількість коливань  $N$  за час регулювання.

7.Декремент згасання  $\chi$  характеризує інтенсивність зменшення амплітуди коливань:

$$\chi = \frac{h_1}{h_2} \quad (3.9)$$

Іноді також визначають логарифмічну міру згасання  $d = \ln \chi$ .

Для перехідних процесів, які не мають усталеного значення ( $h(\infty) \rightarrow \infty$ ), як правило, прямі показники якості не визначають. Якщо  $h(0)=0$  і  $h(\infty) \rightarrow 0$ , то  $\Delta$  не визначають, а похибку приймають  $\Delta = 0,05h_{max}$ .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 19

### 1.6. Створення математичної моделі САУ в пакеті Simulink

Інструментальний пакет Simulink входить до складу Matlab та має графічний інтерфейс користувача, за допомогою якого виконується введення структурних схем пристроїв і систем управління. Simulink включає набір бібліотек блоків, необхідних для створення моделей пристроїв і систем управління. Моделі можуть бути ієрархічними, тобто включати підсистеми у вигляді одного блоку.

Розглянемо застосування основних команд і можливостей Simulink, що використовуються при створенні структурної схеми і проведенні моделювання. Даний приклад ілюструє моделювання системи з певною передаточною функцією та відображення перехідної характеристики замкненої системи (рис. 3.4).

Спочатку треба запустити програму Matlab. Для запуску Simulink необхідно ввести в командному рядку Matlab команду “Simulink” або знайти на панелі інструментів відповідний значок та запустити його. На екрані з'явиться вікно бібліотек блоків (рис. 1.4) і вікно для введення структурної схеми (рис. 1.5).

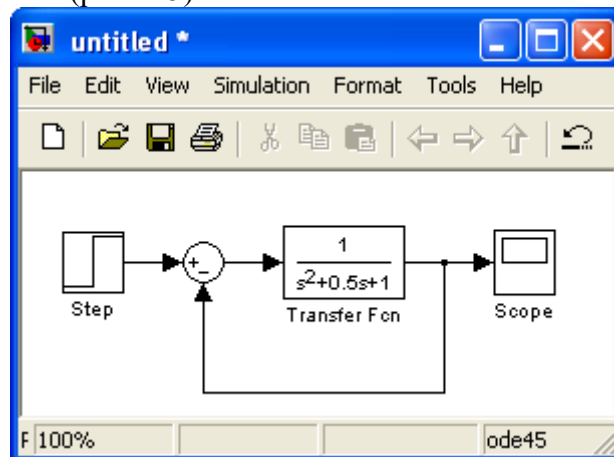


Рис. 3.4

Для схеми, що досліджується, необхідно використовувати такі бібліотеки блоків:

- бібліотека джерел сигналів (Sources) - блок ступінчастого сигналу Step;
- бібліотека пристроїв відображення сигналів (Sinks) - блок осцилографа (Scope);
- бібліотека лінійних блоків (Continuous) - блок передаточної функції (Transfer Fcn);
- бібліотека блоків математичні операції (Math Operations) - блок суматора (Sum).

Розкрийте вікно бібліотеки джерел сигналів Sources для доступу до блоку ступінчастого сигналу Step. Це виконується подвійним натисненням лівої кнопки миші, коли її курсор знаходиться на піктограмі блоку. Simulink відобразить вікно, що містить усі блоки даної бібліотеки (рис. 3.7).

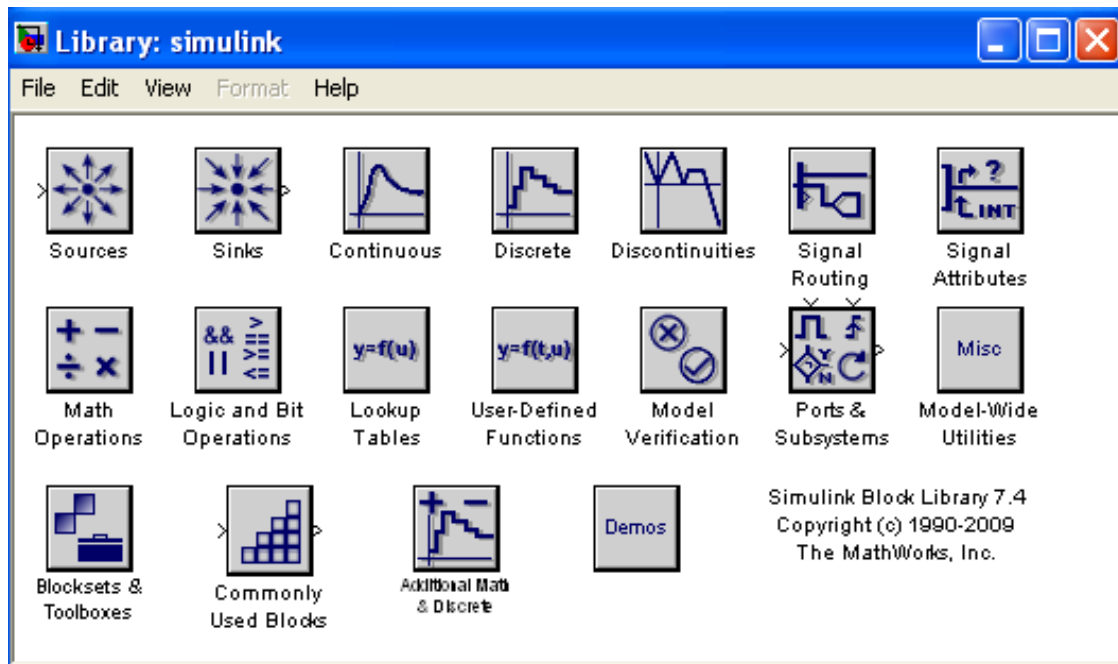


Рис. 3.5

Для додавання блоків в структурну схему їх можна скопіювати з бібліотеки або з іншої моделі. Для копіювання встановіть курсор миші на піктограму потрібного блоку, потім натисніть і утримуйте ліву кнопку миші. Simulink виділить контури блоку і його ім'я. Утримуючи ліву кнопку миші, перемістіть блок у вікно моделі і відпустіть кнопку миші. Копія блоку генератора синусоїдального сигналу Step з'явиться у вікні.

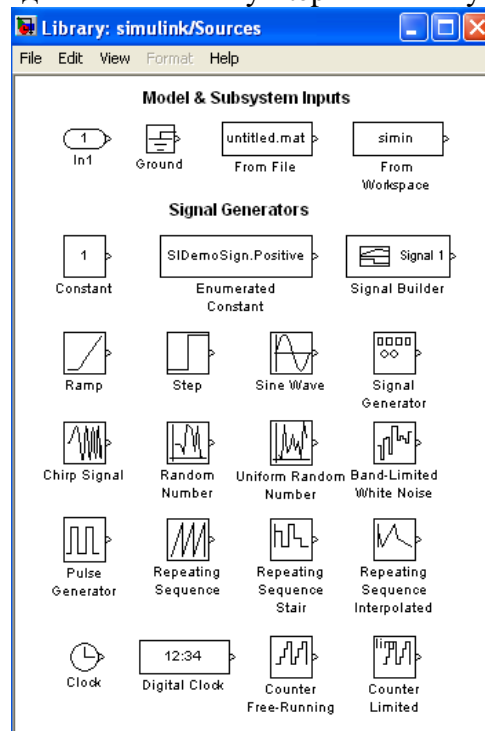


Рис. 3.6

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 21

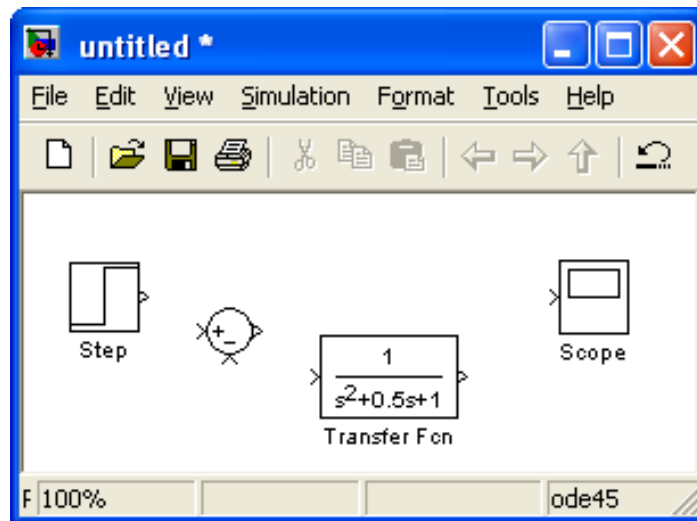


Рис. 3.7

Таким же чином введіть інші блоки у вікно структурної схеми. Переміщати блоки в середині вікна можна так же, як і копіювати блоки із бібліотеки. Виділений блок можна переміщати, використовуючи

клавіші керування курсором, а також можна використовувати “гарячі” клавіші **CTRL+I**.

Після того, як усі необхідні блоки введені у вікно структурної схеми, вона буде мати такий вигляд, як на рис. 1.7.

Кожен блок має декілька символів “>”, що розміщені вздовж його контура. Символ “>”, що вказує напрям в середину блоку, називається вхідним портом (входом блоку), а символ “>”, що вказує напрям із блоку, називається вихідним портом (виходом блоку). Сигнал передається з виходу одного блоку на вхід іншого блоку за допомогою лінії зв’язку. Якщо на вхід або вихід блоку підключена лінія зв’язку, то символ порту зникає.

Блок суматора Sum має 2 вхідних порти зі знаком «+», а потрібно один зі знаком «+», а інший зі знаком «-». Для зміни знаку вхідних портів відчинимо вікно параметрів суматора, виконавши подвійне натиснення лівої кнопки миші на даному блоці. У цьому вікні (рис. 3.8) змінимо друге значення зі знаком «+» на потрібне нам значення зі знаком «-» і закриємо вікно кнопкою Close. Simulink змінить знаки вхідних портів суматора. Якщо нам знадобиться суматор на 3 і більше портів, аналогічним чином додамо порти з потрібними нам знаками. В даному випадку знаки знаходяться за вертикальною рисою (проміжки між входами), змінюючи знаки перед та за рисою, отримаємо необхідне положення вхідних портів суматора.

З’єднаємо вихід блоку ступінчастого сигналу Step із входом суматора Sum. Встановіть курсор миші на вихідний порт блоку ступінчастого сигналу. Курсор миші змінить свій вигляд на перехрестя. Натисніть і утримуйте ліву кнопку миші і перемістіть курсор миші до вхідного порту суматора. Курсор миші змінить свій вигляд на подвійне перехрестя. Відпустіть ліву кнопку миші. Блоки будуть з’єднані між собою. Блоки також будуть з’єднані, якщо відпустити ліву кнопку миші, коли її курсор знаходиться всередині блоку. Після виконання всіх з’єднань модель буде мати вигляд, як на рис. 3.8.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 22

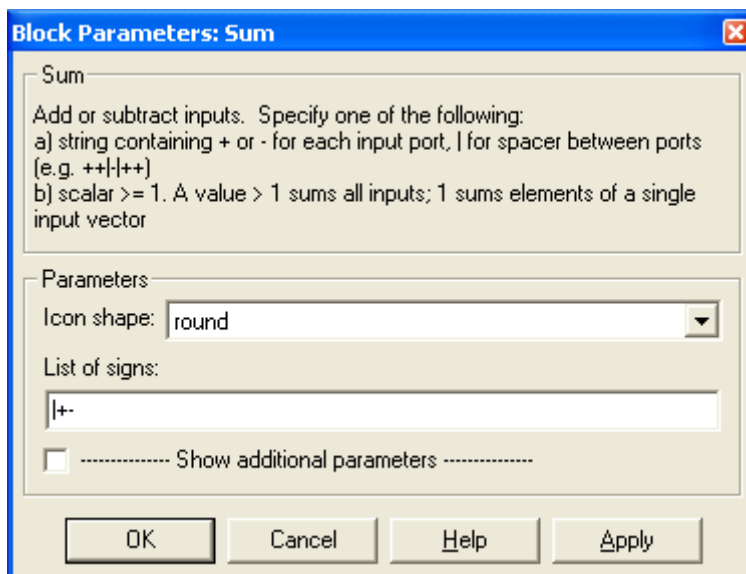


Рис. 3.8

Для моделювання структурної схеми спочатку необхідно відкрити вікно осцилографа Scope подвійним натисненням лівої кнопки миші на його піктограмі. Потім необхідно встановити параметри моделювання. Для цього виконайте команду головного меню Solver – Simulation time і в діалоговому вікні встановіть час закінчення моделювання Stop time, що дорівнює 15,0 с.

Запустіть процес моделювання командою Simulation – Start або натискаючи значок «Start» (перевернутий рівнобедрений трикутник). Результати моделювання будуть виведені у вікні Scope.

Моделювання закінчується, коли досягнуто час, зазначений в параметрах моделювання, або якщо виконана команда Simulation – Stop.

Для запису структурної схеми на жорсткий диск виконайте команду File – Save і введіть потрібне ім'я файлу.

## 2 Завдання для лабораторної роботи

2.1. Згідно свого варіанту оберіть структурну схему системи автоматичного управління (додаток 1) та параметри цієї схеми (додаток 2).

2.2. Ввести дану структурну схему системи автоматичного управління в програму Simulink та отримати перехідну характеристику.

2.3. Оцінити на стійкість систему автоматичного управління за імпульсною, перехідною та за логарифмічно-амплітудною характеристикою.

## 3 Зміст звіту

3.1. Назва та мета роботи.

3.2. Структурна схема системи автоматичного управління згідно свого завдання.

3.3. Результат виконання моделі даної структурної схеми в Simulink та графіки відповідних характеристик.

3.4. Оцінювання на стійкість системи автоматичного управління.

3.5. Висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 23

#### 4 Контрольні питання

- 4.1. Дайте визначення САУ та її передаточної функції.
- 4.2. Дайте визначення часових характеристик та частотних характеристик.
- 4.3. Дайте визначення стійкості та показників якості роботи лінійних САУ.
- 4.4. Назвіть основні структурні перетворення лінійних САУ.
- 4.5. Назвіть функції, за допомогою яких визначаються відгуки САУ за часом..
- 4.6. Які основні бібліотеки блоків використовують для моделювання систем управління в Matlab?
- 4.7. Які блоки ви використовували для моделювання вашої системи управління?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 24

## Лабораторна робота 4

# ВВЕДЕННЯ В ПРОГРАМУ MATLAB МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА ДОПОМОГОЮ М-ФАЙЛУ

## 1 Теоретичні відомості

### 1.1 Методи моделювання систем управління в Matlab

#### 1.1.1 “Алгебра ланок та кіл”

Реальні системи автоматичного управління складаються із з'єднаних між собою окремих блоків (динамічних ланок), рівняння поведінки яких досить прості. Тому в практиці проектування САУ традиційними є структурні методи, коли САУ задається певною схемою з'єднань окремих простих динамічних ланок. В ході проектування необхідно додати до САУ одну або декілька нових еланок таким чином, щоб забезпечити бажану якість динаміки всієї системи. Ці додаткові ланки називаються коригуючими ланками або лінійними регуляторами. Тому в програмі MATLAB передбачена можливість “набору” схеми моделі САУ шляхом попереднього введення моделей ланок, із яких складається система, та наступного з'єднання цих ланок в єдину структуру. Такий метод створення моделі називається “алгебра ланок та кіл”.

До процедур, які виконують з'єднання ланок, відносяться:

- ◆ plus (minus) – виконує паралельне з'єднання ланок, тобто визначає характеристики моделі системи, що складається з паралельно з'єднаних ланок;
- ◆ parallel – виконує паралельне з'єднання ланок. На відміну від попередньої процедури може використовуватися для багатовимірних систем та реалізації паралельного з'єднання лише за деякими входами та виходами;
- ◆ mtimes (або знак “\*” поміж ланками) – виконує послідовне з'єднання ланок. Використовується лише для одновимірних систем;
- ◆ series – послідовне часткове з'єднання багатовимірних систем;
- ◆ feedback – з'єднання двох ланок, коли другий елемент складає коло від'ємного зворотного зв'язку для першої ланки;
- ◆ append – формальне об'єднання незалежних між собою систем (додавання виходів та входів другої системи до виходів та входів першої);
- ◆ connect – встановлення з'єднань виходів та входів багатовимірної системи, створеної попередньо процедурою append. Схема з'єднань задається матрицею з'єднань Q, що використовується як один із входних параметрів процедури;
- ◆ inv – створює САК, зворотну даній, тобто таку, в якій виходи та входи переставлені місцями;
- ◆ vertcat – виконує так звану вертикальну конкатенацію (зчеплення) систем (ланок), тобто таке їх з'єднання, коли входи цих систем стають загальними, а виходи залишаються незалежними. Для такого з'єднання необхідно, щоб число входів результуючої системи залишалось таким, як і у кожної із з'єднуємих систем, а число виходів буде дорівнювати сумі числа виходів з'єднуємих систем;
- ◆ horzcat – виконує “горизонтальне зчеплення” визначених систем, при якому виходи стають загальними, а входи додаються.

Пакет Control System Toolbox в складі Matlab має ряд функцій, які виконують аналіз САУ. Це, в першу чергу, функції для отримання відгуків системи на зовнішні впливи, в тому



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 25

числі відгуків за часом та за частотою. Відгуки за часом визначаються за допомогою таких функцій:

- ◆ `impulse` – обчислення реакції системи на одиничний імпульсний вплив;
- ◆ `step` – обчислення реакції системи на одиничний ступеневий вплив;
- ◆ `initial` – визначення власного руху системи при довільних початкових умовах;
- ◆ `lsim` – обчислення реакції системи на вхідний вплив довільної форми, який задається в формі вектору його значень за часом.

Друга група функцій забезпечує отримання реакції системи в частотній області на зовнішній гармонійний вплив. Це такі функції:

- ◆ `bode` – побудова графіка ЛАХ (діаграми Бодє) системи;
- ◆ `nyquist` – побудова на комплексній площині графіка АФХ системи в полярних координатах;
- ◆ `nichols` – побудова графіка АФХ розімкнутої системи в декартових координатах;
- ◆ `sigma` – побудова графіка АЧХ системи;
- ◆ `margin` – побудова графіка ЛАХ з відображенням запасів за фазою та амплітудою.

### Приклад 1.

В САУ послідовно з'єднано дві ланки. Потрібно спростити систему та отримати перехідну, імпульсну, та ЛАХ характеристики.

```
>> W1 = tf(25, [100 50])
Transfer function:
      25
```

```
-----
      100 s + 50
>> W2 = tf(1, [1 0])
Transfer function:
```

```
1
--
s
>> W= series (W1, W2)
Transfer function:
      25
```

```
-----
      100 s^2 + 50 s
```

Визначимо перехідну характеристику:

```
>> step (W);
```

Визначимо реакцію системи на одиничний імпульс:

```
>> impulse (W);
```

Визначимо графік ЛАХ системи:

```
>> bode (W);
```

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 26

1.1.2 Створення математичної моделі за умов, що структурна схема спрощена до однієї передаточної функції

Для реалізації цього методу потрібно спростити структурну схему системи автоматичного управління шляхом алгебраїчних перетворень до однієї передаточної функції та ввести результат спрощення в командному рядку Matlab або у m-файл.

## Приклад 2.

Маємо передаточну функцію  $W(p) = \frac{1}{p^2 + 0,5p + 1}$ . Отримати перехідну

характеристику, імпульсну, АЧХ та ЛАХ характеристики САУ.

```
>> sys= tf(1,[1 0.5 1]);
>> step (sys);
>> impulse (sys);
>> sigma (sys);
>> bode (sys);
```

## 2 Завдання для лабораторної роботи

2.1.Згідно свого варіанту оберіть структурну схему системи автоматичного управління (додаток 1) та параметри цієї схеми (додаток 2).

2.2. Спростити дану структурну схему системи автоматичного управління методом ланок та кіл та отримати перехідну характеристику.

2.3.Оцінити на стійкість систему автоматичного управління за імпульсною, перехідною та за логарифмічно-амплітудною характеристикою.

## 3 Зміст звіту

3.1. Назва та мета роботи.

3.2. Структурна схема системи автоматичного управління згідно свого завдання.

3.3. Результат спрощення даної структурної схеми методом ланок та кіл, графіки відповідних характеристик.

3.4. Оцінювання на стійкість системи автоматичного управління.

3.5. Висновки по роботі.

## 4 Контрольні питання

4.1. Дайте визначення САУ та її передаточної функції.

4.2. Дайте визначення часових характеристик та частотних характеристик.

4.3. Дайте визначення стійкості та показників якості роботи лінійних САУ.

4.4. Назвіть основні структурні перетворення лінійних САУ.

4.5. Назвіть функції, за допомогою яких визначаються відгуки САУ за часом..

4.6. Які основні бібліотеки блоків використовують для моделювання систем управління в Matlab?

4.7. Які блоки ви використовували для моделювання вашої системи управління?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 27

## Лабораторна робота 5

# ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСТОТНИХ ТА ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Мета роботи: дослідити стійкість САУ частотними та часовими методами в програмі MatLab (інструментальні пакети Control System Toolbox та Simulink), визначити показники якості перехідних процесів.

### 1 Теоретичні відомості

#### 1.1 Стійкість САУ частотними методами

Частотний метод має дві модифікації: на основі ЛАХ (діаграма Бode по термінології програми Matlab); на основі АФХ на комплексній площині (діаграма Найквіста за термінологією програми Matlab). Як відомо, ці два методи відображають одну і ту ж саму інформацію, а різниця між методами полягає в формі представлення цієї інформації.

Відомо, що вихідний сигнал лінійної системи при синусоїдальному вхідному впливі є синусоїда тієї ж частоти з фазовим зсувом, що вносить система. Тому частотний відгук визначається як амплітудні та фазові різниці поміж вхідними та вихідними синусоїдами. При цьому можна використовувати частотний відгук розімкнутої системи для передбачення її поведінки в замкнутому стані (при замиканні зворотного зв'язку).

Для побудови частотних характеристик створюється вектор частот, який має охопити діапазон від нуля до нескінченості, та обчислюється величина передаточної функції на цих частотах. Якщо  $W(s)$  – передаточна функція розімкнутого кола системи, а  $\omega$  – вектор частоти, то будується графік  $W(j\omega)$  відносно  $\omega$ . В зв'язку з тим, що  $W(j\omega)$  – функція комплексного числа, то для неї можна побудувати графіки модуля та фази. В результаті отримуємо діаграму Бode. Якщо розташувати цю функцію на комплексній площині, то отримуємо діаграму Найквіста.

Раніше вручну будували асимптотичні ЛАЧХ, підсумовуючи ЛАЧХ окремих ланок. У середовищі Matlab існують засоби, що дозволяють автоматизувати побудову точних (не асимптотичних) ЛАФЧХ. При цьому можна використовувати накопичений за багато років класичний досвід проектування.

На рис.5.1 представлений графік логарифмічно-амплітудної характеристики САУ та визначено на графіку запаси по амплітуді  $g_m$  та фазі  $\varphi_m$ , частоту зрізу  $\omega_{зр}$ .

*Запас стійкості по амплітуді  $g_m$*  (в дБ) - це відстань від ЛАЧХ до горизонтальної прямої  $L_m = 0$  дБ на частоті, на якій фазова характеристика перетинає пряму  $\varphi = -180^\circ$ . На цій частоті система повинна мати коефіцієнт посилення менше 1 (або  $L_m(\omega) < 0$ ).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 28

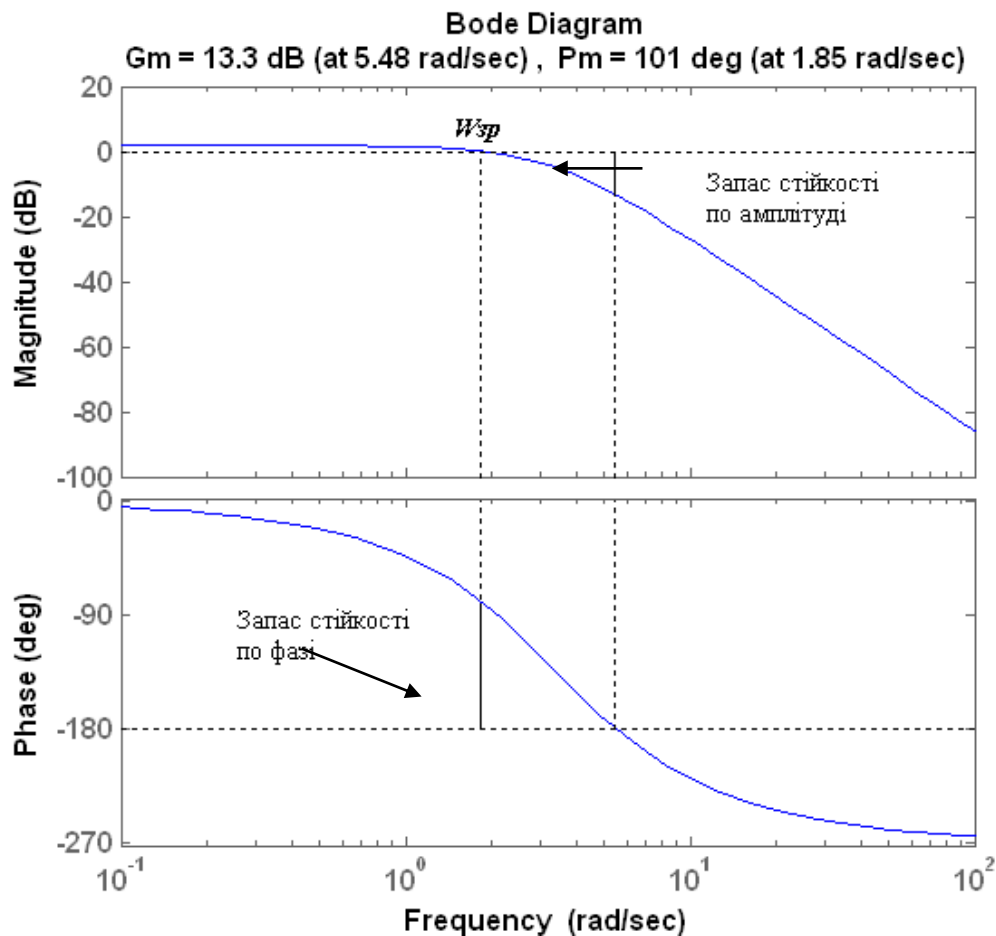


Рис.5.1. Логарифмічна-амплітудна характеристика САУ

Запас стійкості по фазі  $\varphi_m$  (у градусах) - це відстань від частотної характеристики до горизонтальної прямої  $\varphi = -180^\circ$  на частоті зрізу  $\omega_{зр}$ . На цій частоті фазова характеристика повинна мати значення більше  $-180^\circ$ .

**Допустимим вважається запас по амплітуді не менше 6 дБ і запас по фазі не менше 30 градусів.**

Для забезпечення гарної якості перехідних процесів рекомендується, щоб ЛАЧХ перетинала вісь  $L=0$  з нахилом 20 дБ / дек. Це пояснюється тим, що нахил 20 дБ / дек, відповідний аперіодичній ланці, призводить до найменшої коливальності перехідного процесу. Точки переходу (зламу асимптотичної ЛАЧХ) від низькочастотної частини до середньочастотної і далі до високочастотної повинні відстояти від осі  $L=0$  на 12-16 дБ.

Смугою перепускання  $\omega_{bw}$  називається діапазон частот від 0 до значення частоти, на якій значення ЛАХ замкнутої системи дорівнює -3дБ.

## 1.2 Стійкість САУ часовими методами

Для прогнозування якості роботи замкнутої системи на основі відгуків розімкнутої системи використовуються такі положення:

1. Якщо частота зрізу розімкнутої системи менша від частоти, на якій ФЧХ досягає значення  $-180^\circ$  ( $\omega_c < \omega_{pc} = -180^\circ$ ), то замкнута система буде стійкою.

2. У замкнутій систем 2-го порядку коефіцієнт демпфування дорівнює запасу по фазі, що віднесений до 100.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 29

3. Для системи 2-го порядку за межу смуги перепускання приблизно можна прийняти частоту власних незгасаючих коливань.

Наступним питанням при дослідженні об'єкта управління є похибка сталого режиму. Найпростіше отримати похибку сталого режиму та час установлення шляхом моделювання в програмі Matlab відгуку замкнутої системи на ступеневий вхідний сигнал. Для цього записуємо m-файл:

```
>> W=tf(1,[1 10 20]);
>> Wzz=feedback(W,1,-1);
>> step(Wzz)
```

Результатом розрахунків є графік, наведений на рис. 5.2.

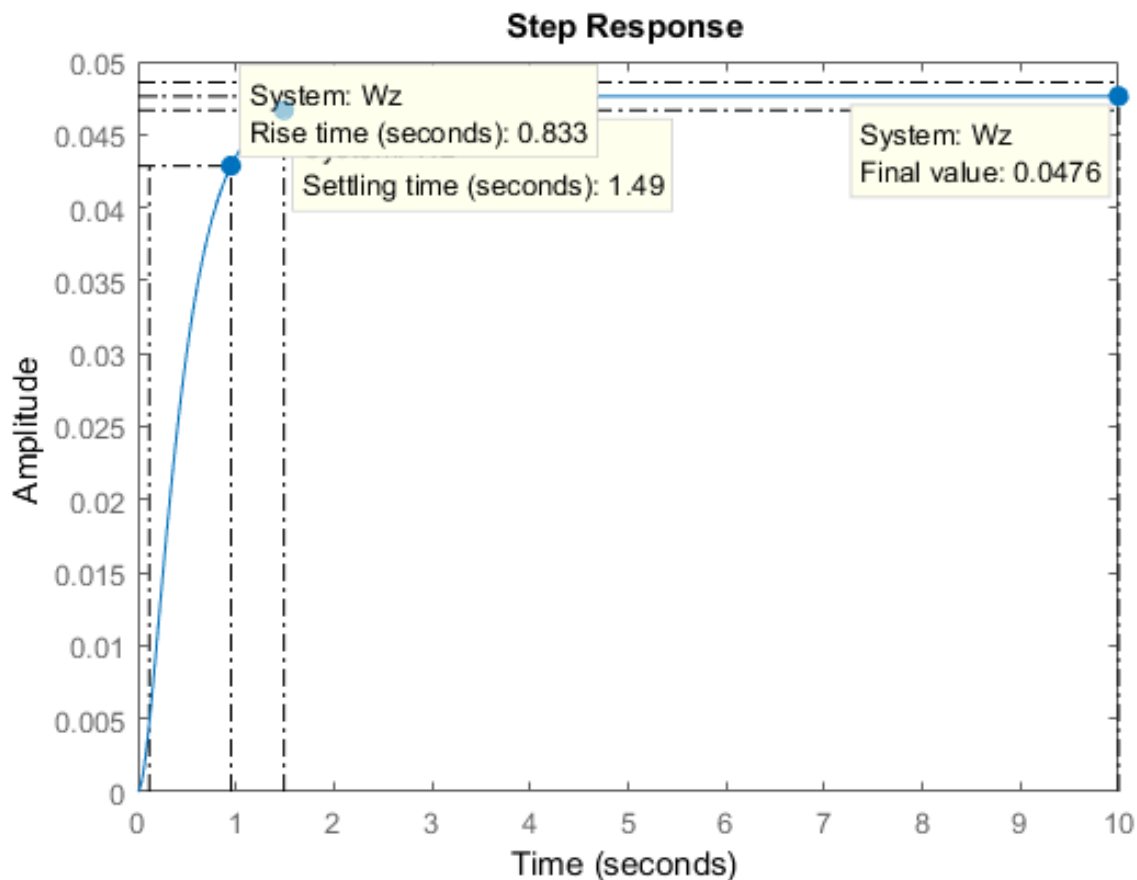


Рис. 5.2. Перехідна характеристика початкової замкнутої САУ

Час встановлення становить приблизно 1,4 с, а похибка сталого режиму становить 0,95 (див. рис. 5.3).

Також для оцінки стійкості отримаємо імпульсну характеристику. Для цього записуємо m-файл:

```
>> W=tf(1,[1 10 20]);
>> Wzz=feedback(W,1,-1);
>> impulse(Wzz)
```

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 30

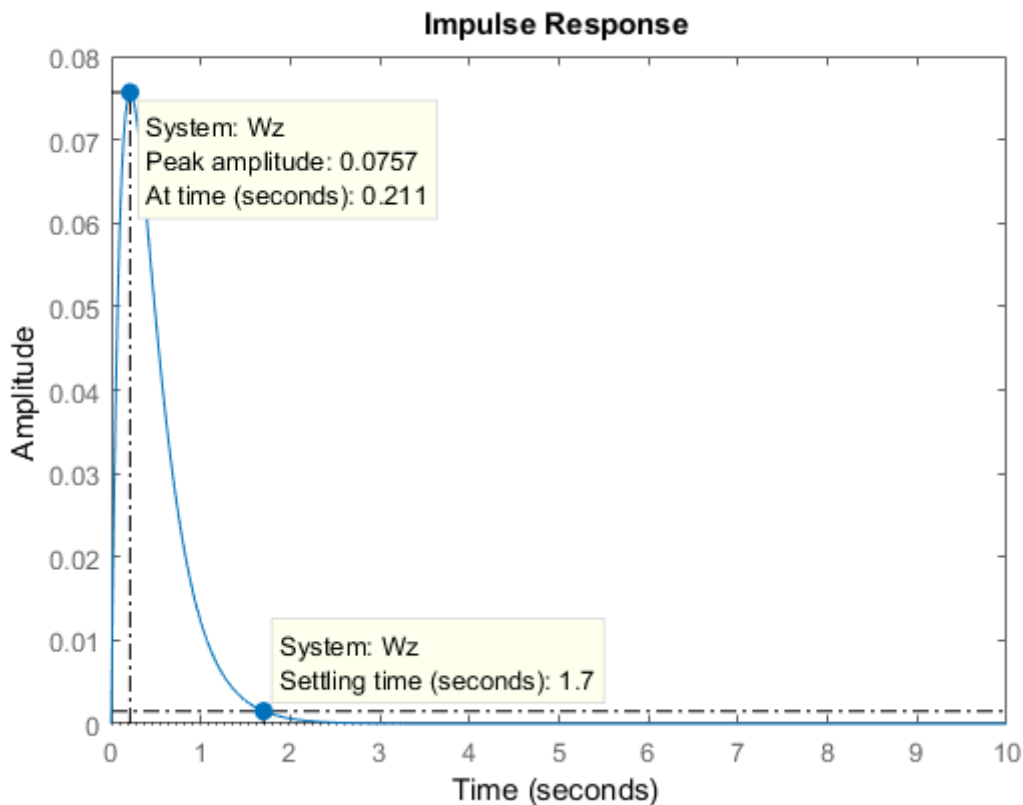


Рис.5.3. Імпульсна характеристика початкової замкнутої САУ

Отже, з перехідної та імпульсної характеристики випливає, що система стійка.

## 2 Завдання для лабораторної роботи

2.1 Згідно свого варіанту обрати структурну схему системи автоматичного управління (додаток 1) та параметри цієї схеми (додаток 2).

2.3 Ввести передаточну функцію у вигляді полінома в пакет Control System Toolbox та отримати ЛАХ систем управління.

2.4 На основі отриманої характеристики визначити смугу пропускання, запас по фазі, стійкість системи управління.

2.5 Ввести передаточну функцію у вигляді полінома в пакет Control System Toolbox та отримати перехідну характеристику систем управління.

2.6 На основі отриманої перехідної характеристики визначити час регулювання, час виходу на режим тв, час досягнення першого максимуму, пер регулювання, стійкість системи управління.

2.7. Ввести передаточну функцію у вигляді полінома в пакет Control System Toolbox та отримати імпульсну характеристику систем управління.

2.8. На основі отриманої перехідної характеристики визначити час регулювання, час виходу на режим тв, час досягнення першого максимуму, пер регулювання, стійкість системи управління

2.9. Зробити висновки про стійкість системи управління.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 31

### 3 Зміст звіту

- 3.1 Назва та мета роботи.
- 3.2 Структурна схема системи автоматичного управління згідно свого варіанту завдання.
- 3.3 Графік ЛАХ системи
- 3.4 Розрахунок за ЛАХ смуги пропускання, запасу по фазі, визначення стійкості систем управління.
- 3.5 Графік перехідної характеристики.
- 3.6. Визначені характеристики за перехідною: час регулювання, час виходу на режим тв, час досягнення першого максимуму, пер регулювання, стійкість системи управління
- 3.7. Графік імпульсною характеристики.
- 3.8. Визначені характеристики за імпульсною: час регулювання, час виходу на режим тв, час досягнення першого максимуму, пер регулювання, стійкість системи управління.
- 3.9. Визначення стійкості системи за частотними та часовими характеристиками.
- 3.8 Висновки по роботі.

### 4 Контрольні питання

- 4.1 Як визначити на графіку ЛАХ запас стійкості по амплітуді?
- 4.2 Як визначити на графіку ЛАХ запас стійкості по фазі?
- 4.3 Що таке смуга пропускання?
- 4.4 Що собою являють частотні характеристики лінійних систем?
- 4.5 Дайте визначення кожної з частотних характеристик лінійних систем.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 32

## Лабораторна робота 6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНИХ КРИТЕРІЇВ СТІЙКОСТІ

Мета роботи: дослідити стійкість систем управління за допомогою математичних критеріїв стійкості в програмі Matlab.

### 1 Теоретичні відомості

#### 1.1. Критерій Рауса-Гурвіца

Для дослідження стійкості САР за допомогою критерію Рауса-Гурвіца потрібно виконати аналіз матриці Гурвіца, складеної з коефіцієнтів характеристичного рівняння САР.

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_{n-1} r + a_n = 0 \quad (6.1)$$

Для стійкості САР необхідно і достатньо, щоб усі діагональні мінори матриці Гурвіца були позитивні. При цьому матриця Гурвіца складається за наступним правилом. Спочатку по діагоналі виписуються всі коефіцієнти від  $a_1$  до  $a_n$  у порядку зростання зверху вниз.

Потім заповнюються стовпці в порядку зменшення номерів коефіцієнтів.

Відсутні коефіцієнти замінюються нулями.

Далі складається матриця. Синтаксис команди завдання матриці наступний (6.2):

$$A = [A_{1,1}, A_{1,2}, \dots, A_{1,n-1}; \dots; A_{1,n}, A_{n,1}, A_{n,2}, \dots, A_{n,n-1}, A_{n,n}] \quad (6.2)$$

Елементи матриці задаються за правилом складання матриці Гурвіца.

За допомогою циклу перевіряється умова: чи є головні діагональні мінори матриці Гурвіца негативними. Якщо негативні, то система нестійка. Якщо додатні, то система стійка.

Розглянемо на прикладі системи, що задана передаточною функцією (6.3):

$$\frac{7.1s^2 + 106.5s + 355}{0.002s^5 + 0.054s^4 + 1.26s^3 + 16.85s^2 + 116.1s + 289} \quad (6.3)$$

Для того щоб дослідити систему на стійкість за критерієм Гурвіца, необхідно отримати передатну функцію замкненої системи, яка знаходиться з виразу:

$$w12 = \text{feedback}(w11, 1, -1)$$

Та отримаємо таку замкнену функцію:

$$w12 =$$

$$\frac{7.1 s^2 + 106.5 s + 355}{0.002 s^5 + 0.054 s^4 + 1.26 s^3 + 23.95 s^2 + 222.6 s + 644}$$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 33

Для подальшого дослідження необхідно взяти знаменник рівняння та обрахувати за програмою:

```

a5=644;
a4=222.6;
a3=23.95;
a2=1.26;
a1=0.054;
a0=0.002;
A=[a1,a3,a3,0,0;a0,a2,a4,0,0;0,a1,a3,a5,0;0,a0,a2,a4,0;0 0 0 0
a5];
n=length(A);
while n ~=0
    D = det(A);
    if D <= 0
        disp(' система не стійка');
        break;
    else
        A(:,n)=[];
        A(n,:)=[];
        n= n - 1;
    end
end
if D>0
    disp(' система стійка');
end

```

Результат роботи програми:

```

kr_gur
система не стійка

```

### 1.2 Частотний критерій Михайлова

За видом графіка АФЧХ першого роду, що називається годограф Михайлова, судять про стійкість САР Критерій Михайлова формулюється наступним чином. Для стійкості САР необхідно і достатньо, щоб годограф Михайлова починався на речовинній позитивній півосі та в напрямку проти годинникової стрілки проходив стільки квадрантів, як порядок аналізованої САР.

Для обрахунку також потрібний знаменник замкненої системи. Програма в матлаб представлена нижче:

```

clc
clear
figure (1)
a5=644;
a4=222.6;
a3=23.95;
a2=1.26;
a1=0.054;

```

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 34

```

a0=0.002;
for w = 0.0: 0.05:10
    Djw = a0*((w*j)^5) + a1*((w*j)^4) + a2 *((w*j)^3) + a3
    *((w*j)^2)+a4*((w*j)^1)+a5;
    Re = real(Djw);
    Im = imag(Djw);
    plot(Re, Im, 'b.')
xlabel('Re(D)')
ylabel('Im(D)')
hold on
end

```

Результат роботи програми рис.6.1. З годографа Михайлова видно, що система нестійка, так як він не перетинає стільки квадрантів, як порядок аналізованої САР (порядок 5).

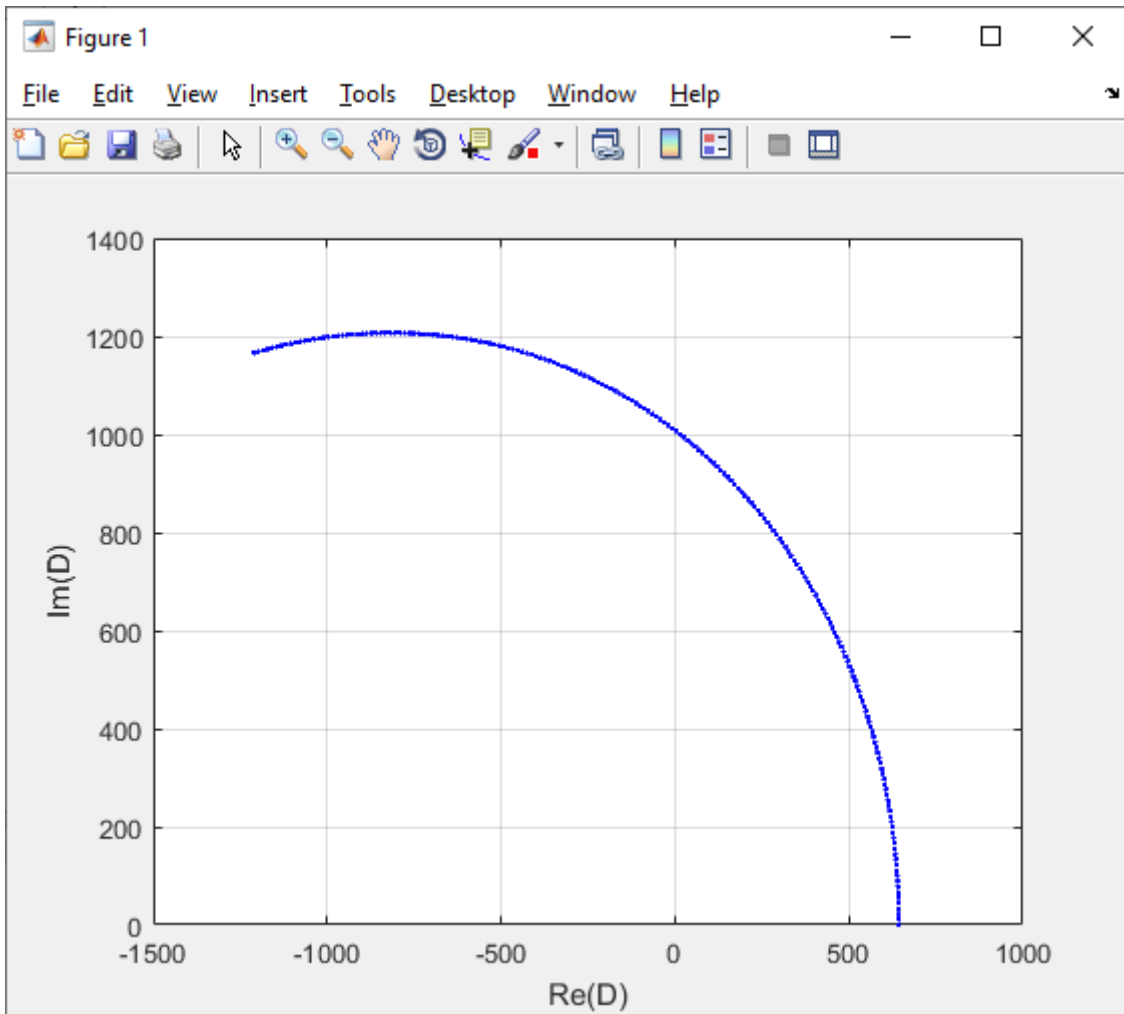


Рис.6.1. Годограф Михайлова

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 35

### 1.3. Критерій Найквіста

За допомогою критерію Найквіста здійснюється оцінка стійкості замкнутої САР. Критерій Найквіста складається із двох частин і формулюється наступним чином. Для стійкості замкнутої системи, отриманої замиканням стійкої розімкнутої системи, необхідно і достатньо, щоб АФЧХ розімкнутої системи не охоплювала крапку з координатами  $(-1, 0)$  на комплексній площині.

Для стійкості замкнутої системи, отриманої замиканням нестійкої розімкнутої, необхідно і достатньо, щоб при зміні частоти від  $-\infty$  до  $+\infty$  АФЧХ розімкнутої системи охоплювала в позитивному напрямку точку з координатами  $(-1, 0)$  стільки разів, скільки позитивного коріння є в характеристичному рівнянні розімкнутої системи.

Ключовим в оцінці стійкості САР за Найквістом є вміння побудувати годограф АФЧХ другого роду. Для цього в Matlab використовується функція `nyquist(W)`, яка як аргумент використовує передатну функцію  $W$ .

Побудувати АФЧХ другого роду, якщо передатна функція в розімкнутому стан має вигляд (6.3).

Приклад використання в матлаб представлений нижче:

```
clc
clear
figure (1)
W=tf([7.1 106.5 355],[0.002 0.054 1.26 16.85 116.1 289]);
nyquist(W),grid on;
```

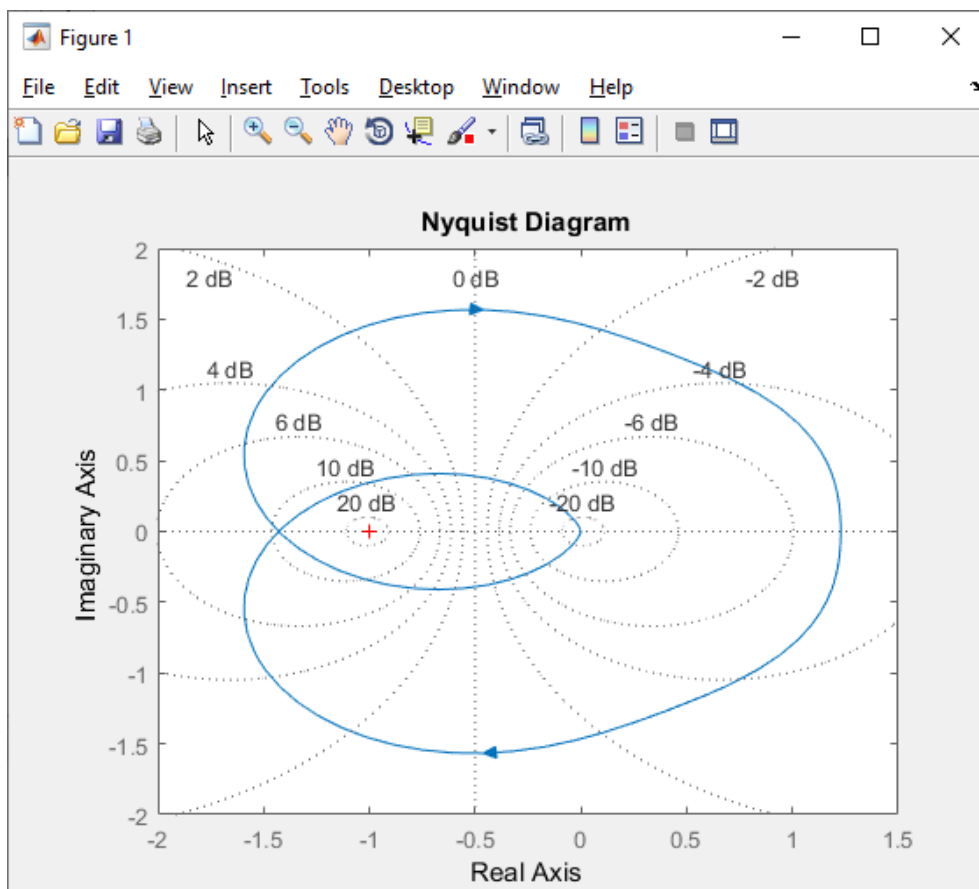


Рис.6.2. Приклад побудови другого роду АФЧХ для критерію Найквіста

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 36

## 2 Завдання для лабораторної роботи

- 2.1 Згідно свого варіанту обрати структурну схему системи автоматичного управління (додаток 1) та параметри цієї схеми (додаток 2).
- 2.2. Спростити САР методом алгебри ланок та кіл.
- 2.3 На основі спрощеної системи виконати визначення стійкості за критерієм Рауса-Гурвіца.
- 2.4 На основі спрощеної системи виконати визначення стійкості за частотним критерієм Михайлова.
- 2.5. На основі спрощеної системи виконати визначення стійкості за критерієм Найквіста.
- 2.6. Зробити висновки про стійкість системи управління.

## 3 Зміст звіту

- 3.1. Назва та мета роботи.
- 3.2. Структурна схема системи автоматичного управління згідно свого варіанту завдання.
- 3.3. Спрощена передаточна функція системи методом алгебри ланок та кіл.
- 3.4. Застосування для своєї САР визначення стійкості за критерієм Рауса-Гурвіца.
- 3.5.Застосування для своєї САР визначення стійкості за частотним критерієм Михайлова.
- 3.6. Застосування для своєї САР визначення стійкості за критерієм Найквіста.
- 3.7 Висновки по роботі.

## 4 Контрольні питання

- 4.1 Як визначити стійкість системи за критерієм Рауса-Гурвіца?
- 4.2 Як визначити стійкість системи за частотним критерієм Михайлова?
- 4.3 Як визначити стійкість системи за критерієм Найквіста?
- 4.4 Що собою являє розімкнена САР?
- 4.5 Що собою являє замкнена САР?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 37

## Лабораторна робота 7

# ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЧАСОВИМИ МЕТОДАМИ

Мета роботи: дослідити цифрові САУ часовими методами в програмі Matlab (інструментальні пакети Control System Toolbox та Simulink), визначити показники якості перехідних процесів та вплив регуляторів на ці процеси.

### 1 Теоретичні відомості

#### 1.1 Загальні відомості для дискретних ПІД-регуляторів

Пропорційно-інтегральний-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор) входить у загальний контур управління та широко використовується в промислових системах управління. ПІД-регулятор розраховує значення "похибки" як різницю між вимірюваним значенням параметру процесу і бажаним значенням. Регулятор намагається звести до мінімуму похибки, регулюючи входи об'єкту управління.

Реалізація регулятора об'єкту (ПІД, ПІ, ПД, ПІ або І типу) здійснюється за допомогою пакетів Simulink та Control System Toolbox. Параметри ПІД-регулятора можна налаштувати вручну або автоматично.

Для ПІД-регулятора дискретного часу передаточна функція має вигляд:

$$C_{par} = P + Ia(z) + D \left[ \frac{N}{1 + Nb(z)} \right], \quad (7.1)$$

$$C_{id} = P \left[ 1 + Ia(z) + D \frac{N}{1 + Nb(z)} \right], \quad (7.2)$$

де параметри  $a$  та  $b$  відповідно визначаються:

	інтегрування вперед методом Ейлера	інтегрування назад методом Ейлера	Метод трапецій
$a(z)$ метод ітерацій	$\frac{T}{z-1}$	$\frac{Tz}{z-1}$	$\frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1}$
$b(z)$ метод фільтрації	$\frac{T}{z-1}$	$\frac{Tz}{z-1}$	$\frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1}$

#### 1.2 Реалізація ПІД-регуляторів за допомогою пакетів Simulink та Control System Toolbox

Нехай об'єкт керування має передаточну функцію в безперервному вигляді:

$$W(s) = \frac{10}{s^2 + s + 20}. \quad (7.1)$$

За допомогою пакету Control System Toolbox синтез ПІД-регуляторів проводиться

наступним чином:

```
>> num=10;
>> den=[1 1 20];
>> [numd,dend] = c2dm(num,den,0.01,'zoh');
>> Wz=tf(numd, dend, 0.01);
>> pidtool(Wz)
```

Функція `pidtool(Wz)` автоматично підбирає регулятор для системи, а також робить систему стійкою. Приклад застосування параметри цієї функції для системи з передаточною характеристикою  $Wz$  представлений на рис. 7.1.

```
>>pidtool(Wz)
```

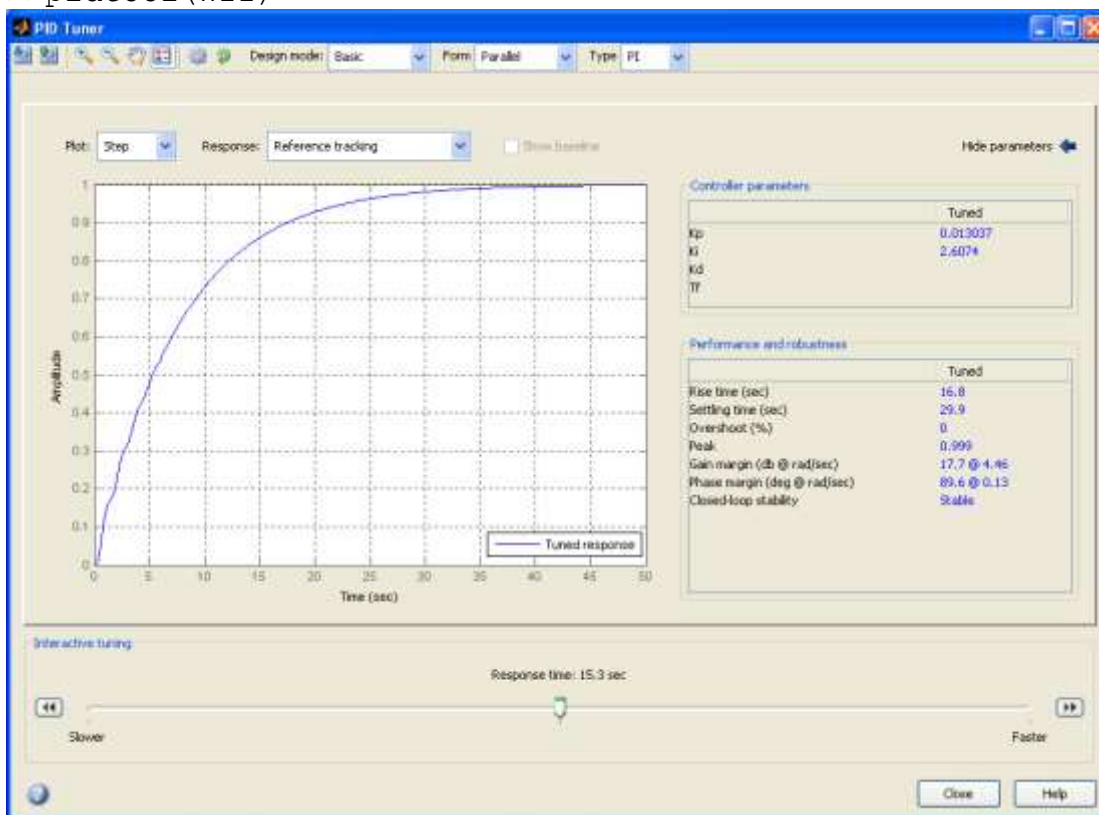


Рис.7.1

Функція `pidtune(Wz, 'PI')` підбирає регулятор заданого типу для системи, робить її стійкою, а також покращує ЛАХ хсистеми. Приклад застосування цієї функції для системи з передаточною характеристикою  $Wz$  представлений на рис. 7.2.

```
>> C=pidtune(Wz, 'PI')
Discrete-time PI controller in parallel form:
```

$$K_p + K_i * \frac{T_s}{z-1}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 39

with  $K_p = 0.013037$ ,  $K_i = 2.6074$ ,  $T_s = 0.01$

```
>>F=feedback(series(Wb,C),1,-1)
```

Transfer function:

$$6.496e-007 z^2 + 1.297e-006 z + 6.474e-007$$

-----

$$z^3 - 2.988 z^2 + 2.978 z - 0.99$$

Sampling time: 0.01

```
>> step(F)
```

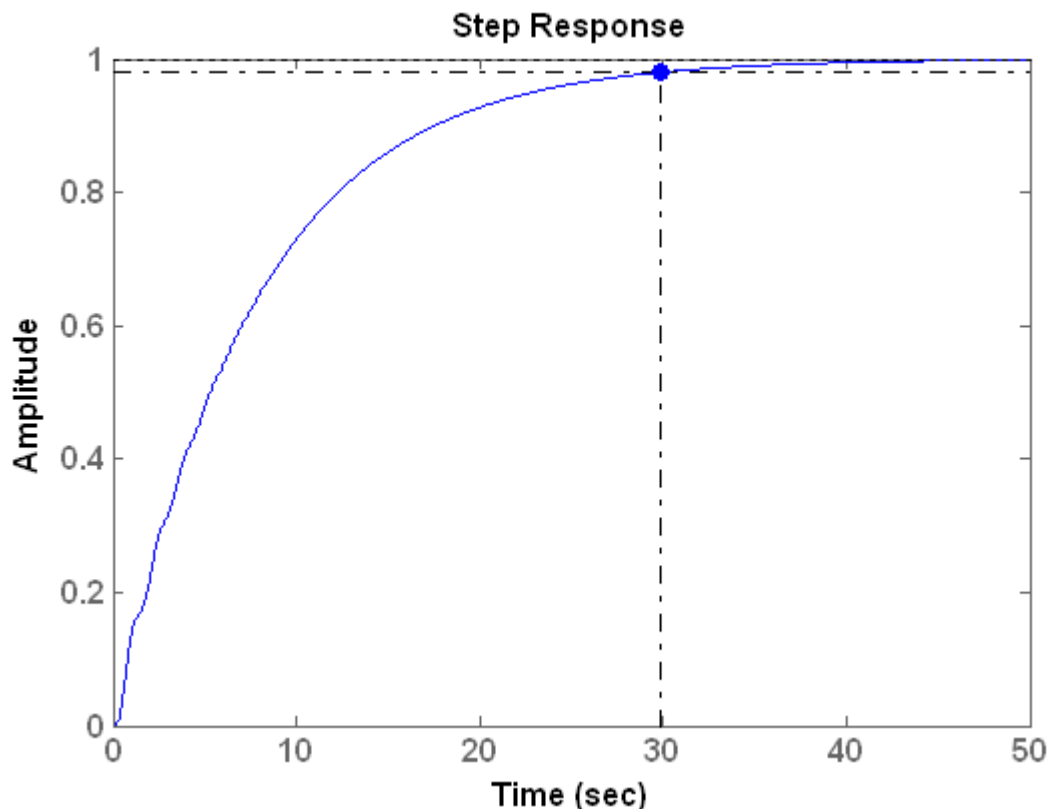


Рис.7.2. Перехідна характеристика САУ з пропорційно-інтегральним регулятором

За допомогою пакету Simulink синтез ПІД-регуляторів проводиться наступним чином (рис.7.3). Синтез за допомогою пакету Simulink може бути здійснений як автоматично, так и вручну, коли значення параметрів регуляторів заздалегідь відомі.

У випадку автоматичного синтезу при подвійному натисканні на ліву клавішу миші, що вказує на блок Discrete PID Controller, з'явиться вікно "Function Block Parameters: PID Controller". В цьому вікні можна обрати тип регулятора та натиснути кнопку Tune для автоматичного підбору параметрів регулятора.

У випадку ручного синтезу необхідно у вікно Function Block Parameters ввести значення параметрів регулятора.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 40

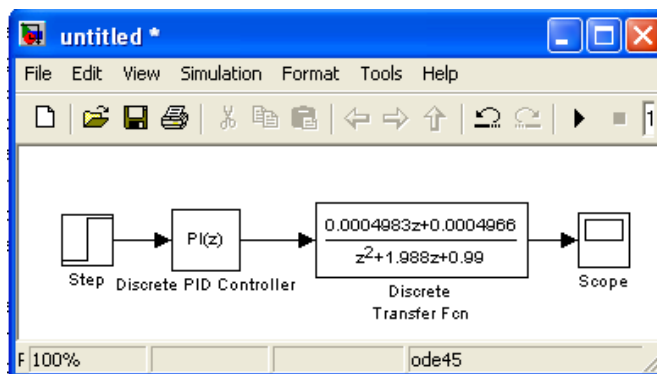


Рис.7.3

Як видно з вище викладеного, в даному випадку застосовується ПІ-регулятор з параметрами  $K_p = 0.013037$ ,  $K_i = 2.6074$ , часом встановлення  $t_e = 29,9$ , перелюгуванням  $\sigma = 0\%$ , похибка сталого режиму відсутня, система стійка.

## 2 Завдання для лабораторної роботи

2.1 Згідно свого варіанту обрати структурну схему системи автоматичного управління (додаток 1) та параметри цієї схеми (додаток 2).

2.2 Ввести передаточну функцію цифрової САУ у вигляді полінома за допомогою пакету Simulink та отримати відгук розімкнутого кола системи, прийняти проектне рішення щодо потрібних удосконалень цієї системи.

2.3 Ввести передаточну функцію цифровій системі у вигляді полінома в пакет Control System Toolbox та отримати відгук розімкнутого кола системи, прийняти проектне рішення щодо потрібних удосконалень цієї системи.

2.4 На основі отриманих графіків визначити час встановлення, перерегулювання, стійкість САУ.

2.5 Якщо цифрова система нестійка, то застосувати регулятор. Якщо стійка, то покращити перехідну характеристику системи шляхом застосування регулятора.

2.6 Промодельовати цифрову систему з регулятором за допомогою пакету Simulink та отримати перехідну характеристику системи.

2.7 Промодельовати цифрову систему з регулятором в пакеті Control System Toolbox та отримайте перехідну характеристику системи.

2.8 Порівняти отримані графіки перехідної характеристики цифрової системи з регулятором та без регулятора.

2.9 Порівняти отримані графіки перехідної характеристики цифрової системи з відповідними характеристиками неперервної системи.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 41

### 3 Зміст звіту

3.1 Назва та мета роботи.

3.2 Структурна схема системи автоматичного управління згідно свого варіанту завдання.

3.3 Результат моделювання структурної схеми цифрової САУ в пакеті Simulink та графік отриманої перехідної характеристики системи без регулятора.

3.4 Результат моделювання цифрової САУ в пакеті Control System Toolbox та графік отриманої перехідної характеристики системи без регулятора.

3.5 Результат моделювання цифрової САУ в пакеті Simulink та графік отриманої перехідної характеристики системи з регулятором.

3.6 Результат виконання цифрової моделі отриманої в Control System Toolbox та графік отриманої перехідної характеристики з регулятором.

3.7 Розрахунок часу встановлення, перерегулювання, в системі без регулятора та з регулятором.

3.8 Визначення стійкості цифрової системи без регулятора та з регулятором.

3.9 Порівняння графіків перехідних характеристик цифрової системи автоматичного управління та безперервної системи автоматичного управління, покращених за допомогою регулятора, та отриманих різними методами моделювання.

3.9 Висновки по роботі.

### 4 Контрольні питання

4.1 Дайте визначення часової характеристики дискретної системи.

4.2 Що собою являють часові характеристики дискретних систем?

4.3 Як застосувати регулятор для покращення часових характеристик за допомогою пакету програм Matlab?

4.4 Як застосувати регулятор для покращення часових характеристик САУ за допомогою пакету Control System Toolbox?

4.5 Який вплив кожного із елементів регулятора на якість перехідних процесів в САУ?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 31 / 42

## Лабораторна робота 8 ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНИМИ МЕТОДАМИ

Мета роботи: дослідити методи синтезу регуляторів для цифрової САУ частотними методами в програмі Matlab (інструментальні пакети Control System Toolbox та Simulink), визначити показники якості перехідних процесів.

### 1.1 Характеристика роботи замкнутої системи

Для прогнозування якості роботи замкнутої системи на основі відгуків розімкнутої системи використовуються такі положення:

1. Якщо частота зрізу розімкнутої системи, менша від частоти, на якій ФЧХ досягає значення  $-180^0$  ( $\omega_c < \omega_{pc} = -180^0$ ), то замкнута система буде стійкою.
2. Коефіцієнт демпфування замкнутої системи 2-го порядку дорівнює запасу по фазі, що віднесений до 100.
3. Для систем 2-го порядку за межу смуги перепускання можна прийняти частоту власних незгасаючих коливань.

### 1.2 Реалізація ПІД-регуляторів за допомогою Control System Toolbox

Використаємо вказані властивості при синтезі регулятора для системи, яка відповідає структурній схемі на рис. 3.1. В якості регулятора будемо використовувати різні типи регуляторів з передаточною функцією загального виду  $G_c(p)$ . Нехай об'єкт керування має передаточну функцію (7.1).

Проектуємий регулятор повинен задовольняти таким вимогам:

- забезпечувати нульову похибку в сталому режимі;
- перерегулювання не повинно перевищувати 40%;
- час усталення кривої перехідного процесу має бути  $\leq 2c$ .

Задачу синтезу регулятора можна вирішити графічним або чисельним методом. При використанні програми Matlab графічний метод має явні переваги, тому будемо користуватися графічним методом синтезу регулятора. Спочатку побудуємо ЛАХ, для чого запишемо m-файл:

```
>> num=10;
>> den=[1 1 20];
>> [numd,dend] = c2dm(num,den,0.01,'zoh');
>> Wz=tf(numd, dend, 0.01);
>> Wzz=feedback(Wz,-1);
>> margin(Wzz)
```

Графіки ЛАХ наведено на рис. 8.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 43

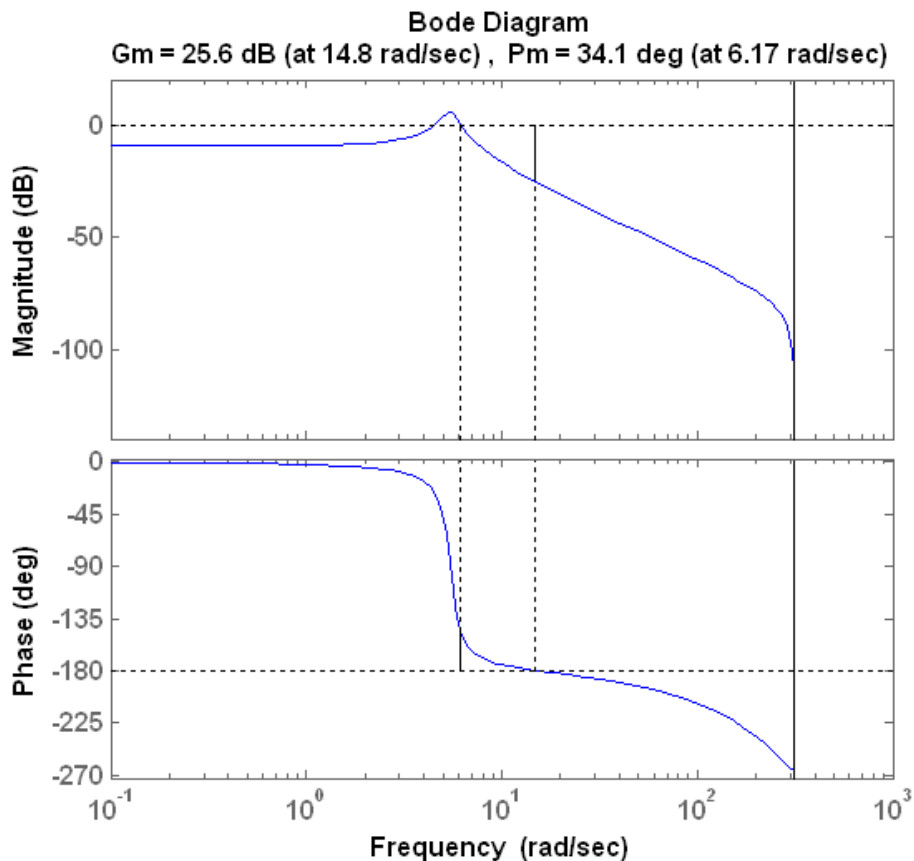


Рис. 8.1. Логарифмічно-амплітудна характеристика початкової замкнутої САУ

На основі графіків ЛАХ можна визначити деякі характеристики системи. Запас по амплітуді дорівнює 26,5 dB. Запас по фазі для цього об'єкта керування складає приблизно  $\Delta\varphi(\omega_c)=34,1^\circ$ . Це відповідає значенню коефіцієнта демпфування  $\Delta\varphi(\omega_c)/100 = 34,1^\circ/100=0,341$ .

З отриманих характеристик можна зробити висновок, що система стійка, тому потрібно покращити ці характеристики.

Отримані результати можна перевірити шляхом моделювання в програмі Matlab відгуку замкнутої системи на ступеневий вхідний сигнал. Для цього записуємо m-файл:

```
>> step(Wzz)
```

Результатом розрахунків є графік, наведений на рис. 8.2.

Таким чином, результати попереднього аналізу властивостей об'єкта керування підтверджуються: час встановлення кривої перехідного процесу становить близько 8,2 с, перегулювання  $\sigma=45\%$ , похибка сталого режиму також є неприпустимою (див. рис. 8.2).

Далі необхідно вибрати регулятор, який буде відповідати сформульованим раніше вимогам.

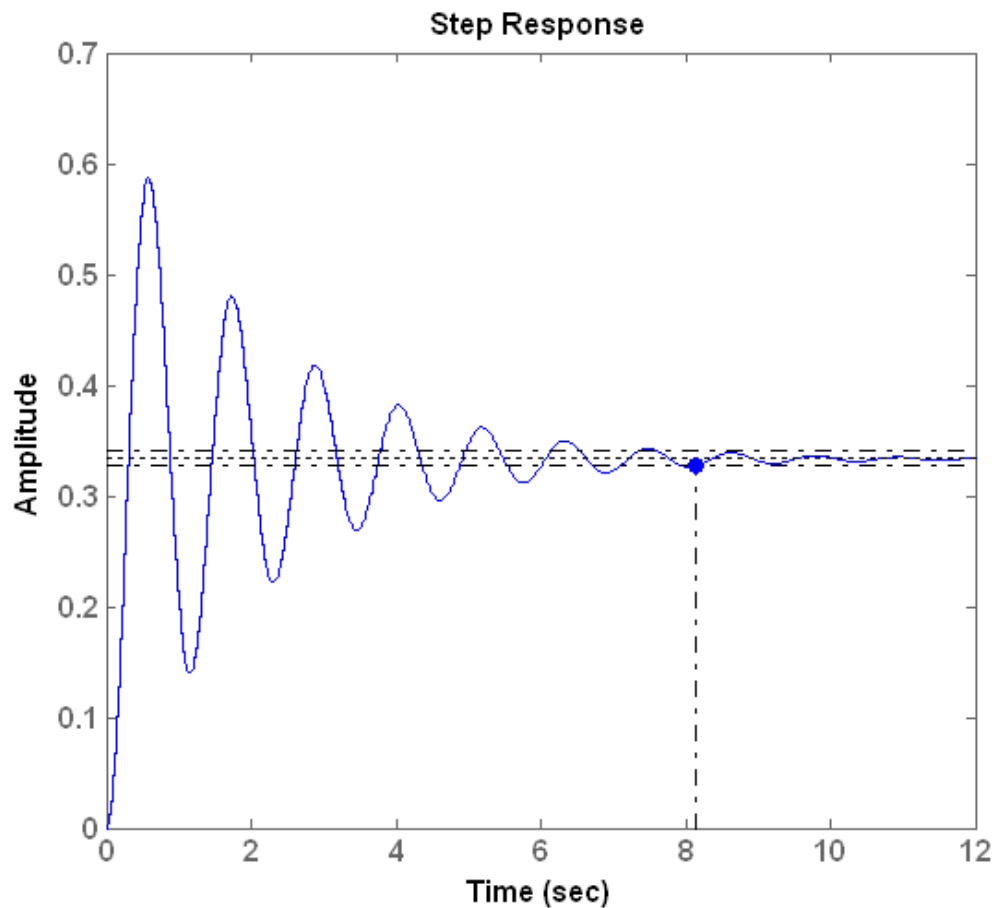


Рис. 8.2. Перехідна характеристика початкової замкнутої САУ

Функція `pidtool(Wzz)` підбирає регулятор для системи, при цьому достатньо задати передаточну характеристику розімкненої системи, а функція автоматично знайде замкнену передаточну характеристику замкнутої системи та зробить її стійкою, покращить ЛАХ. Приклад застосування цієї функції для даної передаточної характеристики  $Wz$  представлений на рис. 8.3.

```
>>pidtool(Wz)
```

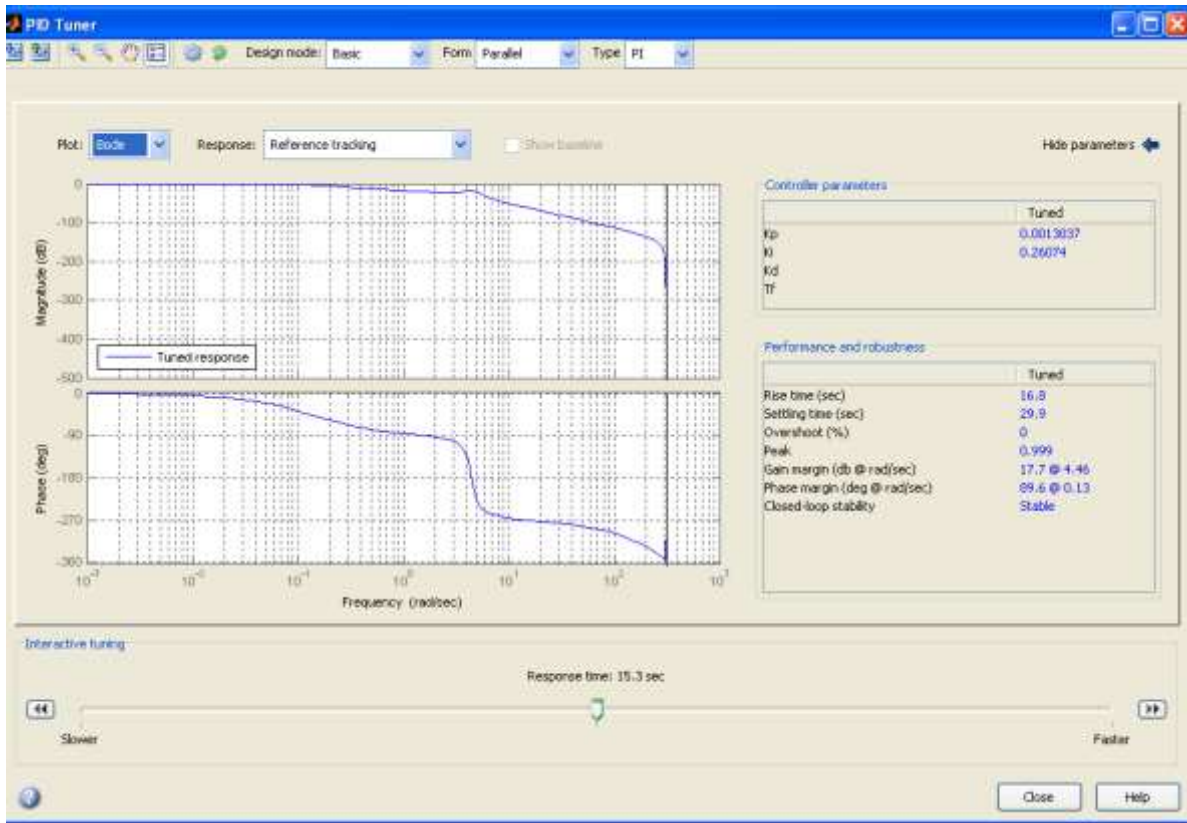


Рис.8.3

З рис.8.3 видно, що в даному випадку застосовується ПІ-регулятор з параметрами  $K_p = 0.0013037$ ,  $K_i = 0.26074$ . Запас по фазі складає  $89,6^\circ$ , запас по амплітуді  $-17,7\text{dB}$ , час встановлення  $t_e = 29,9$ , перерегулювання  $\sigma = 0\%$ , похибка сталого режиму відсутня, система стійка.

Функція `pidtune(Wzz, 'PID')` підбирає регулятор заданого типу, робить САУ стійкою та покращує її ЛАХ. Приклад застосування цієї функції для САУ з передаточною функцією `Wzz` представлений на рис. 8.4.

```
>>C=pidtune(Wz, 'PI')
Discrete-time PI controller in parallel form:
```

$$K_p + K_i * \frac{T_s}{z-1}$$

with  $K_p = 0.0013037$ ,  $K_i = 0.26074$ ,  $T_s = 0.01$

```
>> F=feedback(series(Wz,C),1,-1)
```

```
Transfer function:
6.496e-007 z^2 + 1.297e-006 z + 6.474e-007
-----
z^3 - 2.988 z^2 + 2.978 z - 0.99
```

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 46

```
Sampling time: 0.01
>> margin(F)
```

При застосуванні функції `pidtune` отримуємо запас по фазі 16,4 dB та запас по амплітуді -180°, що відрізняються від результатів функції `pidtool`. Графіки перехідного процесу навпаки співпадають. Розбіжності виникають через різні методи обчислення в самих функціях.

Таким чином, спрощений варіант синтезу регулятора полягає в підборі структури та параметрів регулятора, які повинні забезпечити визначені в технічному завданні на проектування показники динамічних властивостей проектуємої системи.

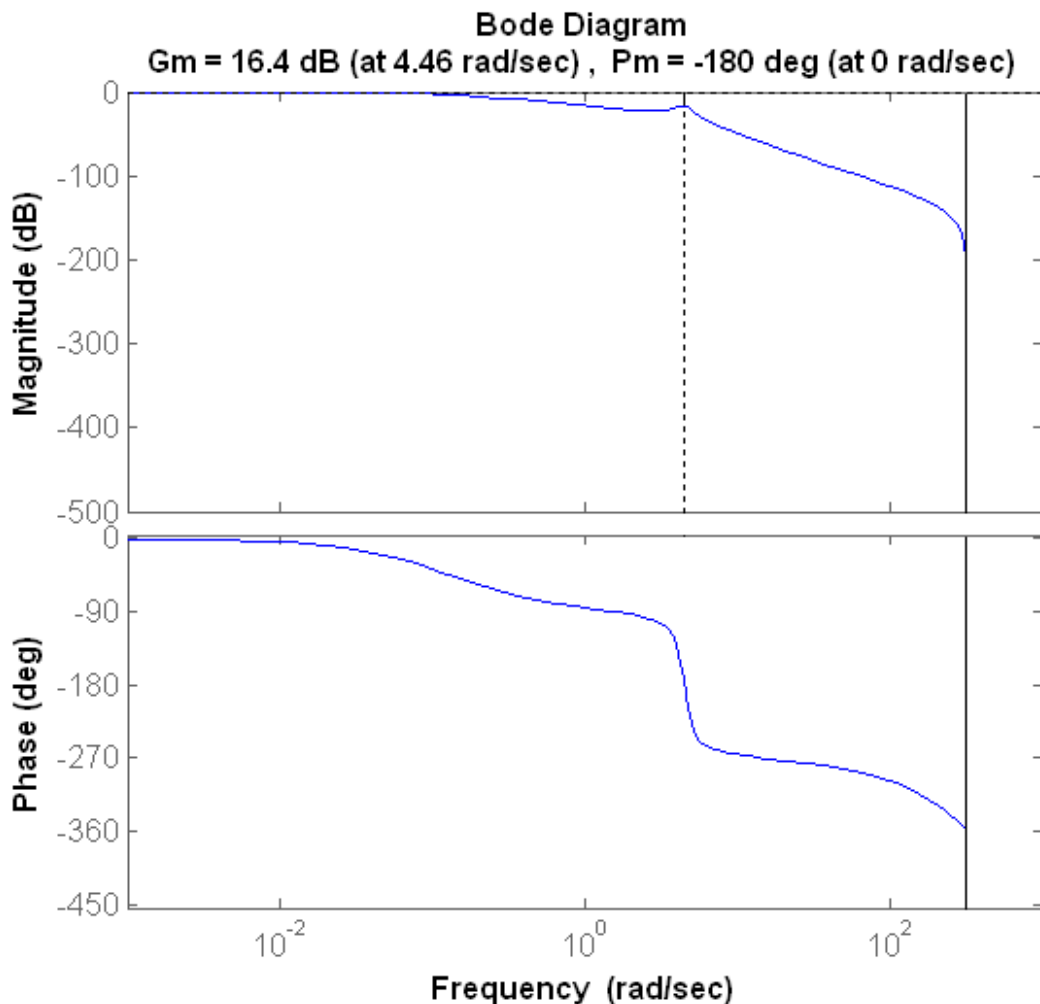


Рис.8.4. Логарифмічна-амплітудна характеристика пропорційно-інтегрального регулятора

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1-2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 47

## 2 Завдання для лабораторної роботи

2.1 Згідно свого варіанту обрати структурну схему системи автоматичного управління (додаток 1) та параметри цієї схеми (додаток 2).

2.3 Ввести передаточну функцію у вигляді полінома в пакет Control System Toolbox та отримати ЛАХ системи.

2.4 На основі отриманих графіків визначити смугу пропускання, запас по фазі, перерегулювання, час встановлення, стійкість системи.

2.5 Якщо система нестійка, то застосувати регулятор. Якщо стійка, то покращити ЛАХ (задачу синтезу регулятора вирішити графічним методом).

2.6 Для оцінки отриманих параметрів регулятора виконати моделювання цифрової системи і отримати перехідну характеристику замкненої системи

2.7 Порівняйте отримані графіки ЛАХ системи з регулятором та без регулятора.

## 3 Зміст звіту

3.1 Назва та мета роботи.

3.2 Структурна схема системи автоматичного управління згідно свого завдання.

3.3 Результат моделювання в пакеті Control System Toolbox та графік отриманої ЛАХ системи без регулятора.

3.4 Результат моделювання в пакеті Control System Toolbox та графік отриманої ЛАХ системи з регулятором.

3.6 Розрахунок смуги пропускання, запасу по фазі, перерегулювання, часу встановлення, визначення стійкості системи.

3.7 Аналіз графіків ЛАХ системи автоматичного управління, покращених за допомогою регулятора.

3.8 Висновки по роботі.

## 4 Контрольні питання

4.1 Який вплив кожного з елементів регулятора на якість перехідних процесів?

4.2 Що собою являють частотні характеристики цифрових систем?

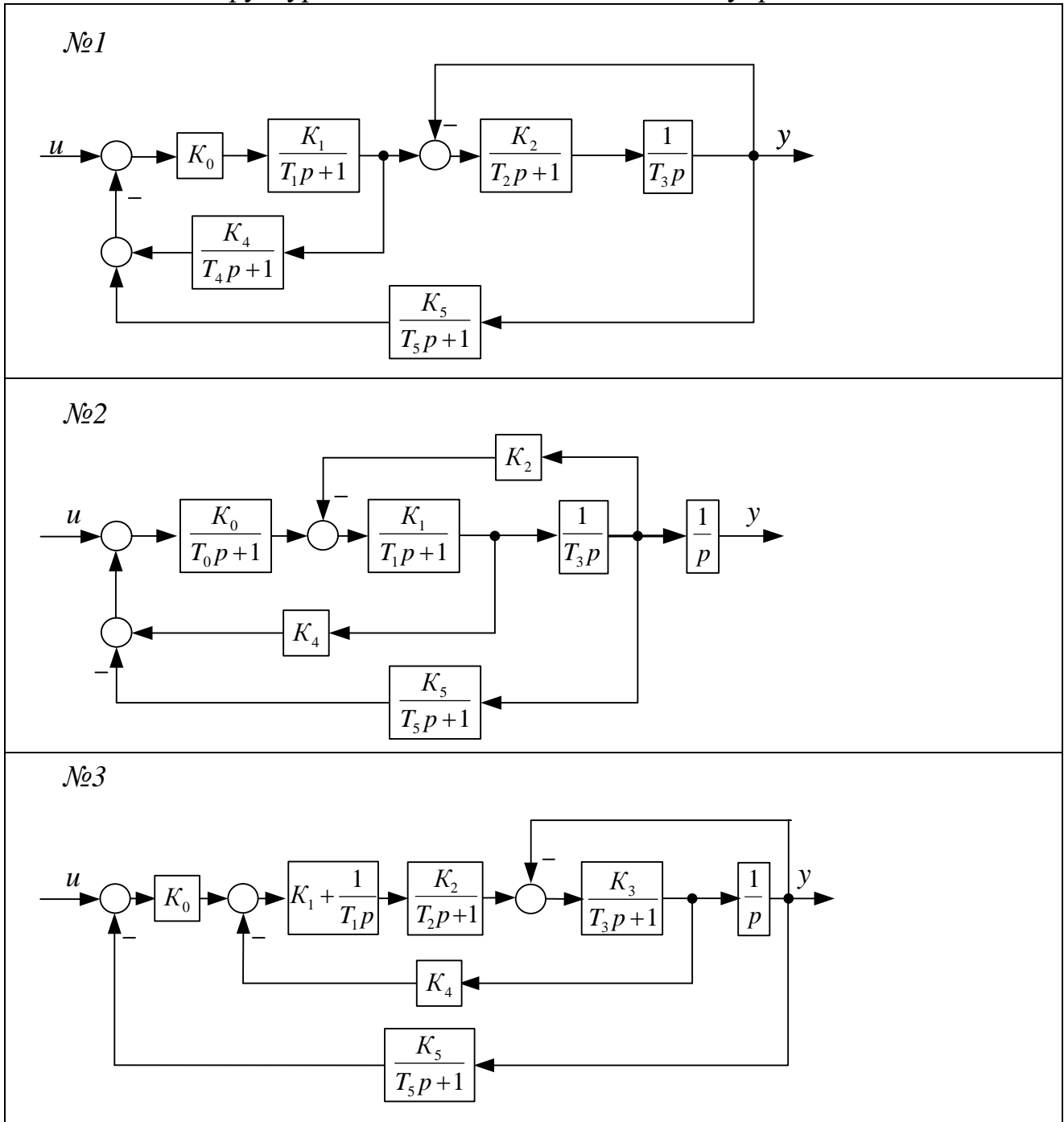
4.3 Дайте визначення кожної з частотних характеристик цифрових систем.

4.4 Як застосувати регулятор для покращення частотних характеристик за допомогою пакету програм Matlab?

4.5 Як застосувати регулятор в програмі Matlab для покращення частотних характеристик САУ?

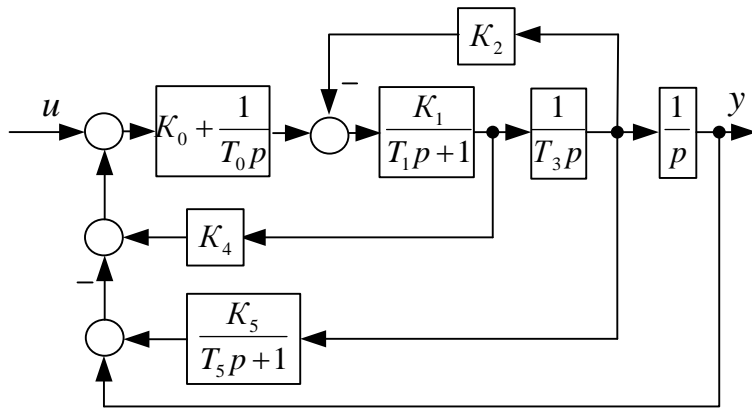
## Додаток 1

### Структурні схеми систем автоматичного управління

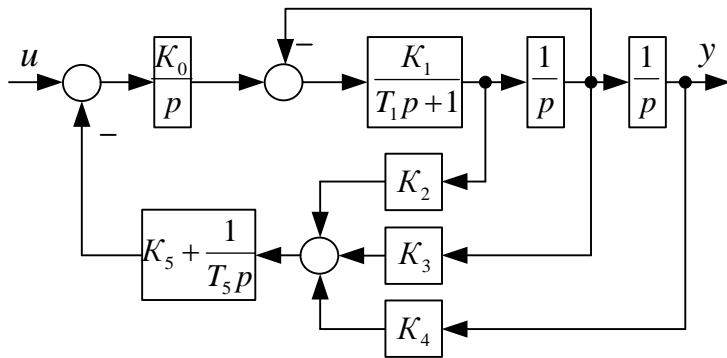




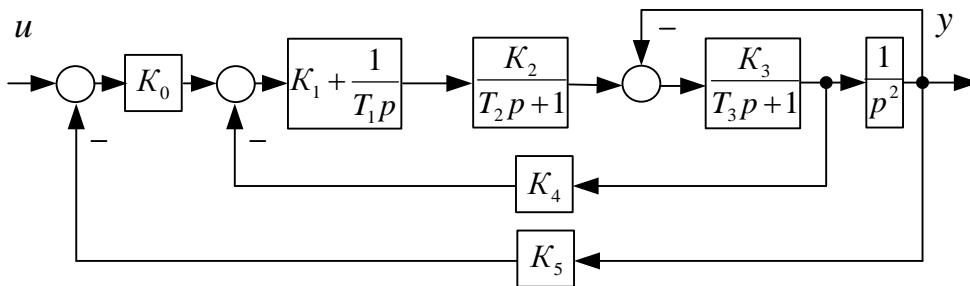
№4



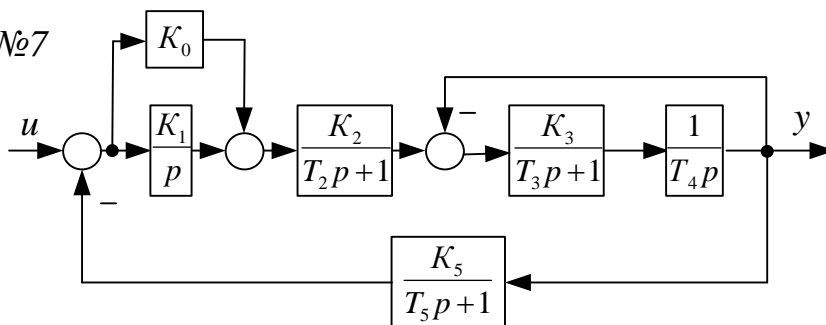
№5



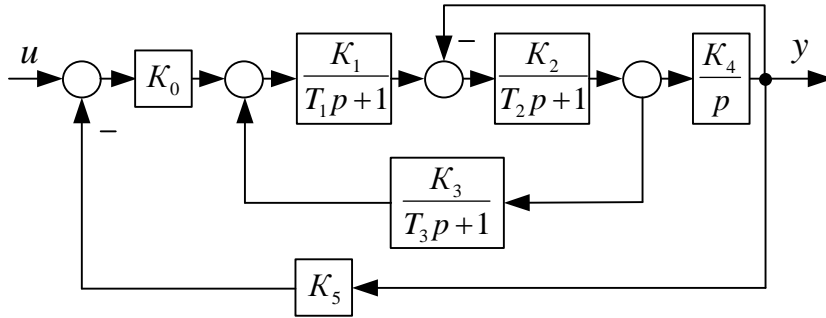
№6



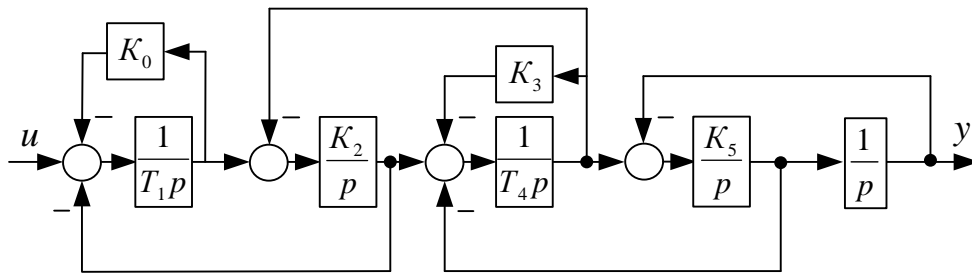
№7



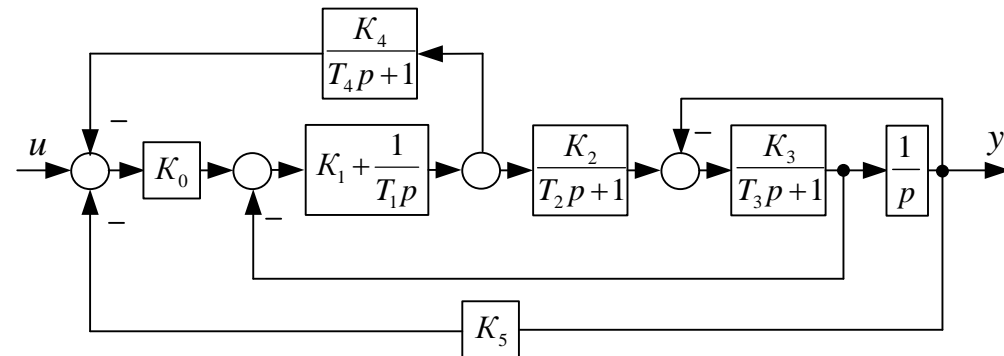
№8



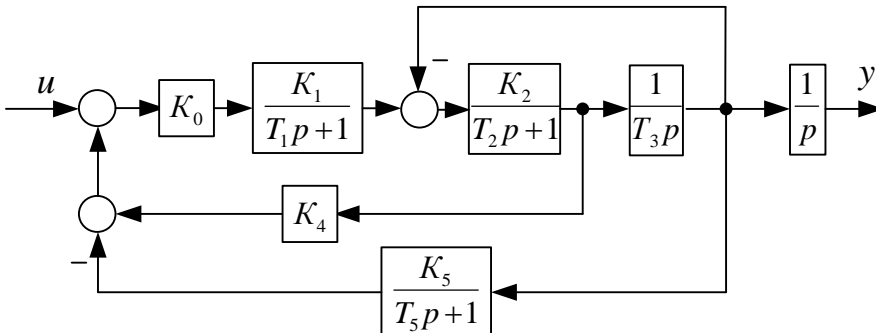
№9



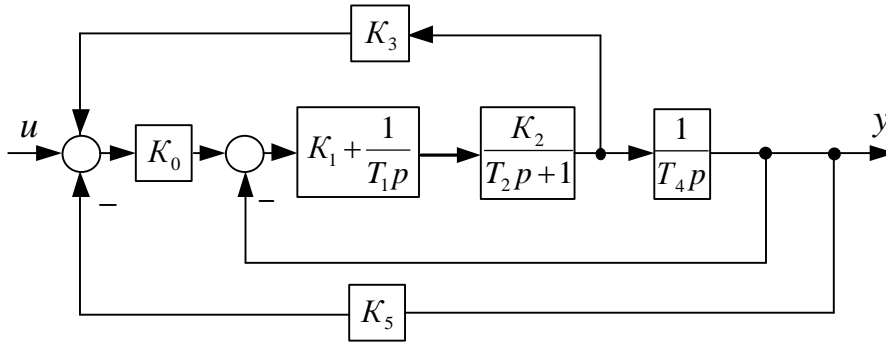
№10



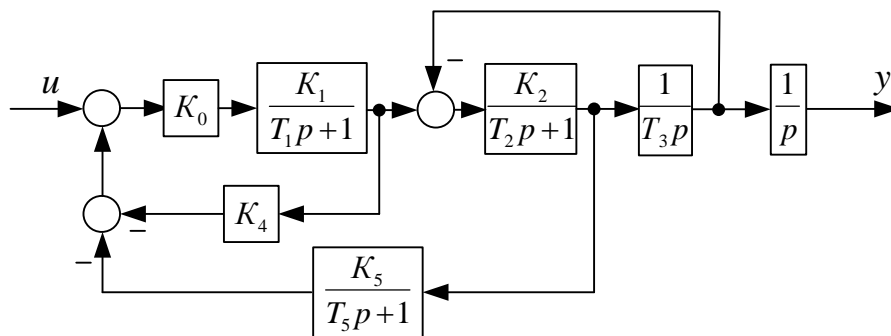
№11



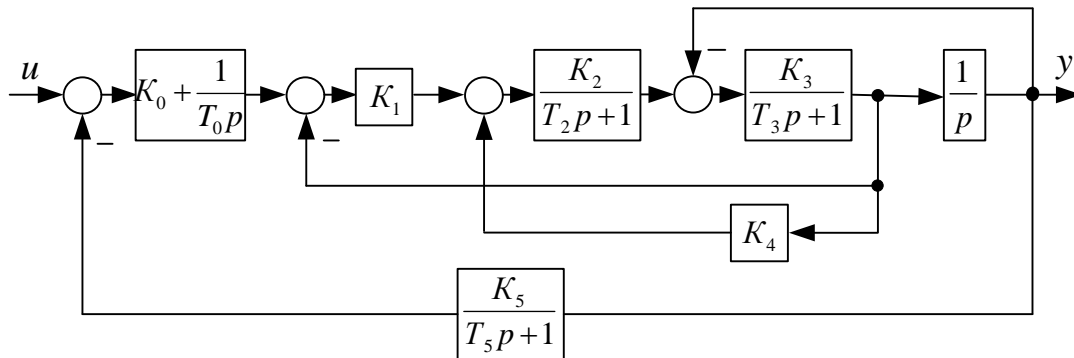
№12



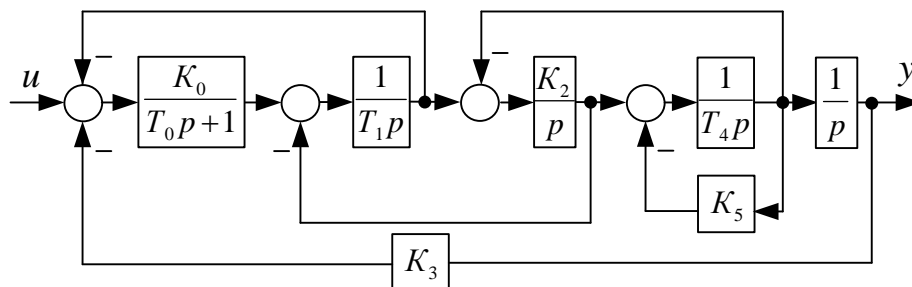
№13



№14



№15



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 117 / 52

## Додаток 2

### Параметри структурної схеми САУ

Варі- ант	№ схе- ми	Параметри ланок структурної схеми											
		K <sub>0</sub>	T <sub>0</sub>	K <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	T <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	T <sub>5</sub>
1	15	7.3	0.2	-	0.2	4.0	-	0.5	-	-	0.2	0.7	-

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015										Ф-20-09 05.02/2/152.00.1Б/ВК2.1- 2022	
	Екземпляр № 1										Арк 117 / 53	

2	13	5.0	-	1.0	0.2	4.1	0.8	-	0.3	0.2	-	0.1	0.2
3	11	0.4	-	0.4	1.0	2.2	0.6	-	2.3	0.1	-	2.0	0.1
4	9	0.5	-	-	0.4	2.5	-	1.5	-	-	0.5	5.7	-
5	7	1.4	-	1.0	-	8.7	0.1	0.7	0.2	-	2.5	0.5	0.1
6	5	0.3	-	7.7	0.3	3.6	-	1.5	-	8.1	-	9.0	0.8
7	3	4.8	-	2.5	0.1	0.5	0.2	0.6	0.1	1.5	-	1.5	0.2
8	1	10	-	7.1	0.5	5.0	0.1	-	2.0	0.5	0.2	0.3	0.1
9	2	2.1	0.5	1.5	0.3	0.8	-	1.0	1.0	0.1	-	0.5	0.1
10	4	3.8	0.2	7.7	1.3	70	-	-	0.4	1.2	-	2.0	0.3
11	6	0.1	-	9.5	0.2	2.5	0.5	0.8	0.3	0.1	-	0.3	-
12	8	1.2	0.1	9.5	0.5	1.0	0.1	0.5	0.1	2	-	0.1	-
13	10	2.7	-	3.5	1.0	2.7	1.3	4.8	0.7	0.3	1.5	0.5	-
14	12	5.2	-	0.7	1.0	5.3	0.7	0.1	-	-	2.5	0.1	-
15	14	1.1	3.0	0.9	-	3.5	0.2	1.2	0.7	0.1	-	3.6	0.1
16	15	2.1	0.3	-	0.6	8.5	-	1.7	-	-	0.4	0.1	-
17	13	2.7	-	1.5	1.7	8.3	2.9	-	0.7	0.5	-	0.2	0.1
18	11	0.7	-	0.3	0.4	1.6	1.2	-	0.4	0.2	-	2.6	0.1
19	9	0.2	-	-	0.6	7.5	-	0.6	-	-	0.8	0.9	-
20	7	7.5	-	1.0	-	3.2	0.2	9.5	0.1	-	0.5	8.2	0.2
21	5	0.1	-	2.1	0.5	5.1	-	7.5	-	3.9	-	5.0	0.6
22	3	1.8	-	8.5	0.5	1.5	0.3	0.5	0.5	5.0	-	9.5	0.1
23	1	2.1	-	5.0	0.2	10	0.3	-	0.5	3.0	0.8	0.1	0.5
24	2	0.5	0.8	0.7	0.1	1.5	-	1.0	0.2	0.5	-	8.5	0.1
25	4	12	0.1	0.1	0.5	100	-	-	0.5	0.1	-	4.6	0.1
26	6	0.2	-	7.5	0.1	2.5	0.1	5.0	0.7	0.2	-	0.2	-
27	8	6.9	0.3	4.1	0.7	7.3	0.2	3.8	0.5	3.3	-	0.2	-
28	10	2.5	-	2.9	1.0	9.5	1.4	9.5	0.4	0.1	0.2	1.0	-
29	12	0.2	-	0.2	1.0	5.3	0.2	0.2	-	-	1.1	0.1	-
30	14	2.8	2.0	1.8	-	7.5	0.6	7.2	0.2	0.2	-	3.6	0.1