

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

**М. Я. Хлопенко, Н. М. Бровинська,  
Д. Ю. Шарейко**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт з курсу**

**"ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ"**

*У двох частинах*

**Частина 1**

**АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ**

Миколаїв 2006

УДК 681.5

**Хлопенко М.Я., Бровинська Н.М., Шарейко Д.Ю.** Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія автоматичного керування". Ч.1. Аналіз і синтез лінійних систем. – Миколаїв: НУК, 2006. – 88 с.

*Кафедра автоматики*

Вказівки охоплюють першу частину курсу "Теорія автоматичного керування", яка присвячена аналізу і синтезу лінійних систем автоматичного керування. Усі лабораторні роботи виконуються із застосуванням обчислювальної техніки та пакета програм MATLAB. Наведено опис основних засобів MATLAB для розв'язання завдань з курсу "Теорія автоматичного керування", теоретична частина та методика проведення чисельних експериментів.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальностей 8.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод", 8.092201 "Електричні системи і комплекси транспортних засобів", 7.160101 "Захист інформації з обмеженим доступом і автоматизація її обробки в комп'ютерних системах і мережах", 8.090604 "Техніка і електрофізика високих напруг" та 8.090803 "Електронні системи" усіх форм навчання.

*Рецензент* д-р техн. наук, проф. В.С. Блінцов

## **ВИМОГИ ДО ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ**

Лабораторні роботи проводяться на ПЕОМ у комп'ютерному класі кафедри. Під час перебування у класі кожен студент зобов'язаний дотримуватися правил техніки безпеки, які викладені в "Інструкції з техніки безпеки в комп'ютерному класі", і правил пожежної безпеки, що також зафіксовані в спеціальній інструкції. Допуск до лабораторного практикуму здійснюється тільки після вивчення зазначених інструкцій і підпису у відповідному журналі. Студенту забороняється працювати з будь-якими програмами, що не належать до теми лабораторної роботи.

### **Лабораторна робота № 1. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ПАКЕТОМ ПРОГРАМ MATLAB**

**Мета роботи** – набуття навичок роботи з пакетом програм MATLAB.

**Зміст роботи:** 1) вивчення складу пакета програм MATLAB та інструкцій до пакету; 2) моделювання найпростішої системи автоматичного керування.

#### **Основні теоретичні відомості**

MATLAB – це високопродуктивна мова для технічних розрахунків. Вона містить у собі обчислення, візуалізацію і програмування у зручному вигляді, де задачі й розв'язки виражаються у формі, близькій до математичної. Типовим використанням MATLAB є математичні обчислення; створення алгоритмів; моделювання; аналіз даних, дослідження і візуалізація; наукова й інженерна графіка; розробка додатків, зокрема створення графічного інтерфейсу.

*Simulink*, супутня MATLAB програма, – це інтерактивна система для моделювання динамічних систем. Вона являє собою середовище, кероване мишею, що дозволяє моделювати процес переміщення блоків на екрані та їх маніпуляцією. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатомірними системами.

Основними для розробки моделей у Simulink є бібліотеки блоків, з яких складаються структурні схеми систем. Розрахунок перехідних процесів може бути виконаний за допомогою відповідних операцій Simulink-меню або у програмному режимі, використовуючи функції пакета MATLAB.

У середовищі пакета MATLAB можливо не тільки моделювати систему за її структурною схемою, але й отримати математичний опис моделі у різних формах, виконати аналіз її властивостей у часовій та частотній областях, синтезувати елементи системи керування, виконати оптимізацію. MATLAB та Simulink максимально відкриті для розширення та адаптації.

Simulink можна завантажити з командного рядка пакета MATLAB однойменною командою (маленькими буквами): `>>` – запрошення MATLAB до вводу команди. При цьому на екрані відкривається вікно з піктограмами бібліотек блоків Simulink (рис. 1.1).

Параметри блоків можуть бути константами, змінними, функціями та виразами, які запускаються в MATLAB. Будь-які змінні, від яких залежить параметр, повинні бути визначені в робочій зоні до початку процесу моделювання, інакше Simulink сигналізує про помилку в цьому блоці.

Simulink містить такі бібліотеки блоків:

Sources – джерела вхідних сигналів;

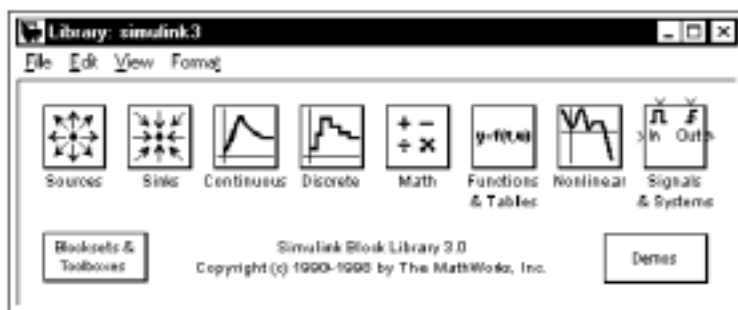


Рис. 1.1. Вікно бібліотечних блоків Simulink

Sinks – вихідні блоки (запам'ятовування та реєстрація вихідних сигналів);

Discrete – дискретні блоки;

Continuous – лінійні динамічні блоки;

Nonlinear – нелінійні блоки;

Math – математичні блоки та функції;

Functions & Tables – функції і таблиці;

Signals & Systems – сигнали і системи.

Кожну бібліотеку можна розкрити подвійним натисканням на ліву кнопку миші. При цьому відкривається вікно з піктограмами її блоків.

Розглянемо деякі бібліотеки Simulink, блоки яких будуть необхідні для моделювання систем.

Бібліотека *Sources* (рис. 1.2) містить джерела вхідних сигналів, тобто блоки, які не мають виходів, а мають тільки входи. Наприклад, у ланці Constant можна задавати значення фіксованого сигналу, що діє протягом часу розрахунку (10 с за замовчуванням). У ланці Step можна задавати стрибкоподібну зміну вхідного сигналу між двома постійними рівнями в заданий момент часу. Є також набір ланок з різними видами сигналів (синусоїда, прямокутний та пилоподібний імпульси, шум).

Бібліотека *Sinks* (рис. 1.3) включає блоки, які використо-

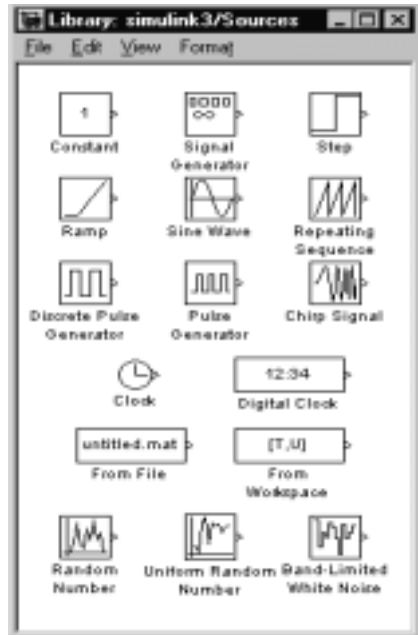


Рис. 1.2. Вікно бібліотеки *Sources*

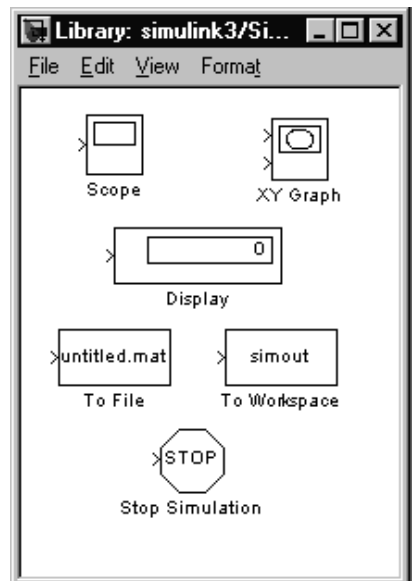


Рис. 1.3. Вікно бібліотеки *Sinks*

вуються для запам'ятовування результатів моделювання (To File, To Workspace) та для їх графічного відображення (Scope, XY Graph). Блок Stop Simulation зупиняє процес моделювання.

Усі перелічені блоки не мають виходів.

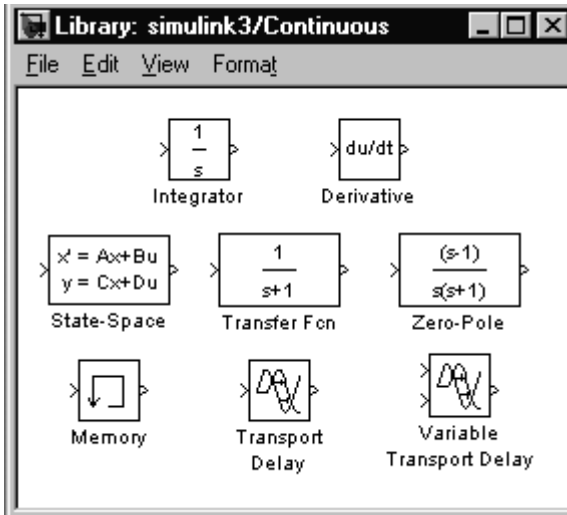


Рис. 1.4. Вікно бібліотеки *Continuous*

Бібліотека *Continuous* (рис. 1.4) містить лінійні безперервні ланки, такі, як інтегруюча (Integrator), диференціальна (Derivative), передаточна функція, за допомогою якої моделюється аперіодична ланка (Transfer Fcn). Можна також одержати коливальну ланку. При цьому варто діяти в такий спосіб: викликавши аперіодичну ланку, заходимо в її блок параметрів (двічі натиснувши на ланку), де в пункті Denominator резервуємо місце під ще один елемент, утворивши тим самим коливальну ланку (рис. 1.5). Таким чином можна реалізувати ланку з будь-якою передаточною функцією за умови, що порядок полінома чисельника буде менший за порядок полінома знаменника.

Можна реалізувати ланку з будь-якою передаточною функцією за умови, що порядок полінома чисельника буде менший за порядок полінома знаменника.

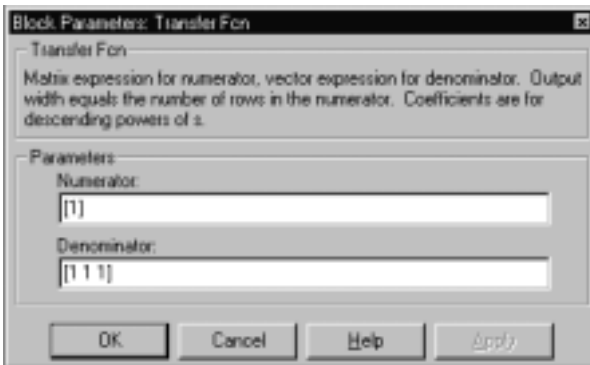


Рис. 1.5. Блок параметрів коливальної ланки

Перед початком формування структурної схеми необхідно відкрити для неї вікно (Simulink → File → New). При цьому відкривається вікно із заголовком "Untitled". Після запису у файл (File → Save / Save As) як заголовок вікна буде фігурувати ім'я файлу, що за замовчуванням одержить розширення **m**.

Уже існуючу модель можна завантажити із меню Simulink (File → Open), із меню MATLAB (File → Run M-File) та з командного рядка MATLAB введенням у неї імені файлу, в якому збережена модель, без розширення за аналогією із завантаженням файлу Simulink.m.

Копіювання блоків із бібліотек чи з будь-якої вже існуючої моделі у вікно створеного файлу після їхнього відкриття виконується мишею за допомогою операції "drag" (тягти при натиснутій лівій клавіші миші). Аналогічно здійснюється переміщення блоків усередині вікна. Копіювання блоків усередині вікна виконується за допомогою операції "drag right" (тягти при натиснутій правій клавіші миші). При цьому до імені нового блоку додається цифра, яка відображає порядковий номер копіювання всередині даного вікна, чим забезпечується унікальність імені кожного блоку, що належить даній моделі. Перемістити блок у межах одного вікна без ліній зв'язку (витягти блок із моделі) можна операцією < Shift > + drag.

Зв'язки встановлюються між вхідними та вихідними портами блоків. Стрілка на лінії зв'язку показує напрямок потоку даних. Зв'язки встановлюються таким чином: довільно безперервно ("drag" від порту з перериванням цієї операції в місцях зламу); автоматично ("drag right"). Усі лінії проводяться під кутом 45°. Провести лінію під довільним кутом можна при натиснутій клавіші Shift. При проведенні ліній зв'язку не треба намагатися потрапити точно в порт; лінія приєднується до порту, якщо Ви відпустите клавішу миші під час перебування графічного курсору в середині блоку або в безпосередній близькості від порту.

Якщо операцію редагування необхідно виконати для фрагменту структурної схеми, то його слід заздалегідь виділити. З виділеними групами блоків та/або зв'язками можна виконувати ті ж операції, що і з одиничними блоками та/або зв'язками.

### **Порядок виконання роботи**

1. Вивчити інструкцію до роботи з пакетом MATLAB.
2. Виконати моделювання системи, структурна схема якої наведена на рис. 1.6 (зворотний зв'язок – від'ємний), прийнявши при цьому  $X_{\text{вх}}(t) = 1(t)$ . Коефіцієнт  $k$  задається викладачем.

3. Вийти з пакету MATLAB. Роботу закінчено.

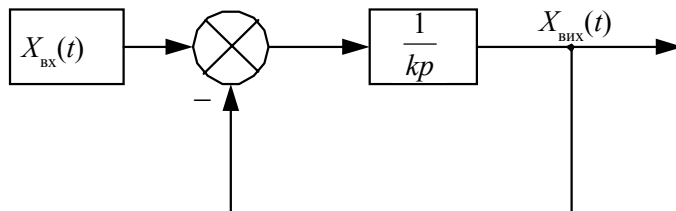


Рис. 1.6. Структурна схема системи

### Обробка результатів. Оформлення звіту

1. Назва і мета роботи.
2. Структурна схема (див. рис. 1.6), графік  $X_{\text{вих}}(t) = f[X_{\text{вх}}(t)]$ .

### Контрольні питання та завдання

1. З якою метою застосовується пакет програм MATLAB?
2. Як здійснити запуск пакета програм MATLAB?
3. З якими видами блоків ви зустрічалися у пакеті MATLAB?
4. Перерахуйте основні та допоміжні меню пакета програм MATLAB.
5. Які особливості має моделювання системи?

## Лабораторна робота № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВИХ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК

**Мета роботи** – дослідження характеристик типових динамічних ланок у пакеті програм MATLAB.

**Зміст роботи:** 1) вивчення теоретичних відомостей про типові впливи та типові динамічні ланки; 2) моделювання типових динамічних ланок.

### Основні теоретичні відомості

*Типи впливів.* Поведінка системи автоматичного керування (САК) багато в чому залежить від величини та характеру впливу на систему. Таких впливів (сигналів) існує дуже багато, наприклад аналогові, дискретні сигнали. Причому закон їх зміни може бути відомий раніше (детерміновані сигнали) або вони можуть розглядатися як випадкові функції часу (випадкові сигнали). Однак, розглядаючи конкретні умови



роботи САК, можна вибрати такий вплив, який для даної системи є найбільш типовим. Обравши його і вивчивши викликаний ним перехідний процес, можна зробити висновок про динамічні властивості системи.

При аналізі та синтезі САК використовують кілька типових (тестових) сигналів: одиничний ступінчатий вплив, одиничний імпульс, гармонічний вплив. Ці впливи використовують також при вивченні властивостей та характеристик типових динамічних ланок, з яких складається будь-яка лінійна безперервна автоматична система.

Варто зазначити, що будь-який сигнал  $x(t)$ , який має складну форму, можна розкласти на суму типових впливів та дослідити реакцію лінійної системи на кожен складову, а потім, використовуючи принцип суперпозиції, одержати результуючу зміну вихідної величини  $y(t)$ , підсумувавши одержані таким чином складові вихідного сигналу  $y_i(t)$ .

*Типові ланки.* Динаміка більшості функціональних елементів САК незалежно від виконання може бути описана однаковими по формі диференціальними рівняннями, не більш ніж другого порядку. Такі елементи мають назву типових динамічних ланок. Передаточні функції типових ланок перелічені в табл. 2.1. Тому будь-яку складну передаточну функцію лінеаризованої САК можна представити як добуток передаточних функцій типових ланок. Кожній такій ланці реальної САК, як правило, відповідає окремий вузол. Якщо знати якості окремих ланок, можна робити висновок про динаміку САК в цілому.

**Таблиця 2.1. Вихідні дані для дослідження**

Передаточна функція типової ланки	$k$	$T$	$\xi$
$k$	10...100		
$ks$	0,1...10	–	–
$k/s$	0,1...10		
$Ts + 1$		0,1...10	
$T^2s^2 + 2\xi Ts + 1$		0,1...1,0	0,3; 0,5; 1,0
$k/(Ts + 1)$	10...100	0,1...10	
$k/(T^2s^2 + 2\xi Ts + 1)$	10...100	0,1...10	0,3; 0,5; 1,0

*Одиничний ступінчастий вплив* має вигляд одиничного стрибка (рис. 2.1). Його називають також одиничною функцією  $I(t)$ , яка набуває таких значень:

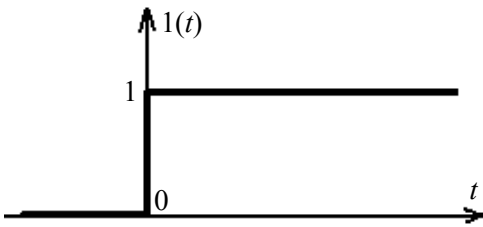


Рис. 2.1. Одиничний ступінчастий вплив

$$\begin{cases} 1(t) = 0 & \text{при } t < 0, \\ 1(t) = 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Реакція системи на одиничний ступінчастий вплив при нульових початкових умовах називається *перехідною функцією*  $h(t)$  системи, тобто перехідна функція – це процес на виході системи при

одиничному ступінчастому впливі на її вході. Графік цієї функції називається *перехідною характеристикою*.

За допомогою цієї характеристики можна судити про стійкість системи, її швидкодію та інші властивості системи.

Якщо відоме диференціальне рівняння, що описує динамічні властивості САК, то перехідну функцію  $h(t)$  можна отримати, розв'язавши це рівняння при нульових початкових умовах і прийнявши  $x_{\text{вх}}(t) = 1(t)$ . Якщо відома передаточна функція системи, то перехідна функція – це зворотне перетворення Лапласа від добутку передаточної функції системи на зображення одиничного входного впливу.

*Одиничний імпульс* ( $\delta$ -функція) являє собою дуже вузький імпульс, що обмежує одиничну площу (рис. 2.2). Тобто  $\delta$ -функція задовольняє умовам:

$$\delta(t) = \infty \quad \text{при } t = 0,$$

$$\delta(t) = 0 \quad \text{при } t \neq 0;$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1.$$

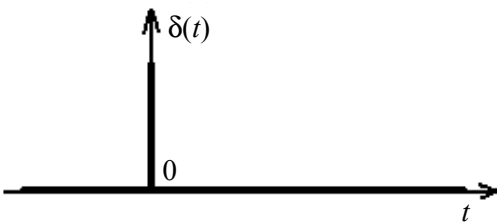


Рис. 2.2. Вплив у вигляді  $\delta$ -функції

За вплив одиничного імпульсу може бути прийнято вплив імпульсу безмежно великої амплітуди і безмежно малої довжини у порівнянні з очікуваним часом перехідного процесу.

Реакція системи на одиничний імпульсний вплив при нульових початкових умовах називається *імпульсною перехідною функцією*  $w(t)$  системи. Її називають також ваговою функцією. Графік цієї функції називається *імпульсною перехідною характеристикою*.

Перехідна та імпульсна перехідна характеристики називаються *часовими характеристиками* системи. Між ними існує зв'язок:

$$\frac{dh(t)}{dt} = w(t).$$

Аналогічно пов'язані між собою одинична функція та одиничний імпульс:

$$\frac{d \cdot 1(t)}{dt} = \delta(t).$$

Ступінчастому впливу  $1(t)$  приділяють особливу увагу в теорії автоматичного керування. Усі інші впливи можуть бути зведені до нього. Так, наприклад, реальний імпульсний сигнал може бути представлено двома ступінчастими сигналами однакової величини, але протилежними за знаком, поданими один за одним через інтервал часу  $\Delta t$ .

Про динамічні властивості системи або ланок можна зробити висновок також з частотних характеристик. *Частотні характеристики* динамічних ланок визначаються при типовому впливі у вигляді гармонічної функції:

$$X(t) = A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1), \quad (2.1)$$

де  $A_1$  – амплітуда коливань;  $\omega$  – кругова частота;  $\varphi_1$  – фазове зміщення.

Якщо до входу типової ланки чи лінійної стійкої системи докласти вплив типу (2.1) заданої (певної) частоти, то на виході виникає реакція на цей вплив, що представляє собою також гармонічне коливання тієї ж частоти, але з іншою амплітудою  $A_2$  та зміщене по фазі  $\varphi_2$ :

$$Y(t) = A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2).$$

Періодичний вхідний вплив може бути зображений у вигляді функції:

$$X(j\omega) = A_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)}.$$

Аналогічно записується вихідна функція:

$$Y(j\omega) = A_2 e^{j(\omega t + \varphi_2)}.$$

Відношення цих функцій є частотною передаточною функцією ланки чи системи:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}.$$

Частотну передаточну функцію  $W(j\omega)$  називають *комплексною передаточною функцією* (КПФ) від змінної  $\omega$ . Її, як і будь-яке комплексне число, можна також записати в алгебраїчній та показниковій формі:

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

де  $U(\omega) = \operatorname{Re}\{W(j\omega)\}$  – дійсна частина КПФ;  $V(\omega) = \operatorname{Im}\{W(j\omega)\}$  – уявна частина КПФ;  $A(\omega) = |W(j\omega)|$ , що визначається як модуль КПФ, – є *амплітудна частотна функція*. У цьому випадку

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)},$$

графік цієї функції називають *амплітудною частотною характеристикою* (АЧХ),  $\varphi(\omega) = \operatorname{Arg}\{W(j\omega)\}$  – аргумент КПФ, який називають *фазовою частотною функцією*,

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)},$$

графік цієї функції називається *фазовою частотною характеристикою* (ФЧХ).

Для кожного фіксованого значення частоти  $\omega$  функція  $A(\omega)$  представляє відношення амплітуд вихідної та вхідної величин, а функція  $\varphi(\omega)$  – зміщення фаз між вихідною та вхідною величинами.

Комплексну передаточну функцію  $W(j\omega)$  називають також *амплітудно-фазовою частотною функцією*, а її графік на комплексній площині – *амплітудно-фазовою частотною характеристикою* (АФЧХ).

Графічно на комплексній площині в полярних координатах ( $A$ ,  $\varphi$ ) амплітудно-фазова частотна характеристика відображується як

годограф функції  $W(j\omega)$ . Для конкретної частоти він визначається вектором  $OC$ , довжина якого дорівнює  $A(\omega)$ , а аргумент (кут між вектором та дійсною позитивною піввіссю) дорівнює  $\varphi(\omega)$ .

Крива, що описує кінець вектора  $W(j\omega)$  при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , називається *амплітудно-фазовою частотною характеристикою* (рис. 2.3).

Окрім перелічених частотних характеристик (АФЧХ, АЧХ, ФЧХ), при аналізі та синтезі системи автоматичного керування широко застосовуються також *логарифмічні частотні характеристики* (ЛЧХ): ЛАЧХ – логарифмічна амплітудна

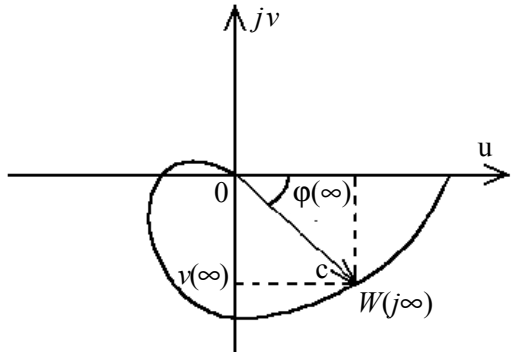


Рис. 2.3. Амплітудно-фазова частотна характеристика

ЛФЧХ – логарифмічна фазова частотна характеристика.

ЛЧХ – частотні характеристики системи, побудовані в логарифмічному масштабі:

по осі абсцис відкладають частоту в логарифмічному масштабі: на поділці, що відповідає значенню  $\lg(\omega)$ , пишуть значення  $\omega$ . Рівномірною одиницею виміру на осі абсцис служить *декада* – будь-який інтервал, на якому значення частоти змінюється в десять разів;

по осі ординат ЛАЧХ значення  $A(\omega)$  відкладають в одиницях децибел (дБ), а по осі ординат ЛФЧХ значення  $\varphi(\omega)$  – в градусах.

*Логарифмічною амплітудною частотною характеристикою* динамічної системи називають АЧХ цієї системи, виражену в децибелах та побудовану в логарифмічному масштабі частот. ЛАЧХ та АЧХ зв'язані співвідношенням

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|.$$

*Логарифмічною фазовою частотною характеристикою* системи називають залежність фази  $\varphi$ , вираженої в градусах чи радіанах, від частоти в логарифмічному масштабі.

Системи координат, в яких будуються ЛАЧХ та ЛФЧХ, показані на рис. 2.4.

ЛЧХ мають переваги перед звичайними АЧХ та ФЧХ: вони більш наочні та прості в побудові.

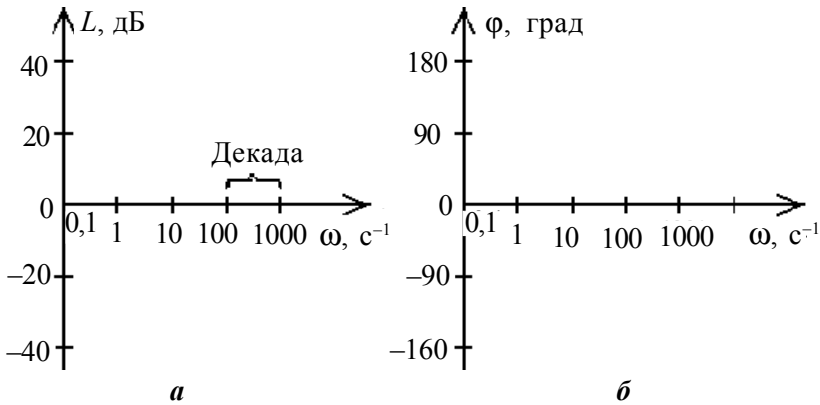


Рис. 2.4. Системи координат логарифмічних частотних характеристик:  
*a* – ЛАЧХ; *б* – ЛФЧХ

### Побудова характеристик з використанням пакета програм MATLAB

Побудова *перехідних характеристик* з використанням пакета програм MATLAB можлива декількома методами: аналітичний метод побудови перехідної характеристики з використанням функції зворотного перетворення Лапласа; побудова перехідних та частотних характеристик за допомогою функцій тулбоксу Control System; побудова перехідної характеристики шляхом моделювання в Simulink.

Аналітичний метод побудови перехідної характеристики заснований на одержанні зворотного перетворення Лапласа від передаточної функції  $W(s)$ , помноженої на зображення вхідного впливу  $X(s)$ . Для побудови перехідної характеристики аналітичним методом використовується тулбокс Symbolic Math.

Перехідна характеристика САУ може бути побудована за допомогою Simulink. Для цього необхідно побудувати модель системи, до входу підключити блок одиничного стрибка Step, а до виходу – блок осцилографа Scope. При аналізі параметрів перехідного процесу необхідно враховувати, що за замовчуванням у блоці Step час стрибка становить 1 с, а не 0 с.

Побудова *частотних характеристик* у пакеті програм MATLAB

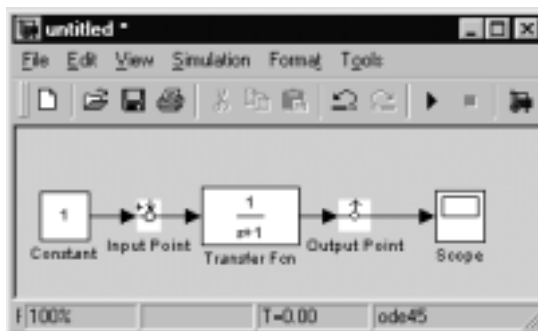
ведеться з використанням функцій тулбокcy Control System. Вихідними даними для побудови є опис системи, що застосовується у MATLAB.

Можливе перетворення структурної схеми в Simulink у модель Control System, тому що зображення схеми в Simulink є більш простим і наочним зображенням системи, порівняно з виглядом передатних функцій у тулбоксі Control System. У той же час тулбокc Control System надає широкі можливості аналізу систем автоматичного керування, тому часто виникає задача перетворення структурної схеми Simulink у модель Control System.

Розглянемо алгоритм перетворення схеми в Simulink у модель Control System. Спочатку створюється схема для моделювання (рис. 2.5, *a*), потім вона перетворюється на схему для аналізу. В меню Tools пакета Simulink потрібно вибрати команду Linear Analysis. У результаті з'являється вікно утиліти LTIView та бібліотека блоків Control System. До входу системи необхідно підключити вхідний порт



*a*



*b*

Рис. 2.5. Вікна моделей:

*a* – схема в Simulink; *b* – модель в Control System

(блок in), а до виходу – вихідний порт (блок out), рис. 2.5, б. У вікні утиліти LTIView в меню Simulink вибрати команду Get Linearized Model. У результаті у верхній частині вікна виводяться графіки характеристик системи (рис. 2.6). Конфігурація утиліти здійснюється через меню в заголовку вікна і меню, що виводиться на екран при натисканні правої кнопки миші.

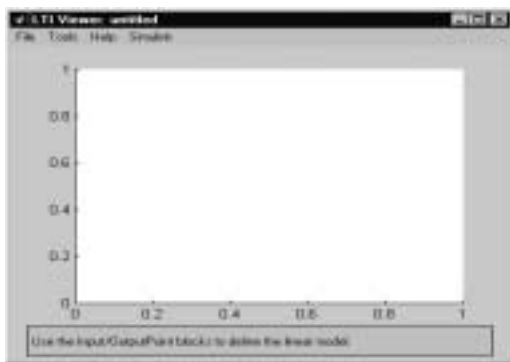


Рис. 2.6. Вікно для виводу графіків характеристик системи

Меню File містить команди роботи з моделями:

New Viewer... – відкриття нового вікна LTIView;

Import... – завантаження нової моделі в LTIView. На екран виводиться список моделей, доступних для завантаження. Модель, що завантажується, необхідно виділити і натиснути кнопку Apply, потім OK;

Export... – запис завантаженої моделі на диск чи експорт

порт у робочий простір MATLAB (Workspace);

Delete Systems... – видалення моделі з LTIView. На екран виводиться список моделей, доступних для видалення. Модель, що видаляється, необхідно виділити і натиснути кнопку Apply, потім OK;

Refresh Systems – оновити параметри моделей. Цей пункт меню необхідно виконувати щоразу після зміни параметрів моделі для активізації змін у LTIView;

Print... – друк графіків;

Print to figure... – друк в інше вікно. Після виконання цього пункту відкривається нове вікно, у яке передається графік. Потім можна внести необхідні написи до графіку;

Close Viewer – закрити вікно утиліти LTIView;

Меню Tools містить команди настроювання утиліти LTIView;

Viewer configuration – настроювання вікна перегляду графіків. При виконанні даної команди меню на екран виводиться вікно, в якому можна задати розбивку вікна перегляду LTIView на частини, а також задати характеристики, що виводяться в кожній частині вікна;

Response References – параметри висновку графіків;



Unestyte References – параметри ліній. У даному меню задається порядок проходження кольору, маркування і стилю лінії для виділення моделей, входів, виходів і зв'язків.

Побудова необхідної характеристики й аналіз параметрів графіка здійснюється в наступному порядку: для вибору характеристики необхідно встановити курсор у вікно LTView, натиснути праву кнопку миші. На екран виводиться меню, що містить наступні команди: Plot type – виведена характеристика; Systems – системи, для яких будуються характеристики; Characteristics – відображення параметрів графіка; Zoom – масштабування; Grid – виводити сітку на графік.

Розглянемо характеристики, які можна побудувати за допомогою утиліти LTView.

**Step – перехідна характеристика.** Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою мишки) зображені на рис. 2.7:

Peak Response – максимальне значення перехідного процесу;

Setting Time – час регулювання – інтервал часу, протягом якого перехідний процес входить в інтервал  $\pm\Delta$  % щодо сталого значення. Значення  $\Delta$  задається в меню Tools-Response Preferences-Calculate setting time for і за замовчуванням дорівнює 2 %;

Rise Time – час наростання – інтервал часу, протягом якого перехідний процес від значення  $p$ , %, перший раз досягає значення  $u$ , %, від сталого значення. Значення  $p$  та  $u$  задаються в меню Tools-Response Preferences-Calculate rise time from – to – і за замовчуванням дорівнюють 10 і 90 % відповідно;

Steady State – стале значення перехідного процесу. Числові значення параметрів графіка можна з'ясувати, вказавши курсором відповідну точку на графіку і натиснувши ліву кнопку миші. Для організації розмітки (сітки) графіка необхідно виконати команду Grid меню, що виводиться після натискання правою кнопкою миші.

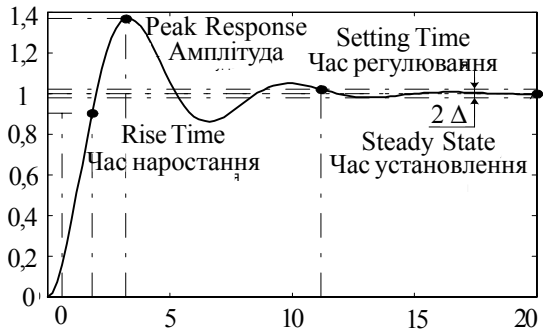


Рис. 2.7. Параметри перехідної характеристики

***Impulse – імпульсна характеристика.*** Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші):

Peak Response – максимальне значення імпульсної характеристики;

Setting Time – час установлення – інтервал часу, протягом якого закінчується перехідний процес.

***Bode – логарифмічна амплітудна і фазова частотні характеристики.*** Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші):

Gain/Phase Margin – запаси стійкості по амплітуді й фазі. Відображаються точки, в яких логарифмічна частотна характеристика дорівнює 0 дБ і/чи фазова характеристика дорівнює  $-180^\circ$ ;

Peak Response – максимальне значення логарифмічної частотної характеристики.

***Nyquist – амплітудно-фазова частотна характеристика*** (крива Найквіста). Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші): Gain/Phase Margin – запас стійкості.

***Nichols – діаграма Нікольса.*** По горизонтальній осі відкладається фаза в градусах, а по вертикальній – коефіцієнт передачі в дБ. Gain/Phase Margin – запас стійкості. Відображається точка, що характеризує запас стійкості.

***Singular Value – особливе значення.*** Будується логарифмічна амплітудно-частотна характеристика системи. Peak Response – максимальне значення логарифмічної частотної характеристики.

***Pole-zero Map – розташування нулів і полюсів.*** Координати нуля чи полюса можна довідатися, вказавши курсором відповідну точку на графіку і натиснувши ліву кнопку миші.

### **Порядок виконання роботи**

1. Запустити MATLAB.
2. Створити робоче вікно моделювання Simulink.
3. Створити структурні схеми для моделювання характеристик типових динамічних ланок: пропорційного, інтегруючого, аперіодичного першого порядку, коливального, вибравши їх параметри згідно з табл. 2.1.

4. Побудувати перехідні характеристики та встановити: а) сталі значення  $h(\infty)$ ; б) сталу часу  $T$ ; в) перерегулювання  $\sigma = (h_{\max} - h(\infty)) / h(\infty)$ .

5. Перетворити схеми в Simulink у модель Control System, використовуючи наведену вище послідовність.

6. Побудувати характеристики ланок АЧХ, ФЧХ, АФЧХ, ЛАЧХ у такій послідовності: а) побудувати ЛАЧХ та ЛФЧХ аналітично; б) побудувати ЛАЧХ та ЛФЧХ за допомогою MATLAB; в) порівняти результати; г) визначити запаси стійкості по амплітуді та фазі.

Дослідження виконати для різних значень  $k$ ,  $T$ ,  $\xi$  із табл. 2.1.

**Таблиця 2.1. Вихідні дані для дослідження**

Передаточна функція типової ланки	$k$	$T$	$\xi$
$k$	10...100		
$ks$	0,1...10	–	–
$k/s$	0,1...10		
$Ts + 1$		0,1...10	
$T^2s^2 + 2\xi Ts + 1$		0,1...1	0,3; 0,5; 1,0
$k/(Ts + 1)$	10...100	0,1...10	
$k/(T^2s^2 + 2\xi Ts + 1)$	10...100	0,1...10	0,3; 0,5; 1,0

### **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Назва і мета роботи.
2. Структурні схеми і характеристики ланок: перехідні, АЧХ, ФЧХ, АФЧХ, ЛАЧХ.
3. Висновки щодо впливу параметрів на властивості типових ланок.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Що називають типовими впливами, для чого вони потрібні?
2. Розкрийте поняття типових динамічних ланок.
3. Наведіть приклади технічних пристроїв або технологічних процесів, у математичний опис яких входять типові динамічні ланки.
4. Що таке перехідна характеристика динамічної ланки?
5. Що таке імпульсна перехідна характеристика динамічної ланки?
6. Що називають передаточними функціями типових ланок?
7. Як отримати частотні характеристики дослідним шляхом?
8. Як отримати частотні характеристики теоретичним шляхом, якщо відома передаточна функція ланки?
9. Охарактеризуйте типи частотних характеристик: а) поняття АЧХ

ланки; б) поняття ФЧХ ланки; в) поняття АФЧХ ланки; г) поняття логарифмічних характеристик ланки.

10. Як одержати вирази для частотних характеристик, якщо відома передаточна функція ланки?

### Лабораторна робота № 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ІЗ ЗАПІЗНЮВАННЯМ

**Мета роботи** – дослідження впливу ланки запізнювання на стійкість та якість системи автоматичного керування.

**Зміст роботи:** 1) вивчення впливу ланки запізнювання на характеристики системи автоматичного керування; 2) експериментальне одержання перехідних та частотних характеристик системи із запізнюванням.

#### Основні теоретичні відомості

До складу систем автоматичного керування можуть входити ланки запізнювання, рівняння яких мають вигляд

$$Y(t) = X(t - \tau),$$

де  $\tau$  – час запізнювання.

Передаточна функція такої ланки відповідно до теореми запізнювання (властивості перетворення за Лапласом):

$$W(s) = e^{-st}.$$

Системи автоматичного керування, до складу яких входить ланка запізнювання, називаються *системами із запізнюванням*. Ланка запізнювання може включатися до прямого ланцюга системи або до ланцюга зворотного зв'язку. Причому, незалежно від місця включення ланки запізнювання, характеристичне рівняння замкненої системи із запізнюванням має вигляд

$$D_{\tau}(s) = Q(s) + R(s) e^{-st} = 0,$$

де  $Q(s)$  і  $R(s)$  – відповідно поліноми знаменника і чисельника передаточної функції розімкнутої системи без запізнювання.

Це характеристичне рівняння не є поліномом і має безкінечну множину коренів. Тому для дослідження стійкості систем із запізнюванням необхідно використовувати критерії стійкості. Причому алгебраїчні

критерії Рауса і Гурвіца непридатні у їх звичайній формі. Для дослідження стійкості систем із запізнюванням зручно використовувати критерії Найквіста або Михайлова. Висновок про стійкість системи можна зробити на підставі аналізу АФЧХ розімкнутої системи із запізнюванням.

Наявність ланки запізнювання не змінює модуля  $A(\omega)$  АФЧХ розімкнутої САК, а вносить лише додатковий від'ємний фазовий зсув  $\omega\tau$ , пропорційний частоті. При цьому коефіцієнтом пропорційності є час запізнювання  $\tau$ .

Змінюючи час запізнювання  $\tau$  в широких межах, можна знайти таке його значення, при якому замкнута система буде знаходитися на межі стійкості  $\tau_{кр}$ . У цьому випадку АФЧХ розімкнутої системи із запізнюванням буде проходити через точку  $(-1; j0)$ .

Час запізнювання  $\tau_{кр}$  і відповідне йому значення частоти  $\omega_{кр}$ , при яких АФЧХ проходить через точку  $(-1; j0)$ , називають *критичними*. Для критичного випадку справедливі умови:

$$A(\omega_{кр}) = 1; \quad \varphi_{\tau}(\omega_{кр}) = -\pi.$$

Система автоматичного керування буде стійкою, якщо час запізнювання  $\tau$  менший за критичний:  $\tau < \tau_{кр}$ .

### Порядок виконання роботи

Дослідженню підлягає система автоматичного керування, до складу якої входить ланка запізнювання. Передаточна функція розімкнутої системи автоматичного керування без запізнювання має вигляд

$$W(s) = K/[s(T_1s + 1)(T_2s + 1)].$$

Значення коефіцієнта підсилення  $K$  та постійних часу  $T_1$  і  $T_2$  наведені в табл. 3.1.

**Таблиця 3.1. Завдання до лабораторної роботи**

Параметри	Номер варіанта					
	1	2	3	4	5	6
$K, c^{-1}$	5	10	20	10	15	5
$T_1, c$	0,5	0,1	0,05	0,05	0,04	0,1
$T_2, c$	0,01	0,05	0,01	0,2	0,1	0,02

1. За допомогою пакета MATLAB побудувати перехідну харак-

теристика  $h(t)$  замкненої системи з одиничним від'ємним зворотним зв'язком. Зробити висновок про стійкість системи.

2. Вести до прямого ланцюга системи ланку запізнення з часом запізнення в діапазоні  $\tau = 0,01 \dots 0,05$  с, побудувати перехідні характеристики системи із запізнюванням і зробити висновок, як дана ланка впливає на якість перехідного процесу.

3. Збільшуючи далі час запізнювання, простежити, як змінюється перехідна характеристика системи; добитися втрати стійкості системи (перехідний процес розбігається).

4. Визначити експериментально значення критичного часу запізнювання  $\tau_{кр}$ , при якому система буде знаходитись на межі стійкості (перехідний процес буде незатухаючим).

5. Визначити теоретично значення критичного часу запізнювання  $\tau_{кр}$ ; порівняти отримані результати.

6. Повторити пп. 2–5 для випадку, коли ланку запізнювання включено до ланцюга зворотного зв'язку. Зробити висновки.

7. Вийти з програми.

### **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Назва і мета роботи.

2. Структурна схема системи без запізнювання, її перехідна характеристика; висновок про стійкість системи.

3. Структурна схема системи з ланкою запізнювання в прямому ланцюзі; перехідні характеристики для кожного значення часу запізнювання  $\tau < \tau_{кр}$ ; встановлене експериментально та визначене теоретично значення критичного часу запізнювання  $\tau_{кр}$ .

4. Структурна схема системи з ланкою запізнювання в ланцюзі зворотного зв'язку; перехідні характеристики для кожного значення часу запізнювання  $\tau < \tau_{кр}$ ; встановлене експериментально та визначене теоретично значення критичного часу запізнювання  $\tau_{кр}$ .

5. Висновки.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Наведіть рівняння та передаточну функцію ланки запізнювання.

2. Наведіть приклади технічних пристроїв або технологічних процесів, у математичний опис яких входить ланка запізнювання.

3. За яким критерієм і як можна перевірити стійкість системи, яка містить ланку запізнювання?

4. Що таке критичний час запізнювання?
5. Як впливає на стійкість системи ланка запізнювання?
6. Як впливає ланка запізнювання на частотні характеристики системи?
7. Як визначається критичний час запізнювання за АФЧХ розімкнутої системи?

## Лабораторна робота № 4. ПЕРЕДАТОЧНІ ФУНКЦІЇ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

**Мета роботи** – дослідження й вивчення властивостей і характеристик систем автоматичного керування.

**Зміст роботи:** 1) знаходження різних передаточних функцій системи; 2) дослідження частотних характеристик системи; 3) дослідження перехідних характеристик системи.

### Основні теоретичні відомості

Системи автоматичного керування, як правило, є замкнутими. Однак при їхньому проектуванні часто попередньо розглядається розімкнутий ланцюг ланок, що потім замикається.

Замкнута система отримується за допомогою одиничного від'ємного зворотного зв'язку (рис. 4.1) і складається з ланцюга ланок будь-якої складності, зображеного на схемі одним прямокутником з передаточною функцією  $W(s)$ . На схемі позначено:  $g(t)$  – вплив, що задає;  $f(t)$  – вплив, що збудує,  $x(t)$  – вихідний сигнал системи.

Передаточна функція розімкнутого ланцюга  $W(s) = X(s)/E(s)$  задана

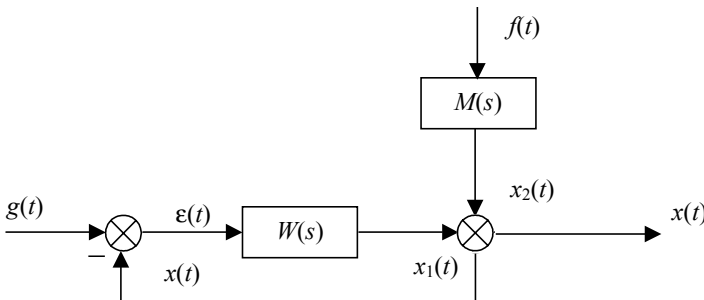


Рис. 4.1. Замкнена система автоматичного керування

у вигляді відносини багаточленів з одиничними коефіцієнтами при молодших членах, тобто  $W(s) = \frac{KN(s)}{L(s)}$ , де  $K$  – коефіцієнт підсилення розімкнутого ланцюга.

Передаючі функції замкнутої системи записуються окремо для кожної комбінації входу й виходу, отже, і для кожного зовнішнього впливу окремо.

Основні співвідношення для наведеної схеми

$$E(s) = G(s) - X(s), \quad X = W(s)E + M(s)F,$$

де  $E, G, X, F$  – зображення (по Лапласу) помилки, впливу, що задає, сигналу на виході системи й впливу, що збурює, відповідно.

У розрахунках автоматичних систем застосовують три основні види передаючих функцій:

1. Передаюча функція замкнутої системи *по впливу, що задає* (при  $f(t) = 0$ ),  $\Phi(s) = \frac{X}{G}$ , при  $F = 0$  маємо  $X = W(s) \cdot (G - X)$ , звідки

$$\Phi(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)} = \frac{KN(s)}{L(s) + KN(s)}.$$

2. Передаюча функція замкнутої системи *по похибці* при  $f(t) = 0$

$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{E}{G}, \frac{E}{G} = \frac{G - X}{G} = 1 - \Phi(s)$ , звідки

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{L(s)}{L(s) + KW(s)}.$$

3. Передаюча функція замкнутої системи *по впливу, що збурює* (при  $g(t) = 0$ ),  $\Phi_f(s) = \frac{X}{F}$ , при  $G = 0$  маємо  $X = W(s)(-X) + M(s)F$ , звідки

$$\Phi_f(s) = \frac{M(s)}{1 + W(s)} = \frac{R(s)}{L(s) + KN(s)},$$

де  $R(s) = L(s) \cdot M(s)$ , причому багаточлен  $R(s)$  залежить від місця додатка впливу, що збурює.



Для замкнутої системи в цілому маємо

$$X = \Phi(s) \cdot G + \Phi_f(s) \cdot F = \frac{W(s)}{1+W(s)} G + \frac{M(s)}{1+W(s)} F,$$

$$\text{або } X = \frac{KN(s)}{L(s) + KN(s)} G + \frac{R(s)}{L(s) + KN(s)} F.$$

Якщо привести до загального знаменника й виконати зворотнє перетворення Лапласа, одержимо диференціальне рівняння замкнутої системи для регульованої величини  $x$  у вигляді  $[L(s) + KN(s)] \cdot x(t) = KN(s)g(t) + R(s) \cdot f(t)$ .

Диференціальне рівняння *замкнутої системи* записують також у вигляді  $D(p) \cdot x(t) = KN(s) \cdot g(t) + R(s) \cdot f(t)$ , де  $D(s) = L(s) + KN(s)$ .

Характеристичне рівняння замкнутої системи буде  $D(\lambda) = 0$  або  $L(\lambda) + KN(\lambda) = 0$ .

Диференціальне рівняння замкнутої системи *для похибки* має вигляд  $[L(s) + KN(s)] \cdot \varepsilon = L(s) \cdot g(t) - R(s) \cdot f(t)$ .

Відповідно до передаточної функції замкнутої системи можна записати формулу амплітудно-фазової частотної характеристики

замкнутої системи у вигляді  $\Phi(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1+W(j\omega)}$ , причому  $W(j\omega) =$

$= \frac{KN(j\omega)}{L(j\omega)}$  являє собою вираження амплітудно-фазової частот-

ної характеристики розімкнутого кола для даної системи.

Амплітудно-фазові частотні характеристики можна представити у вигляді  $W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ ,  $\Phi(j\omega) = A_3^{j\varphi_3(\omega)}$ , де  $A_3(\omega)$  і  $\varphi_3(\omega)$  – амплітудна й фазова частотні характеристики замкнутої системи відповідно.

Останні можна виразити через  $A(\omega)$  і  $\varphi(\omega)$  розімкнутої системи:

$$A_3(\omega) = \frac{A(\omega)}{\sqrt{A^2(\omega) + 2A(\omega) \cos \varphi(\omega) + 1}}; \quad \varphi_3(\omega) = \arctg \frac{A(\omega) \sin \varphi(\omega)}{A(\omega) + \cos \varphi(\omega)}$$

Існує й інше подання частотної характеристики замкнутої системи:

$$\Phi(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega),$$

де  $P(\omega)$  і  $Q(\omega)$  – дійсна й уявна частотні характеристики.

Якщо представити вихідну амплітудно-фазову частотну характеристику розімкнутого кола цієї системи у вигляді  $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ , знайдемо

$$P(\omega) = \frac{U(\omega)[1+U(\omega)]+V^2(\omega)}{[1+U(\omega)]^2+V^2(\omega)}; \quad Q(\omega) = \frac{V(\omega)}{[1+U(\omega)]^2+V^2(\omega)}.$$

Дійсну й уявну частотні характеристики замкнутої системи можна визначити й по заданих логарифмічних частотних характеристиках

$$\text{розімкнутого кола: } \Phi(j\omega) = \frac{A(\omega) \cdot [\cos \varphi(\omega) + j \sin \varphi(\omega)]}{1 + A(\omega) \cdot [\cos \varphi(\omega) + j \sin \varphi(\omega)]}$$

Виділяючи дійсну й уявну частини, знайдемо

$$P(\omega) = \frac{A(\omega) \cdot [A(\omega) + \cos \varphi(\omega)]}{A^2(\omega) + 2A(\omega) \cos \varphi(\omega) + 1};$$

$$Q(\omega) = \frac{A(\omega) \sin \varphi(\omega)}{A^2(\omega) + 2A(\omega) \cos \varphi(\omega) + 1}$$

### Порядок виконання роботи

1. Задано розімкнуту систему (рис. 4.2) з передаточною функцією  $W(s)$ . Вибравши з табл. 4.1 передаточну функцію розімкнутої системи й відповідні їй значення параметрів  $K, T, \xi$ , знайдіть:

- а) передаточну функцію  $\Phi(s)$  замкнутої системи; ввести її в ПЕОМ;
- б) передаточну функцію замкнутої системи для помилки  $\Phi_{\xi}(s)$ ;
- в) передаточну функцію замкнутої системи по впливу, що збурює,  $\Phi_f(s)$ .

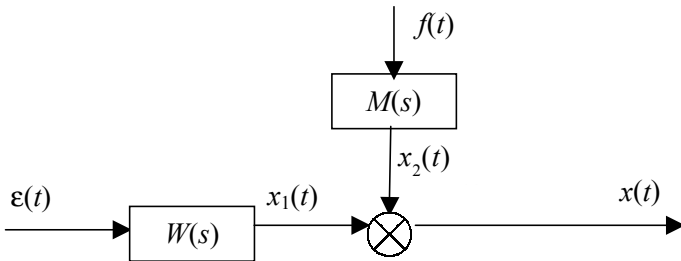


Рис. 4.2. Розімкнена система автоматичного управління

2. Дослідити частотні характеристики системи у наступній послідовності:

а) побудувати амплітудну й фазову частотні характеристики аналітично;

б) побудувати амплітудну й фазову частотні характеристики на ПЕОМ;

в) дослідити стійкість системи за допомогою ЛАЧХ і ЛФЧХ, визначити запаси стійкості по амплітуді й фазі;

г) записати диференціальне рівняння замкнутої системи, а також характеристичне рівняння замкнутої системи, визначивши його корінь. Зробити висновки щодо стійкості системи.

3. Дослідити стійкість системи за допомогою частотних критеріїв Михайлова й Найквіста, побудувавши на ПЕОМ годографи Михайлова й Найквіста.

4. Дослідити перехідний процес у системі. Для цього побудувати перехідну функцію системи  $h(t)$ , вагову функцію системи  $w(t)$  і визначити наступні параметри системи:  $x_{cr}$  – сталі значення  $x(t)$ ;  $x_{max}$  – максимальне значення  $x(t)$ ;  $\sigma$  – величину перерегулювання;  $t_n$  – тривалість перехідного процесу.

Усі дослідження (пп. 1–2) провести для різних значень  $K, T, \zeta$  згідно з табл. 4.1.

**Таблиця 4.1. Вихідні дані для дослідження**

Передаточна функція системи $W(s)$	$K$	$T_1$	$T_2$	$\zeta$
$\frac{K}{s(T_1s + 1)}$	10; 100	0,1; 1,5; 10	–	–
$\frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$	10; 100	0,1...1,0	0,05...0,1	–
$\frac{K}{s(T_1^2s^2 + 2\zeta T_1s + 1)}$	10; 100	0,1...1,0	–	0,3...1,0

### **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Види передаточних функцій  $W(s)$  і відповідні їм розрахункові  $\Phi(s), \Phi_\xi(s), \Phi_f(s)$  замкнутої системи.

2. Види частотних характеристик системи, графіки перехідних

процесів, побудовані аналітично й на ПЕОМ, годографи Михайлова й Найквіста.

3. Результати впливу параметрів на властивості системи.
4. Висновки.

## Лабораторна робота № 5. АНАЛІЗ ЛІНІЙНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА ПЕОМ

**Мета роботи** – набуття навичок аналізу лінійної автоматичної системи на ПЕОМ.

**Зміст роботи:** 1) дослідження часових характеристик системи з корегуючими пристроями; 2) дослідження частотних характеристик системи з корегуючими пристроями.

### Основні теоретичні відомості

Структурна схема типової лінійної системи автоматичного регулювання представлена на рис. 5.1. На рисунку позначена  $W_H(s)$  – передаточна функція незмінної частини системи, що описує динамічні властивості об'єкта керування й виконавчого двигуна;  $\Pi(s)$  – передаточна функція послідовного коригувального пристрою;  $Z(s)$  – передаточна функція паралельного коригувального пристрою;  $G(s)$  – зображення по Лапласу сигналу на вході системи;  $X(s)$  – зображення по Лапласу сигналу на виході системи;  $E(s)$  – зображення по Лапласу помилки системи;  $W_B(s)$  – передаточна функція, яка характеризує вплив сигналу, що збуджує;  $F(s)$  – зображення по Лапласу впливу, що збуджує;  $s$  – комплексна змінна перетворення Лапласа.

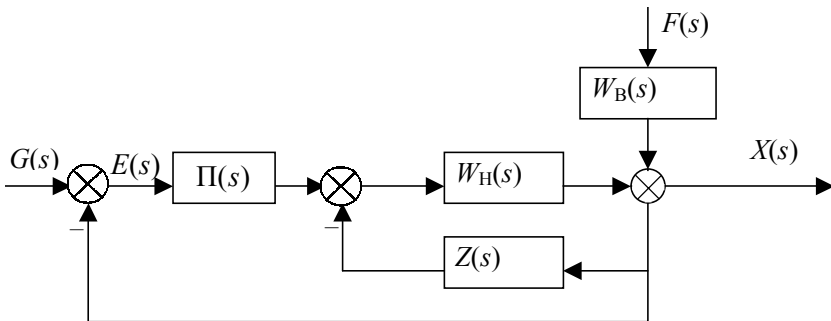


Рис. 5.1. Типова САК з коригувальними пристроями

Коригувальні пристрої  $\Pi(s)$  і  $Z(s)$  застосовуються для зміни властивостей незмінної частини системи з метою наближення їх до бажаних динамічних властивостей системи, обумовлених вимогами проектування.

У завданні визначається наступне:  $T$  – припустимий час перехідного процесу;  $\sigma$  – величина перерегулювання;  $m$  – число коливань до часу встановлення процесів у системі (ці три параметра визначаються при дослідженні реакції системи на одиничний ступінчастий вплив і характеризують динамічні властивості системи);  $E_{\text{пр}}$  – припустима максимальна помилка системи при ступінчастому, лінійному, параболічному й синусоїдальному впливах.

Помилка системи визначається за допомогою коефіцієнтів помилок:  $\varepsilon = C_0g + C_1\dot{g} + C_2\ddot{g} + \dots$ , де  $C_0, C_1, C_2$  – коефіцієнти похибок.

Передатні функції розімкнутої системи  $W(s)$ , замкнутої системи  $\Phi(s)$ , замкнутої системи відносно помилки  $\Phi_\varepsilon(s)$ , замкнутої системи по впливу, що збурює, та  $Y(s)$  визначаються по формулах:

$$W(s) = \Pi(s) \frac{W_H(s)}{1 + W_H(s)Z(s)} = \frac{X(s)}{E(s)}; \quad \Phi(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)} = \frac{X(s)}{G(s)};$$

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{E(s)}{G(s)}; \quad Y(s) = \frac{-W_H(s) \cdot [\Pi(s) - Z(s)W(s)]}{\Pi(s) \cdot (1 + W(s))} = \frac{E(s)}{F(s)}.$$

Динамічні властивості системи характеризуються:

$$\text{перехідною функцією } h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\Phi(s)}{s} \right\};$$

імпульсною перехідною функцією  $\omega(t) = L^{-1} \{ \Phi(s) \}$ , де  $L^{-1} \{ \dots \}$  – символ зворотного перетворення Лапласа.

У частотній області динамічні властивості системи визначаються частотними характеристиками. Частотну характеристику системи формально можна одержати заміною в передаточній функції змінної  $s$  на  $j\omega$  (де  $\omega, \text{с}^{-1}$ , – частота), як для типових ланок. Далі будується частотна характеристика розімкнутої системи  $W(j\omega)$ . Частотна характеристика системи будується або в осях  $\text{Re}W(j\omega)$ ,  $\text{Im}W(j\omega)$  при зміні  $\omega$  від 0 до  $\infty$  (у цьому випадку отримана крива називається годографом Найквіста),

або в осях  $20\lg(W(j\omega))$ ,  $\omega$  і  $\text{Arg}W(j\omega)$  – криві називаються логарифмічними амплітудною й фазовою характеристиками).

З логарифмічних частотних характеристиках, або годографу Найквіста, можна визначити, стійка система чи ні, а також величину запасів її стійкості. З частотної характеристики системи в діапазоні частот, що відповідає частоті вхідного впливу, можна знайти максимальне значення сталої помилки.

Коефіцієнти помилок можна обчислити, розкладаючи передаточну функцію по похибці у ряд:  $\Phi_\varepsilon(s) = C_0 + C_1s + C_2s^2 + \dots$ , розділивши багаточлен, що стоїть в чисельнику передаточної функції  $\Phi_\varepsilon(s)$ , на багаточлен, що стоїть в її знаменнику (записуючи їх у порядку зростання ступенів змінної  $s$ ).

### **Порядок виконання роботи**

1. Розрахувати на ПЕОМ передаточні функції розімкнутої та замкнутої систем, передаточні функції по похибці і збурюванню.

2. Побудувати годограф Найквіста системи й визначити запаси стійкості.

3. Побудувати логарифмічні амплітудну й фазову частотні характеристики розімкнутої й замкнутої систем. Визначити запаси стійкості системи. Визначити точність системи при впливі синусоїдального вхідного сигналу й сигналу з постійною швидкістю.

4. Визначити величину помилки при впливі постійного збурювання.

5. Побудувати перехідну й імпульсну перехідні функції системи. Визначити час перехідного процесу, величину перерегулювання, число коливань і величину сталого сигналу на виході.

6. Обчислити коефіцієнти помилок.

7. Дослідити зміну характеристик системи при варіації параметра, зазначеного викладачем.

### **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Розраховані передатні функції.

2. Частотні характеристики, перехідні й імпульсні перехідні функції, коефіцієнти помилок.

3. Результати аналізу системи при варіації параметра з короткими коментарями.

Завдання для розрахунку передаточних функцій досліджуваної системи (див. рис. 5.1)

$$\text{Завдання 1. } W_H = \frac{0,07}{s(0,12^2 s^2 + 0,8 \cdot 0,12s + 1)};$$

$$W_B = \frac{0,5 \cdot (0,01s + 1)}{s(0,12^2 s^2 + 0,8 \cdot 0,12s + 1)} \quad \Pi(s) = 3200; \quad Z(s) = \frac{40s^2(0,025s + 1)}{0,2s + 1}.$$

$$\text{Завдання 2. } W_H = \frac{0,07}{s(0,12^2 s^2 + 0,8 \cdot 0,12s + 1)};$$

$$W_B = \frac{0,5 \cdot (0,01s + 1)}{s(0,12^2 s^2 + 0,8 \cdot 0,12s + 1)};$$

$$\Pi(s) = 3200 \cdot \left(1 + \frac{2}{s}\right); \quad Z(s) = \frac{40s^2(0,025s + 1)}{0,2s + 1}.$$

$$\text{Завдання 3. } W_H(s) = \frac{0,4}{s(0,05^2 s^2 + 1,2 \cdot 0,05s + 1)};$$

$$W_B(s) = \frac{22 \cdot (0,01s + 1)}{s(0,05^2 s^2 + 1,2 \cdot 0,05s + 1)}, \quad \Pi(s) = 625;$$

$$Z(s) = \frac{6,9s^2(0,01s + 1)}{0,2s + 1}.$$

$$\text{Завдання 4. } W_H(s) = \frac{0,4}{s(0,05^2 s^2 + 1,2 \cdot 0,05s + 1)};$$

$$W_B(s) = \frac{22(0,01s + 1)}{s(0,05^2 s^2 + 1,2 \cdot 0,05s + 1)}; \quad \Pi(s) = 625 \cdot \left(1 + \frac{2}{s}\right);$$

$$Z(s) = \frac{6,9s^2(0,01s + 1)}{0,2s + 1}.$$

$$\text{Завдання 5. } W_H(s) = \frac{0,5}{s(0,3s + 1)(0,02s + 1)};$$

$$W_B(s) = \frac{5(0,01s+1)}{s(0,3s+1)(0,02s+1)}; \quad \Pi(s) = \frac{500(0,3s+1)}{0,03s+1},$$

$$Z(s) = \frac{5,06s^2(0,02s+1)}{0,03s+1}.$$

Завдання 6.  $W_H(s) = \frac{0,5}{s(0,3s+1)(0,02s+1)};$

$$W_H(s) = \frac{0,5(0,01s^2+1)}{s(0,3s+1)(0,02s+1)}; \quad \Pi(s) = \frac{500(0,3s+1)(s+2)}{s(0,03s+1)};$$

$$Z(s) = \frac{5,06s^2(0,02s+1)}{0,03s+1}.$$

Завдання 7.  $W_H(s) = \frac{0,5}{s(0,5^2s^2+0,5s+1)(0,05s^2+0,05s+1)};$

$$W_B(s) = \frac{10(0,01s+1)}{s(0,5^2s^2+0,5s+1)}; \quad \Pi(s) = 60, \quad Z(s) = \frac{180s^2(0,15s+1)}{0,6s+1}.$$

Завдання 8.  $W_H(s) = \frac{0,5}{s(0,5s^2+0,5s+1)(0,05^2s^2+0,05s+1)};$

$$W_B(s) = \frac{10(0,01s+1)}{s(0,5^2s^2+0,5s+1)}; \quad \Pi(s) = \frac{60(s+0,5)}{s};$$

$$Z(s) = \frac{180s^2(0,15s+1)}{0,6s+1}.$$

### **Лабораторна робота № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ ЛІНІЙНОЇ БЕЗПЕРЕРВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ НА ПЕОМ**

**Мета роботи** – дослідження та вивчення методів забезпечення стійкості, підвищення запасів стійкості лінійної безперервної системи.

**Зміст роботи:** 1) ознайомлення з основними методами забез-



печення стійкості та підвищення запасів стійкості лінійних безперервних систем; 2) експериментальне одержання перехідних та частотних характеристик лінійної системи для різних значень сталих часу однієї з ланок системи, а також для різних додаткових ланок у прямому ланцюзі системи.

### Основні теоретичні відомості

Способи надання системам автоматичного керування стійкості й достатніх запасів стійкості різноманітні. Основними з них є зміна сталої часу  $T$  однієї з ланок системи, а також введення в прямий ланцюг системи додаткової ланки.

Для першого способу діє таке правило: якщо спряжувальна частота аперіодичної або коливальної ланки розташована ліворуч від частоти зрізу логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) розімкнутої САК, а спряжувальна частота форсуючої ланки розташована праворуч від частоти зрізу, то збільшення сталої часу  $T$  кожної з цих ланок веде до збільшення запасів стійкості. Якщо спряжувальна частота аперіодичної або коливальної ланки розташована праворуч від частоти зрізу ЛАЧХ розімкнутої САК, а спряжувальна частота форсуючої ланки розташована ліворуч від частоти зрізу, то збільшення сталої часу  $T$  кожної з цих ланок веде до зменшення запасів стійкості.

Наведене правило діє тільки за умови, що спряжувальна частота розташована на відстані близько однієї декади від частоти зрізу. Крім того, існують деякі структури, для яких це правило не виконується.

Другий спосіб забезпечення стійкості – введення додаткової ланки в прямий ланцюг системи. Розглянемо основні випадки:

*введення в прямий ланцюг системи додаткової аперіодичної ланки з передаточною функцією*

$$W_d(s) = 1/(T_d s + 1), \quad (6.1)$$

де  $T_d$  – стала часу додаткової ланки, яка значно більша за постійні часу аперіодичних ланок, що входять у систему.

У такий спосіб можна підвищити запаси стійкості, при цьому високочастотна частина ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи зміщується вниз. Тому даний спосіб стабілізації системи називають стабілізацією з внесенням від'ємних фазових зсувів або стабілізацією з заглушенням високих частот.

Аперіодична ланка з великою постійною часу являє собою фільтр

низьких частот й заглушує високочастотні завади. У цьому полягають переваги даного способу; однак така ланка також значно зменшує частоту зрізу, а отже, й швидкодію системи. Це основна вада такого методу стабілізації системи;

*введення в прямий ланцюг додаткової форсуючої ланки з передаточною функцією*

$$W_d(s) = T_d s + 1, \quad (6.2)$$

де  $T_d$  – стала часу додаткової ланки, яку бажано прийняти рівною сталій часу однієї з аперіодичних ланок системи, спряжу вальна частота якої розташована ліворуч частоти зрізу.

Введення такої ланки зумовлює до підняття високочастотної частини ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи, тому цей спосіб називають стабілізацією з підняттям високих частот або стабілізацією з введенням додатних фазових зсувів.

Введенням форсуючої ланки можна забезпечити стійкість і необхідні запаси стійкості при будь-якій передаточній функції системи (якщо вона стає структурно стійкою). При цьому підвищується швидкодія системи, але значно підвищується й вплив високочастотних завод. Останнє суттєво обмежує використання такого способу стабілізації систем.

*введення в прямий ланцюг додаткової ланки із складною передаточною функцією*

$$W_d(s) = (T_{d2}s + 1)(T_{d3}s + 1) / (T_{d1}s + 1)(T_{d4}s + 1). \quad (6.3)$$

Стійкість системи та необхідні запаси стійкості досягнуті переміщенням вниз середньо-частотної частини ЛАЧХ, тому такий спосіб називають стабілізацією із заглушенням середніх частот. Він є проміжним між першими двома й об'єднує їх переваги, тому застосовується найчастіше для стабілізації лінійних безперервних САК.

Перелічені способи забезпечення стійкості є основними, але далеко не вичерпують усіх можливостей.

### **Порядок виконання роботи**

Дослідженню підлягає замкнена лінійна безперервна система автоматичного керування з одиничним від'ємним зв'язком, передаточна функція якої в розімкнутому стані має вигляд

$$W(s) = K / [(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)], \quad (6.4)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи;  $K = 20 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_1 = 0,5 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,025 \text{ с}$ ;  $T_3 = 0,01 \text{ с}$ .

1. Вивчити вплив зміни сталої часу аперіодичної, коливальної, форсуючої ланки системи на її стійкість. Зробити висновки.

2. Побудувати за допомогою пакета MATLAB або самостійно асимптотичну ЛАЧХ розімкнутої системи з передаточною функцією (6.4). Визначити частоту зрізу.

3. Виконати за допомогою пакета MATLAB моделювання замкненої системи, що підлягає дослідженню. Визначити час регулювання, запаси стійкості за фазою і амплітудою.

4. Підвищити значення сталої часу  $T_1$  з 0,5 до 1 с. Повторити. Зробити висновки.

5. Підвищити значення постійної часу  $T_3$  з 0,01 до 0,02 с. Повторити п. 3. Зробити висновки.

6. Прийняти для початкової системи:  $K = 100 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_1 = 0,05 \text{ с}$ ;  $T_2 = 0,01 \text{ с}$ ;  $T_3 = 0,001 \text{ с}$ . Виконати для таких умов п. 3.

7. Ввести до системи додаткову аперіодичну ланку з передаточною функцією (6.1), змінюючи  $T_d$  у діапазоні 3...10 с. Повторити п. 3 підрозд. "Порядок виконання роботи Лабораторної роботи № 4. Зробити висновки.

8. Ввести до початкової системи додаткову форсуючу ланку з передаточною функцією (6.2), змінюючи  $T_d$  у діапазоні 0,01...0,05 с. Повторити п. 4 підрозд. "Порядок виконання роботи лабораторної роботи № 4 Зробити висновки.

9. Ввести до початкової системи додаткову ланку з передаточною функцією (6.3), прийнявши  $T_{д1} = 0,1 \text{ с}$ ;  $T_{д2} = T_{д3} = 0,01 \text{ с}$ ;  $T_{д4} = 0,001 \text{ с}$ ;. Повторити п. 3 порядку виконання роботи лабораторної роботи № 4. Зробити висновки.

10. Вийти з програми.

## Обробка результатів. Оформлення звіту

1. Назва і мета роботи.

2. Структурна схема системи, яка підлягає дослідженню;

3. Передаточні функції  $W(s)$ , перехідні  $h(t)$  та частотні (ЛАЧХ і ЛФЧХ) характеристики для кожного пункту дослідження (для кожного пункту повинні бути визначені: час регулювання, запаси стійкості за фазою і амплітудою).

4. Висновки.

## Контрольні питання та завдання

1. Як визначаються запаси стійкості за фазою і амплітудою за АФЧХ розімкненої САК? За ЛАЧХ і ЛФЧХ? Якими вони повинні бути в добре спроектованій системі?
2. Як характеризується якість процесу керування САК? На які групи поділяються показники якості?
3. Якими показниками характеризується якість перехідного процесу в САК (прямі оцінки якості)?
4. Поясніть зв'язок частоти зрізу і часу регулювання?
5. Назвіть способи забезпечення стійкості й підвищення запасів стійкості?
6. Як впливає зміна сталої часу аперіодичної ланки на запаси стійкості системи?
7. Як впливає на стійкість системи введення додаткової аперіодичної ланки?
8. Як впливає на стійкість системи введення додаткової форсууючої ланки?
9. Як впливає на стійкість системи введення додаткової ланки із складною передаточною функцією?

## Лабораторна робота № 7. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

**Мета роботи** – дослідження та вивчення на ПЕОМ впливу від'ємних зворотних зв'язків на перехідні характеристики динамічних ланок систем автоматичного керування.

**Зміст роботи:** 1) ознайомлення з поняттями "зворотний зв'язок", "гнучкий зворотний зв'язок", "жорсткий зворотний зв'язок"; 2) підготовка структурних схем типових динамічних ланок, охоплених від'ємними зворотними зв'язками; 3) експериментальне одержання перехідних характеристик динамічних ланок, охоплених зворотними зв'язками.

### Основні теоретичні відомості

Однією з проблем, розв'язуваних теорією автоматичного керування, є проблема забезпечення необхідних властивостей лінійних САК. У тому випадку, коли стійкість системи і необхідна якість не

можуть бути досягнуті простою зміною параметрів самої САК, до неї включають коригуючий пристрій. Задачею цього пристрою є перетворення керуючого сигналу, в результаті якого забезпечується необхідний закон зміни керованої координати. Коригуючий пристрій включають у САК різними способами: у прямий ланцюг системи (послідовний коригуючий пристрій); паралельно одному з елементів прямого ланцюга САК (паралельний коригуючий пристрій); у ланцюг зворотного зв'язку, що охоплює один з елементів прямого ланцюга САУ (паралельно-зустрічний коригуючий пристрій).

В останньому випадку варто зазначити, що вплив зворотних зв'язків дуже різноманітний. Корегуючі зворотні зв'язки поділяються на жорсткі та гнучкі. Жорсткий зворотний зв'язок діє на систему як у перехідному, так і в сталому режимах, реалізується він пропорційною ланкою, тобто передатна функція ланки зворотного зв'язку  $W_0(s) = K_0$ .

Гнучкий зворотний зв'язок діє лише в перехідних режимах; він реалізується часто диференціальною ланкою з передаточною функцією  $W_0(s) = K_0 s$  чи інерційною диференціальною ланкою:  $W_0(s) = K_0 s / (T_0 s + 1)$ .

Припустимо, що ланка з передаточною функцією  $W(s)$  охоплена від'ємним зворотним зв'язком з передаточною функцією  $W_0(s)$ . Тоді еквівалентна передатна функція цієї ділянки ланцюга має вигляд

$$W_E(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)W_0(s)}.$$

Розглянемо найбільш характерні випадки.

а) Аперіодична ланка охоплена жорстким зворотним зв'язком, тобто

$$W(s) = K / (Ts + 1); \quad W_0(s) = K_{ob}. \quad (7.1)$$

У цьому випадку еквівалентна передаточна функція має вигляд

$$W_E(s) = \frac{K_E}{T_E s + 1}, \quad \text{де } K_E = \frac{K}{1 + K \cdot K_0}; \quad T_E = \frac{T}{1 + K \cdot K_0}. \quad (7.2)$$

Отже, жорсткий зворотний зв'язок не змінює структуру аперіодичної ланки, але змінює її інерційність, тому що впливає на сталу часту. Одночасно змінюється передатний коефіцієнт ланки.

б) Аперіодична ланка охоплена гнучким зворотним зв'язком, тобто

$$W(s) = K / (Ts + 1); \quad W_0(s) = K_0 s. \quad (7.3)$$

Тоді

$$W_E(s) = \frac{K}{T_E s + 1}, \text{ де } T_E = T + KK_0.$$

Отже, гнучкий від'ємний зворотний зв'язок не змінює структуру ланки і не впливає на передатний коефіцієнт аперіодичної ланки, але змінює її інерційність – її постійну часу.

в) Інтегруюча ланка охоплена жорстким зворотним зв'язком, тобто

$$W(s) = \frac{K}{s}; \quad W_0 = K_0. \quad (7.4)$$

Тоді

$$W_E(s) = \frac{K_E}{T_E s + 1},$$

де  $K_E = \frac{1}{K_0}; \quad T_E = \frac{1}{KK_0}.$

Жорсткий зворотний зв'язок перетворює інтегруючу ланку в аперіодичну.

г) Інтегруюча ланка охоплена гнучким зворотним зв'язком, тобто

$$W(s) = \frac{K}{s}; \quad W_0(s) = K_0 s.$$

Тоді

$$W_E(s) = \frac{K_E}{s},$$

де  $K_E = \frac{K}{1 + KK_0}.$

Гнучкий зворотний зв'язок не змінює структуру інтегруючої ланки, але змінює її передатний коефіцієнт.

д) Коливальна ланка охоплена жорстким зворотним зв'язком, тобто

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; \quad W_0(s) = K_0. \quad (7.5)$$

Тоді

$$W_E(s) = \frac{K_E}{T_E^2 s^2 + 2\xi_E T_E s + 1}$$

$$\text{де } K_E = \frac{K}{1 + KK_0}; T_E = \frac{T}{\sqrt{1 + KK_0}}; \xi_E = \frac{\xi}{\sqrt{1 + KK_0}}.$$

Жорсткий зворотний зв'язок не змінює структуру коливальної ланки, але змінює постійну часу, передатний коефіцієнт ланки і коефіцієнт демпфірування.

е) Коливальна ланка охоплена гнучким зворотним зв'язком, тобто

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; W_0(s) = K_0 s, \quad (7.6)$$

можливі два варіанти:

зворотний зв'язок слабкий, тобто  $K_0 < 2T(1 - \xi)/K$ , тоді

$$W_E(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi_E Ts + 1}; \xi_E = \xi + \frac{KK_0}{2T},$$

тобто структура ланки не міняється, тільки змінюється її коефіцієнт демпфування;

зворотний зв'язок сильний, тобто  $K_0 > 2T(1 - \xi)/K$ ; тоді

$$W(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}; T_{1,2} = 0,5(r \pm \sqrt{r^2 - 4T^2}); r = 2\xi T + KK_0.$$

Сильний зворотний зв'язок перетворює коливальну ланку в аперіодичну другого порядку.

З розглянутих прикладів можна зробити висновок про те, що навіть найпростіші від'ємні зворотні зв'язки можуть істотно змінити властивості динамічних ланок в системах керування, що може бути використано при проектуванні автоматичних систем.

### Порядок виконання роботи

1. Запустити програму MATLAB.
2. Скласти структурну схему інтегруючої ланки, задавши числове

значення коефіцієнта передачі відповідно до варіанта (табл. 7.1). Зняти перехідну характеристику ланки.

3. Скласти структурну схему інтегруючої ланки, охопленої жорстким зворотним зв'язком (значення коефіцієнта  $K_0$  прийняти за табл. 7.1). Зняти перехідну характеристику.

4. Скласти структурну схему інтегруючої ланки, охопленої гнучким зворотним зв'язком. Зняти перехідну характеристику.

5. Виконати аналогічні дослідження для аперіодичної і коливальної ланок, причому при дослідженні впливу гнучкого зворотного зв'язку на властивості коливальної ланки зняти дві перехідні характеристики для двох значень коефіцієнта  $K_0$  ( $K_{01}$  і  $K_{02}$ ), що відповідає слабкому і сильному від'ємному зворотному зв'язку.

6. Вийти з програми MATLAB.

**Таблиця 7.1. Вихідні дані для дослідження**

Тип ланки	Параметр	Варіант					
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Інтегруюча	$K$	2,0	4,0	5,0	1,0	3,0	6,0
	$K_0$	0,1	1,0	0,2	0,3	0,4	0,5
Аперіодична	$K$	3,0	5,0	6,0	3,0	12,0	10,0
	$T$	2,0	1,0	4,0	3,0	5,0	4,0
Коливальна	$K_0$	1,0	3,0	0,5	2,0	0,3	0,6
	$K$	2,0	1,0	4,0	5,0	3,0	6,0
	$\xi$	0,5	2,0	0,3	1,0	4,0	3,0
	$K_{01}$	0,1	0,3	0,6	0,4	0,2	0,5
	$K_{02}$	2,0	4,0	1,0	0,3	5,0	3,0

### **Завдання до лабораторної роботи**

Досліджувані в лабораторній роботі динамічні ланки і ланки зворотного зв'язку мають передатні функції (7.1)–(7.6).

У табл. 7.1 надані коефіцієнти і сталі часу зазначених передатних функцій.

### **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Назва роботи.

2. Структурні схеми, таблиці з експериментальними даними і перехідні характеристики для кожного досліджуваного випадку (всього десять випадків). Побудову всіх перехідних характеристик для кожної



з трьох типових ланок можна виконати в одній системі координат на одному графіку.

3. Висновок.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Що таке динамічна ланка?
2. Що називають перехідною функцією ланки?
3. Що таке коригуючий пристрій? Які існують способи включення коригуючих пристроїв?
4. Що таке жорсткий зворотний зв'язок? Якими ланками він реалізується?
5. Що називають гнучким зворотним зв'язком? Якими ланками він реалізується?
6. Як впливає на властивості інтегруючої ланки жорсткий від'ємний зворотний зв'язок? гнучкий від'ємний зворотний зв'язок?
7. Як впливає на властивості аперіодичної ланки жорсткий від'ємний зворотний зв'язок? гнучкий від'ємний зворотний зв'язок?
8. Як впливає на властивості коливальної ланки жорсткий від'ємний зворотний зв'язок? гнучкий від'ємний зворотний зв'язок?
9. Виведіть еквівалентні передатні функції типових динамічних ланок (інтегруючої, аперіодичної, коливальної), охоплених жорстким від'ємним зворотним зв'язком, гнучким від'ємним зворотним зв'язком.

### **Лабораторна робота № 8. ВИВЧЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ У СТАЛИХ РЕЖИМАХ**

**Мета роботи** – дослідження на ПЕОМ способів підвищення точності керування в сталих режимах, їхніх переваг та недоліків.

**Зміст роботи:** 1) ознайомлення з методами підвищення точності керування в сталих режимах; 2) підготовка структурних схем САК, що підлягають дослідженню; 3) експериментальне одержання перехідних характеристик САК, їх аналіз.

### **Основні теоретичні відомості**

При дослідженні систем автоматичного керування доводиться розв'язувати задачу забезпечення необхідних показників якості керування та якості перехідного процесу: швидкодії, коливальності, перерегулювання, що характеризують точність і плавність протікання

процесу. Якість керування регулювання в сталому режимі характеризується точністю системи, тобто величиною сталої помилки керування регулювання  $\epsilon(t)$  при ступінчатому, лінійному, параболічному та синусоїдальному впливах. Вихідна величина астатичної системи навіть у сталому режимі є функцією часу. Ця помилка може бути зображена у вигляді ряду:

$$\epsilon(t) = C_0 x(t) + C_1 \frac{dx(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \dots + \frac{C_m}{m!} \cdot \frac{d^m x(t)}{dt^m},$$

де  $x(t)$  – сигнал, що діє на вході системи; коефіцієнти  $C_0, C_1, C_2, \dots, C_m$  – коефіцієнти помилок:  $C_0$  – коефіцієнт статичної чи позиційної помилки;  $C_1$  – коефіцієнт швидкісної помилки;  $C_2$  – коефіцієнт помилки від прискорення.

У статичній системі всі коефіцієнти помилок відмінні від нуля, причому

$$C_0 = \frac{1}{1+K}, \quad (8.1)$$

де  $K$  – передатний коефіцієнт розімкнутої системи.

У системі з астатизмом першого порядку  $C_0 = 0$ . Інші коефіцієнти відмінні від нуля. У системах з астатизмом другого порядку  $C_0 = C_1 = 0, C_2 \neq 0, C_3 \neq 0, \dots$

Таким чином, одним зі способів підвищення точності регулювання є підвищення порядку астатизму системи, тобто збільшення числа коефіцієнтів  $C_i$ , рівних нулю.

Підвищення порядку астатизму може бути досягнуто, збільшенням числа інтегруючих ланок у САК, але при цьому ускладнюється задача забезпечення стійкості системи. Варто пам'ятати, що система з астатизмом другого порядку, до складу якої входять тільки пропорційні, інтегруючі, аперіодичні й коливальні ланки і не входять ланки форсуючі, є структурно нестійкою. Значно кращі результати одержують при підвищенні порядку астатизму САК за допомогою ізодромної ланки, що має передатну функцію:

$$W_u(s) = \frac{K_u(T_u s + 1)}{s} = 1 + \frac{K_u}{s}, \quad (8.2)$$

де  $T_u = \frac{1}{K_u}$  – стала часу ізодромної ланки.

Якщо стала часу  $T_u$  досить велика, то запас стійкості при введенні такої ланки може бути збережений незмінним. Однак, при великому значенні  $T_u$  можуть збільшитися старші коефіцієнти помилок.

Як видно з виразів 8.1 та 8.2, зменшення сталої помилки  $\epsilon(t)$  може бути досягнуто також збільшенням передатного коефіцієнта розімкнутої системи. Однак зі збільшенням статичної точності найчастіше зменшуються запаси стійкості й при значному збільшенні коефіцієнта  $K$  система стає нестійкою. Тобто і в цьому випадку існує протиріччя між статичною точністю і стійкістю. Тому при підвищенні точності керування шляхом збільшення передатного коефіцієнта  $K$  розімкнутої системи необхідні заходи для забезпечення достатнього запасу стійкості.

### Порядок виконання роботи

1. Запустити програму MATLAB.

2. Скласти структурну схему замкнутої САК (зворотний зв'язок – від'ємний, одиничний), якщо передатна функція розімкнутої САК має вигляд

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}, \quad (8.3)$$

де  $K = 10 \text{ c}^{-1}$ ;  $T_1 = 0,5 \text{ c}$ ;  $T_2 = 0,025 \text{ c}$ ;  $T_3 = 0,01 \text{ c}$ .

Зняти перехідну характеристику САК.

3. Зняти перехідні характеристики даної САК, задаючи значення коефіцієнта передачі  $K$  рівним 20, 30, 40  $\text{c}^{-1}$ . Зробити висновки.

4. Збільшуючи значення  $K$ , визначити величину граничного коефіцієнта підсилення.

5. Скласти структурну схему замкнутої САК, що відповідає передатній функції (8.3) та початковим значенням параметрів  $K$  і  $T_i$ . Включити в прямий ланцюг САК інтегруючу ланку з передаточною

функцією  $W_1(s) = \frac{1}{s}$ . Зняти характеристику зміни вихідного сигналу при одиничному та лінійному впливах на вході системи.

6. У попередньому пункті включити в прямий ланцюг САК дві інтегруючі ланки із загальною передаточною функцією  $W_2(s) = \frac{1}{s^2}$ .

Зняти характеристику зміни вихідного сигналу при одиничному, лінійному та параболічному впливах на вході системи. Зробити висновки.

7. У прямий ланцюг вихідної структурної схеми САК включити ізодромну ланку з передатною функцією  $W_u(s) = \frac{T_u s + 1}{s}$ , прийнявши  $T_u = 1$  с. Зняти перехідну характеристику. Зробити висновки. Роботу закінчено.

### **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Назва і мета роботи.

2. Структурна схема, таблиця результатів дослідження, перехідна характеристика для кожного виконаного етапу роботи (за пп. 2, 3, 5, 7 підрозд. "Порядок виконання роботи"). За побудованими перехідними характеристиками визначити час регулювання  $t_p$ , с; перерегулювання  $\sigma$ , %; число коливань  $N$ .

3. Визначити точність системи для п'ятого і шостого етапів підрозд. "Порядок виконання роботи".

4. Висновки.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Якими показниками характеризується якість САК?

2. Запишіть ряд, у вигляді якого може бути зображена помилка регулювання.

3. Як визначаються молодші коефіцієнти помилок у статичних і астатичних САК?

4. Які існують способи підвищення точності регулювання?

5. Якими методами досягається підвищення порядку астатизму системи?

6. Як впливає на стійкість САК введення однієї інтегруючої ланки? Двох інтегруючих ланок?

7. Як впливає на стійкість САК збільшення коефіцієнта передачі розімкнутої системи?

8. У чому полягає відмінність астатичних систем від статичних?

9. Як зробити статичну САК астатичною?

10. Чи можна добитися астатизму системи без включення інтегруючого пристрою?

11. Що таке сталий режим? Статичний режим? Сталий динамічний режим?

12. Що таке перехідний режим?

13. Які види помилок системи при одиничному, лінійному та параболічному впливах на вході системи?

## Лабораторна робота № 9. ВПЛИВ ПОСЛІДОВНИХ КОРИГУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

**Мета роботи** – дослідження впливу типових законів керування (П, ПІ, ПІД) на роботу автоматичної системи, набуття практичних навичок щодо аналізу впливу послідовних коригуючих пристроїв на якість процесу керування за допомогою ПЕОМ.

**Вихідні дані:** параметри (табл. 9.1) систем автоматичного керування і структурна схема (рис. 9.1).

### Основні теоретичні відомості

Одним з поширених на практиці способів покращення якості процесу автоматичного керування є спосіб послідовної корекції. Він полягає в тому, що в систему подається сигнал, пропорційний відхиленню керованої величини від заданого значення, а також сигнали, пропорційні похідній та інтегралу від цього відхилення.

При введенні в систему перелічених сигналів реалізуються так звані типові закони керування:

пропорційний або П-закон (сигнал керування, пропорційний відхиленню керованої величини від заданого значення);

пропорційно-інтегральний або ПІ-закон (сигнал керування пропорційний відхиленню керованої величини від заданого значення плюс інтеграл від цього відхилення);

пропорційно-інтегрально-диференціальний або ПІД-закон (сигнал керування пропорційний відхиленню керованої величини та інтегралу, а також похідній від цього відхилення).

### Порядок виконання роботи

1. Користуючись пакетом Mathcad, розрахувати перехідні характеристики в САК для законів керування П, ПІ, ПІД. При цьому для П-закону коефіцієнт підсилення  $K_p$  прийняти спочатку рівним заданому (згідно з табл. 9.1), а потім збільшити його вдвічі.

2. За результатами розрахунку побудувати графіки перехідних процесів при П-, ПІ- та ПІД-законих керування (в одній системі координат).

3. Для всіх випадків, що розглядаються, визначити усталену похибку системи, величину перероблювання та час перехідного

46 Таблиця 9.1. Вихідні дані до лабораторної роботи № 7

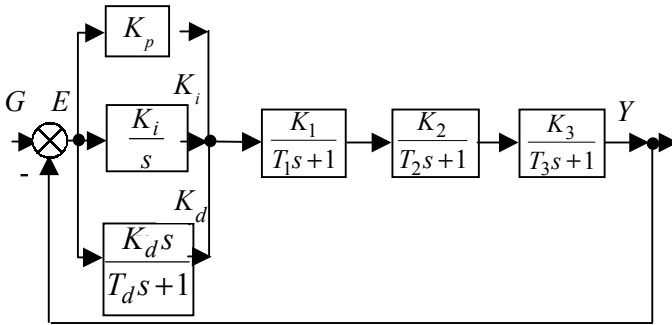
№	Схема на рис. 7.1	Параметри системи						Параметри коректуючих пристроїв							
		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	Етап I			Етап II				
								K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	T <sub>ds, c</sub>	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>	T <sub>ds, c</sub>
1	A	1,0	2,0	2,0	1,0	0,2	0,5	1,0	1,3	0,6	0,06	0,8	0,4	0,4	0,04
2	B	1,0	1,0	-	0,4	1,0	1,6	1,0	1,0	0,6	0,1	1,0	1,0	1,5	0,08
3	A	0,4	1,4	2,0	0,4	0,8	1,2	1,0	1,6	1,0	0,1	0,8	0,5	0,3	0,04
4	B	1,0	2,0	-	0,2	0,5	1,4	1,0	1,2	0,4	0,1	1,0	0,8	0,5	0,05
5	A	0,8	2,0	1,0	0,8	0,5	0,3	1,0	2,0	1,5	0,1	1,0	0,7	0,25	0,05
6	B	1,0	2,0	-	0,3	0,8	2,4	1,5	1,0	2,0	0,1	1,0	0,6	1,5	0,04
7	A	0,9	2,0	0,6	0,9	0,3	0,6	1,0	2,2	1,0	0,1	1,0	1,0	0,3	0,05
8	B	1,0	2,0	-	0,5	0,5	3,6	1,5	1,0	0,6	0,08	1,0	0,6	1,0	0,04
9	A	0,5	2,5	1,3	0,5	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	0,1	1,0	0,6	0,5	0,05
10	B	0,5	0,3	-	0,4	0,2	2,0	1,5	2,5	1,0	0,05	1,5	1,0	1,0	0,02
11	A	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,6	1,0	1,5	1,7	0,1	1,0	0,6	0,5	0,075
12	B	0,5	3,0	-	0,6	0,3	2,4	1,6	2,0	0,5	0,08	1,0	1,0	1,6	0,06
13	A	1,0	1,25	1,5	1,0	0,5	0,8	1,0	1,4	1,4	0,06	1,0	0,55	0,8	0,045
14	B	1,5	1,2	-	1,0	0,5	3,2	1,5	1,0	0,6	0,06	1,0	0,4	2,0	0,025
15	A	0,7	1,0	3,5	0,7	0,25	1,2	1,0	1,8	0,9	0,06	1,0	0,7	1,0	0,025
16	B	1,0	2,0	-	0,2	0,4	2,0	1,5	1,5	1,0	0,07	1,2	0,6	1,6	0,015
17	A	2,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,1	0,3	0,25	1,8	0,035

процесу. Порівняти одержані результати та зробити висновки про вплив послідовної корекції (П-, ПІ- та ПІД-законів) на якість роботи системи.

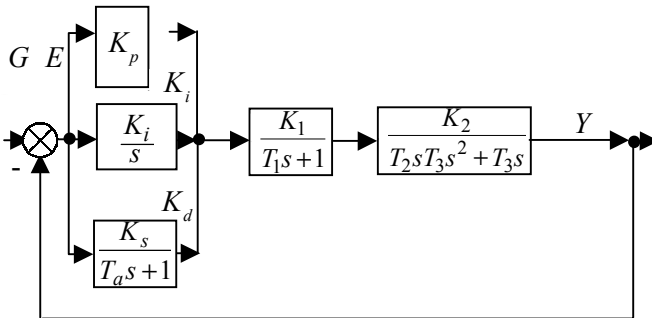
4. Для заданих нових значень параметрів П-, ПІ- та ПІД-регуляторів (другий етап відповідно до табл. 9.1) розрахувати на ПЕОМ перехідні процеси в системі та побудувати їх графіки.

5. Визначити перелічені вище показники якості та порівняти їх з аналогічними показниками, одержаними при виконанні першого етапу роботи.

6. За результатами порівняння зробити висновки.



*a*



*б*

Рис. 9.1. Структурні схеми заданих систем  
**Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Вихідні дані та структурна схема досліджуваної системи.
2. Диференціальні рівняння системи у нормальній формі.
3. Графіки перехідних процесів для умов використання П-, ПІ- та ПІД-законів керування.

4. Показники якості перехідного процесу для досліджуваних законів керування (усталена похибка, величина перерегулювання, час перехідного процесу).

5. Висновки про вплив типових законів керування на якість роботи автоматичної системи.

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Для чого необхідні пристрої, які реалізують типові закони керування?

2. Як впливає на перехідний процес введення в закон керування інтегралу, похідної, інтегралу та похідної?

3. Як змінюється усталена похибка при введенні інтегралу в закон керування?

4. Назвіть закони керування, при введенні яких статична система стає астатичною.

### **Лабораторна робота № 10. ВПЛИВ ЖОРСТКИХ ТА ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ НА ЯКІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

**Мета роботи** – дослідження впливу жорстких та гнучких зворотних зв'язків на роботу системи.

**Вихідні дані:** 1) структурні схеми статичних та астатичних систем автоматичного керування (рис. 10.1 та 10.2); 2) параметри заданих систем (табл. 10.1 та 10.2); 3) стандартний пакет Mathcad.

### **Порядок виконання роботи**

1. Для заданої статичної системи записати зображення керованої величини при відсутності коригуючих пристроїв, а потім з кожним коригуючим пристроєм 1, 2, 3.

2. Використовуючи пакет Mathcad, одночасно розрахувати перехідні процеси в системі без коригуючих пристроїв та з кожним із них окремо.

3. За результатами розрахунків побудувати графіки кривих перехідного процесу.

4. Для кожного випадку визначити з графіків час перехідного процесу, величину перерегулювання та усталену похибку.

5. Усталену похибку для кожного випадку обчислити аналітично.



6. Зробити висновки щодо впливу розглянутих коригуючих пристроїв на якість роботи статичної системи.

7. Згідно з описаним вище порядком дослідити також вплив різних коригуючих пристроїв на роботу астатичної системи.

8. Порівняти результати коригування статичної та астатичної систем та зробити висновки.

### Обробка результатів. Оформлення звіту

1. Структурні схеми досліджуваних систем та їхні параметри.

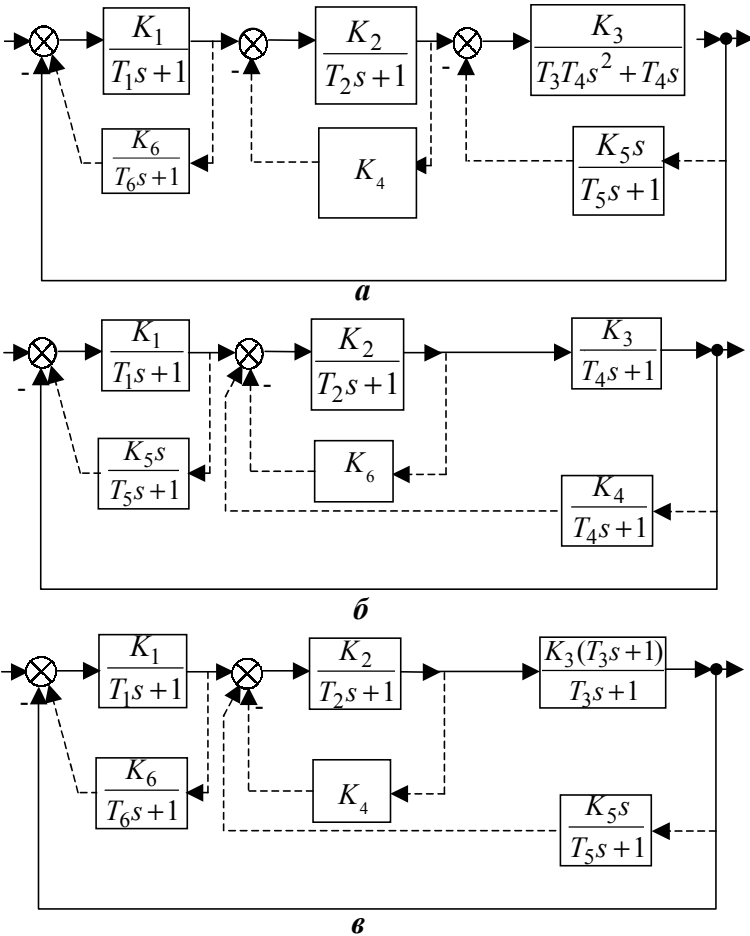


Рис. 10.1. Структурні схеми статичних систем

2. Розраховані аналітичним шляхом значення усталеної похибки для некоректованих та скоректованих систем.

3. Графіки перехідного процесу для різних способів корекції та їх аналіз.

4. Висновки.

### Запитання для контролю

1. Які коректуючі пристрої вважаються паралельними?

2. Подайте визначення жорсткого (гнучкого) зворотного зв'язку.

3. Який зворотний зв'язок є позитивним (від'ємним)?

4. Що зміниться в системі, якщо інтегральну ланку охопити жорстким від'ємним зворотним зв'язком?

5. Що зміниться в системі, якщо аперіодичну ланку охопити жорстким від'ємним зворотним зв'язком?

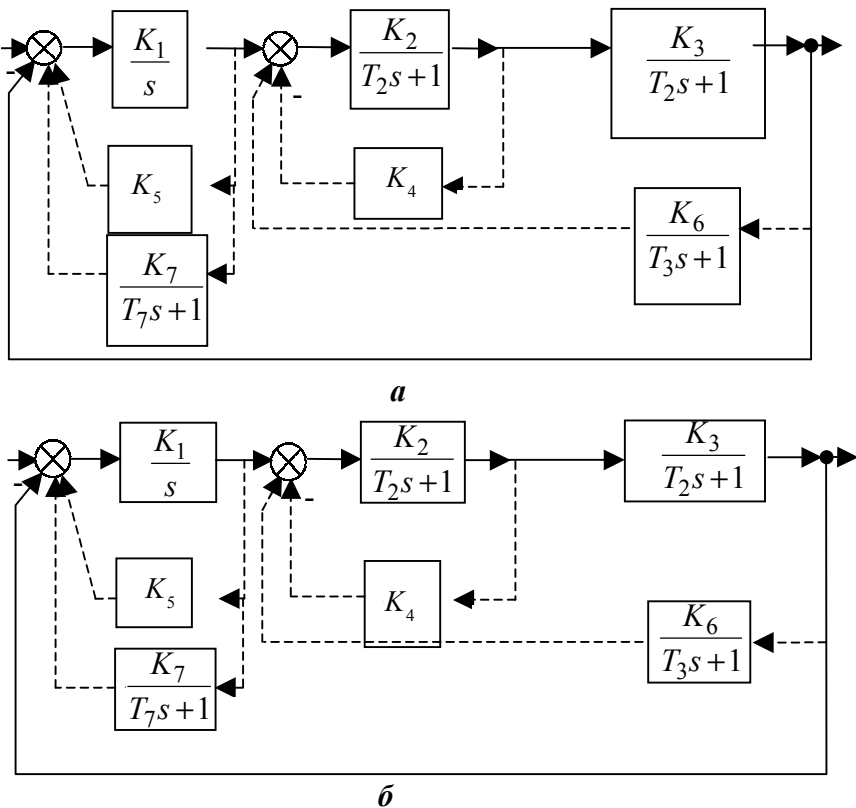


Рис. 10.2. Структурні схеми астатичних систем

Таблица 10.1. Параметры статических систем до лабораторной работы № 10

Номер з/п	Схема на рис. 10.1	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	C						
								T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	
1	а	1,0	2,0	2,00	1,00	1,0	1,00	0,4	2,0	0,30	0,30	0,30	0,50	0,2
2	б	2,4	1,4	1,20	1,00	0,8	0,80	0,4	2,5	0,60	0,60	0,60	0,50	—
3	в	2,0	2,0	2,00	1,00	1,0	1,00	0,4	2,0	0,30	0,60	0,60	0,40	0,5
4	а	1,5	3,0	1,20	1,00	1,2	1,40	0,2	1,7	0,40	0,40	0,40	0,60	0,3
5	б	1,0	1,4	2,50	1,00	1,0	1,00	0,8	2,4	1,00	0,60	0,60	0,40	—
6	в	1,5	1,4	2,20	1,00	1,0	0,60	0,8	1,8	0,30	1,00	1,00	0,80	0,3
7	а	2,0	1,0	1,40	1,00	1,5	1,00	1,0	2,0	0,45	0,45	0,45	0,40	0,8
8	б	2,0	1,4	2,00	0,75	0,8	1,00	0,3	0,6	0,60	0,60	0,60	0,50	—
9	в	0,8	3,0	1,60	1,00	0,8	0,40	0,5	3,0	0,60	1,60	1,60	0,60	1,0
10	а	1,0	1,0	1,00	1,00	1,6	1,00	0,6	2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,3
11	б	1,5	2,0	1,80	1,00	1,2	1,20	0,6	2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	—
12	в	1,4	2,6	1,60	1,00	0,8	0,25	0,4	2,5	0,60	2,00	2,00	1,00	0,8
13	а	0,8	1,5	1,00	0,80	0,9	0,80	0,3	0,6	0,60	0,60	0,60	0,50	0,2
14	б	2,5	1,4	1,80	1,00	0,8	1,50	1,0	2,0	0,45	0,80	0,80	1,00	—
15	в	2,5	2,0	2,00	1,00	0,6	0,40	0,4	0,4	0,20	1,00	1,00	0,60	0,4
16	а	1,0	1,0	1,25	1,00	0,5	0,60	0,8	2,4	1,00	1,00	1,00	0,60	0,4
17	б	1,5	3,0	1,20	1,00	1,3	1,20	0,2	1,7	0,90	0,30	0,30	0,85	—
18	в	2,0	5,0	0,90	1,00	1,0	0,40	0,3	1,0	0,50	1,50	1,50	0,60	0,4

2 Таблица 10.2. Параметры астатических систем до лабораторной работы № 10

Номер з/п	Схема на рис. 10.2	$K_1, c^{-1}$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	c			
									$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
1	a	1,0	2,0	0,80	0,5	0,80	1,00	1,0	0,30	0,6	1,00	0,80
2	б	2,0	1,0	0,20	0,4	1,00	0,80	—	0,20	0,6	0,40	0,20
3	a	2,0	1,0	0,80	0,4	1,00	0,80	0,7	0,20	0,6	0,40	0,20
4	б	2,5	0,8	0,50	0,8	1,00	0,30	—	0,30	0,4	0,40	0,25
5	a	1,0	1,0	2,00	0,6	2,00	1,00	1,5	0,35	1,0	0,60	0,40
6	б	1,0	1,3	0,50	1,0	0,60	1,00	—	0,50	0,8	0,60	0,30
7	a	1,2	1,4	1,80	1,0	1,40	0,80	2,0	0,60	0,6	0,60	0,60
8	б	1,6	1,0	0,50	0,5	0,75	0,70	—	0,50	0,5	0,50	0,20
9	a	1,0	1,2	1,00	0,4	1,00	0,80	2,0	1,00	1,0	1,00	0,80
10	б	1,0	1,0	1,00	1,0	1,00	0,50	—	0,40	1,0	1,00	0,50
11	a	0,8	1,4	1,30	0,8	1,60	1,00	1,6	1,40	1,4	1,40	0,80
12	б	1,6	0,8	0,25	0,3	0,85	0,70	—	0,40	1,0	0,35	0,30
13	a	1,4	1,4	1,40	0,4	1,00	1,40	1,8	0,40	0,8	1,00	0,50
14	б	0,8	0,8	0,45	0,6	0,75	0,80	—	1,00	1,0	0,60	0,45
15	a	2,0	1,0	0,80	1,4	0,60	1,00	1,0	0,20	0,8	1,40	0,80
16	б	1,4	0,6	0,70	0,4	1,00	1,00	—	0,80	1,5	0,50	0,30
17	a	2,0	1,0	1,50	0,4	1,00	1,50	0,6	0,40	0,5	0,50	0,60
18	б	2,0	0,6	0,50	0,5	0,80	0,75	—	0,50	1,2	0,60	0,30

6. Як зміниться робота системи, якщо інтегровальну ланку охопити гнучким від'ємним зворотним зв'язком?

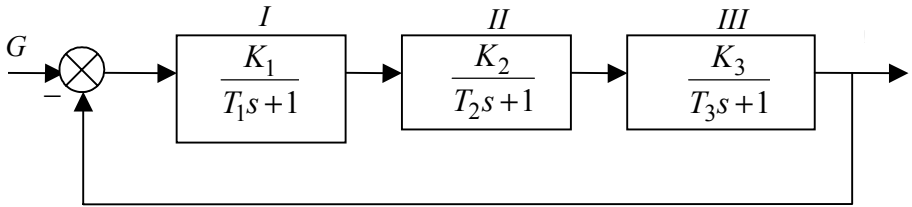
7. Як зміниться якість роботи системи, якщо гнучким від'ємним зворотним зв'язком охопити статичні динамічні ланки (аперіодичну, коливальну, дві послідовно з'єднаних аперіодичних ланки)?

8. Як записати розв'язок диференціального рівняння системи в операторній формі при одиничному ступінчастому входному впливові?

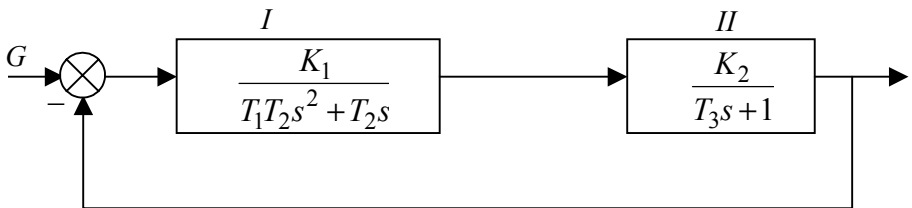
### Лабораторна робота № 11. СИНТЕЗ ПАРАЛЕЛЬНОГО КОРИГУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

**Мета роботи** – поглиблення знань при вивченні питань синтезу автоматичних систем, використовуючи паралельний коригуючий пристрій.

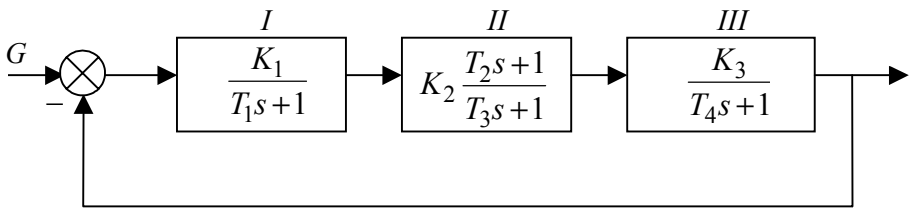
**Вихідні дані:** 1) структурна схема (рис.11.1) та параметри



**a**



**б**



**в**

Рис. 11.1. Структурні схеми нескоригованих систем

Таблиця 11.1. Параметри нескорегованих систем до лабораторної роботи № 11

Номер з/п	Схема на рис. 11.1	Параметри								Показники якості		Динамічні ланки, охололені коригуючим пристроєм
		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$\delta_b, \%$	$t_1, c$		
1	A	1,0	2,0	2,0	0,5	0,2	1,0	—	—	20	3,90	I–II
2	A	1,0	2,0	2,0	0,5	0,2	1,0	—	—	15	2,90	II–III
3	Б	2,0	2,0	—	0,4	0,6	1,0	—	—	20	2,80	I
4	Б	2,0	2,0	—	1,0	1,0	1,0	—	—	25	5,00	I
5	B	2,0	2,0	2,0	0,5	0,2	1,0	1,0	—	25	4,80	I–II
6	Б	1,2	2,0	—	0,2	0,2	0,5	—	—	25	3,14	I
7	Б	1,0	3,0	—	0,2	0,2	0,7	—	—	15	2,14	I
8	B	2,0	2,0	2,0	0,5	0,2	1,0	1,0	—	20	3,80	II–III
9	B	3,0	2,0	2,0	0,6	0,4	1,0	1,0	—	15	2,20	I–II
10	A	3,0	1,0	2,0	0,6	0,4	1,0	—	—	25	5,50	I–II
11	A	3,0	1,0	2,0	0,6	0,4	1,0	—	—	25	6,50	II–III
12	Б	2,0	1,5	—	0,3	0,3	1,0	—	—	20	4,70	I
13	Б	2,5	1,0	—	0,6	0,6	1,0	—	—	20	3,80	I
14	B	3,0	2,0	1,5	0,8	0,4	1,0	1,0	—	15	2,80	I–II
15	B	2,0	1,5	3,0	0,4	0,2	0,9	0,9	—	25	6,80	I–II
16	A	2,0	1,5	2,0	0,8	0,4	2,0	—	—	25	4,80	I–II
17	A	2,0	1,5	2,0	0,8	0,4	2,0	—	—	25	5,80	II–III
18	B	2,0	3,0	2,0	0,6	0,4	1,0	1,0	—	10	1,20	II–III

(табл.11.1) досліджуваної системи; 2) пакети прикладних програм Mathcad, MATLAB.

### Основні теоретичні відомості

Одним з поширених і простих методів синтезу лінійних автоматичних систем є метод логарифмічних частотних характеристик. Він дає можливість синтезувати як послідовні, так і паралельні коригуючі пристрої.

Розглянемо систему з паралельним коригуючим пристроєм, наведену на рис. 11.2. На даній схемі:  $W_{\text{HO}}(s)$  – передаточна функція динамічних ланок, не охоплених паралельним коригуючим пристроєм;  $W_0(s)$  – передаточна функція динамічних ланок, охоплених паралельним коригуючим пристроєм;  $W_K(s)$  – передаточна функція паралельного коригуючого пристрою.

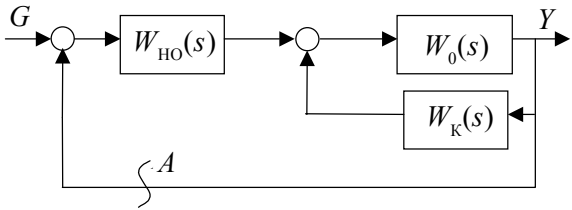


Рис. 11.2. Структурна схема скорегованої системи

Якщо розімкнути систему в точці  $A$ , то її бажана передаточна функція може бути

$$\text{представлена так: } W_{\text{б}}(s) = W_{\text{HO}}(s) \frac{W_0(s)}{1 + W_0(s)W_K(s)}.$$

Замінивши в цьому виразі  $s$  на  $j\omega$ , матимемо формулу для амплітудно-фазової частотної характеристики:

$$W_{\text{б}}(j\omega) = W_{\text{OH}}(j\omega) \frac{W_0(j\omega)}{1 + W_0(j\omega)W_K(j\omega)}.$$

Для технічних схем у діапазоні суттєвих (робочих) частот  $1 + W_0(j\omega)W_K(j\omega) \gg 1$ , тоді вираз 11.1 можна записати так:

$$W_{\text{б}}(j\omega) \cong \frac{W_{\text{HO}}(j\omega)}{W_K(j\omega)}.$$

Аналогічним співвідношенням будуть зв'язані й модулі амплітудно-фазових характеристик (амплітудно-частотні характеристики). Якщо перейти до ЛАЧХ, то можна записати:

$$L_{\delta}(\omega) = L_{\text{HO}}(\omega) - L_{\text{K}}(\omega), \quad (11.1)$$

де  $L_{\delta}(\omega)$  – ЛАЧХ розімкненої коригованої бажаної системи;  $L_{\text{HO}}(\omega)$  – ЛАЧХ динамічних ланок, які не охоплені коригуючим пристроєм;  $L_{\text{K}}(\omega)$  – ЛАЧХ паралельного коригуючого пристрою.

За формулою (11.1) маємо  $L_{\text{K}}(\omega) = L_{\text{HO}}(\omega) - L_{\delta}(\omega)$ .

Таким чином, щоб побудувати ЛАЧХ паралельного коригуючого пристрою, необхідно з ЛАЧХ динамічних ланок, не охоплених коригуючим пристроєм, відняти бажану ЛАЧХ та, користуючись довідковими даними, які є в кожному підручнику з теорії автоматичного керування, можна визначити передаточну функцію і формули для обчислення параметрів коригуючого пристрою.

**Приклад.** Синтезувати паралельний коригуючий пристрій у системі, структурна схема якої наведена на рис. 11.3.

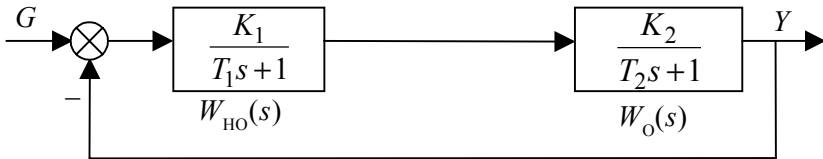


Рис. 11.3. Структурна схема

Вихідні дані:  $k_1 = k_2 = 2$ ;  $T_1 = 0,5$  с;  $T_2 = 0,2$  с;  $\delta = 25$  %;  $t_0 = 3,14$  с.

У результаті синтезу не охоплювати коригуючим пристроєм динамічну ланку з параметрами  $k_1 = 2$ ;  $T_1 = 0,5$  с. Спрямжувальні частоти для побудови ЛАЧХ нескоригованої системи:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ с}^{-1}; \omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ с}^{-1}.$$

Величина  $20 \lg k = 20 \lg k_1 k_2 = 20 \lg(2 \cdot 2) = 12$  дБ.

Для побудови  $L_{\delta}(\omega)$  необхідно згідно з заданими показниками якості ( $\delta$  та  $t_0$ ) визначити частоту  $\omega_c$ , при якій  $L_{\delta}(\omega)$  пересікає вісь частот. Для цього використаємо графіки, наведені на рис. 11.4. По осі ординат відкладаємо задане  $\delta = 25$  % та проведемо горизонтальну лінію до перетину з кривою в точці 1. З точки 1 поставимо перпендикуляр до перетину з кривою  $t_0$  – точка 2. Ордината точки 2 визначає необхідне



значення  $t_0$ . За даними рис. 11.3 знаходимо, що  $t_0 = \frac{3\pi}{\omega_c}$ , звідки

$$\omega = \frac{3\pi}{t_0} = \frac{3 \cdot 3,14}{3,14} = 3 \text{ с}^{-1}.$$

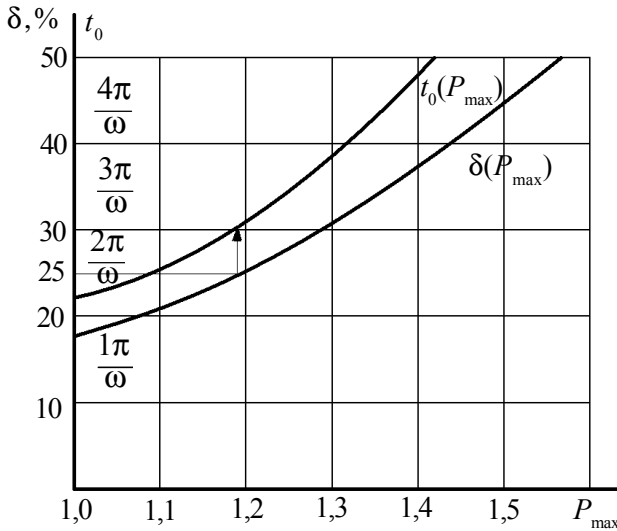


Рис. 11.4. Визначення частоти зрізу

Згідно з обчисленими параметрами на рис. 11.5 побудовані логарифмічні амплітудні частотні характеристики нескоригованої  $L_{\text{НК}}(\omega)$  та скоригованої  $L_{\delta}(\omega)$  розімкнених систем. Згідно з умовами прикладу наведена також ЛАЧХ  $L_{\text{НО}}(\omega)$  динамічної ланки, не охопленої коригуючим пристроєм. Тут же побудована ЛАЧХ паралельного коригуючого пристрою. Ця характеристика відповідає коригуючому пристрою з передатною функцією:

$$W_{\text{к}}(s) = k_{\delta} \frac{T_{1\delta}p + 1}{T_{2\delta}p + 1} \quad (\text{при } T_{1\delta} > T_{2\delta}).$$

За даними графіків на рис. 11.5 знаходимо

$$T_{\delta} = \frac{1}{\omega_y} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ с}; \quad T_{2\delta} = \frac{1}{\omega_1} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ с};$$

$$20 \lg k_{\delta} = -6 \text{ дБ, звідси } k_{\delta} = 0,5.$$

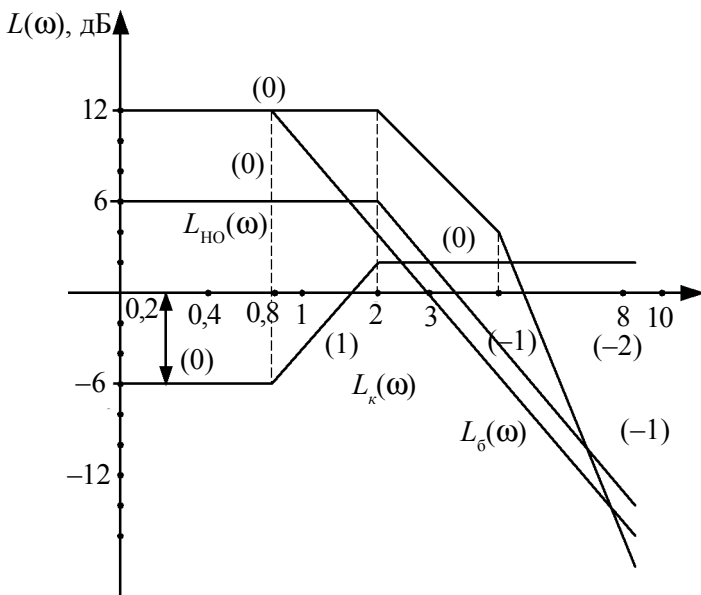


Рис. 11.5. Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики

### Порядок виконання роботи

1. На основі вихідних даних (табл. 11.1) та використання рис. 11.1 визначити частоту зрізу для побудови бажаної ЛАЧХ розімкнутої скоригованої системи.

2. Синтезувати паралельний коригуючий пристрій частотним методом, визначивши його передатну функцію та параметри.

3. Розрахувати на ПЕОМ перехідний процес у заданій та скоригованій системах.

4. В одній системі координат побудувати графіки перехідних процесів заданої та скоригованої систем, визначити показники якості роботи системи.

5. Порівняти задані та одержані за результатами синтезу показники якості роботи системи, зробити висновки виконаної роботи.

### Обробка результатів. Оформлення звіту

1. Вихідні дані.

2. Результати синтезу паралельного коригуючого пристрою частотним методом.

3. Структурна схема скоригованої системи.

4. Побудовані в одній системі координат графіки перехідного процесу в нескоригованій та синтезованій системах.

5. Задані та одержані за результатами розрахунку показники якості роботи системи.

6. Висновки про виконану роботу.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Які характеристики використовуються при синтезі паралельного коригуючого пристрою частотним методом?

2. Як побудувати ЛАЧХ нескоригованої системи?

3. Як визначається частота зрізу?

4. Як побудувати бажану логарифмічну амплітудну частотну характеристику скоригованої системи?

5. Як одержати ЛАЧХ паралельного коригуючого пристрою?

6. Як визначити параметри паралельного коригуючого пристрою?

7. Чому при синтезі паралельного коригуючого пристрою не враховуються параметри динамічних ланок, охоплених коригуючим пристроєм?

### **Лабораторна робота № 12. СИНТЕЗ ПОСЛІДОВНОГО КОРИГУЮЧОГО ПРИСТРОЮ**

**Мета роботи** – поглиблення знань при вивченні питань корекції та синтезу автоматичних систем, набуття навичок використання послідовного коригуючого пристрою.

**Вихідні дані:** 1) структурна схема (рис. 12.1) та параметри (табл. 12.1) нескоригованих систем автоматичного керування; 2) задані показники якості роботи системи (табл. 12.1); 3) пакет прикладних програм Mathcad або MATLAB.

### **Основні теоретичні відомості**

Розглянемо лінійну систему автоматичного керування з послідовним коригуючим пристроєм, структурна схема якої наведена на рис. 12.2. На даній схемі  $W_{\text{HK}}(s)$  – передаточна функція розімкнутої нескоригованої системи;  $W_{\text{K}}(s)$  передаточна функція послідовного коригуючого пристрою.

Якщо розімкнути систему, то можна записати:

$$W_{\bar{G}}(s) = W_K(s)W_{HK}(s),$$

де  $W_{\bar{G}}(s)$  – передаточна функція розімкнутої скоригованої бажаної системи.

Якщо замінити в цьому виразі  $s$  на  $j\omega$ , одержимо формулу для амплітудно-фазової частотної характеристики (АФХ):

$$W_{\bar{G}}(j\omega) = W_K(j\omega)W_{HK}(j\omega).$$

Аналогічним співвідношенням будуть пов'язані й модулі АФХ. Якщо перейти до ЛАЧХ, то одержимо

$$L_{\bar{G}}(\omega) = L_K(\omega) - L_{HK}(\omega), \quad (12.1)$$

де  $L_K(\omega)$  – ЛАЧХ розімкнутої скоригованої (бажаної) системи;  $L_{HK}(\omega)$  – ЛАЧХ розімкнутої нескоригованої системи;  $L_K(\omega)$  – ЛАЧХ послідовного коригуючого пристрою.

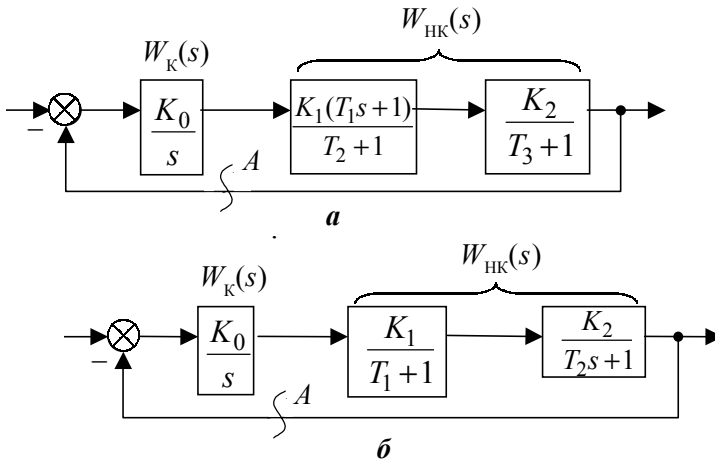


Рис. 12.1. Структурні схеми нескоригованих систем

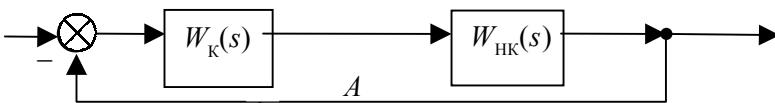


Рис. 12.2. Структурна схема системи з послідовним коригуючим пристроєм

Таблиця 12.1.1. Параметри нескоригованих систем до лабораторної роботи № 12

Номер з/п	Схема на рис. 10.2	Параметри						Показники якості				Діапазон середніх частот $L_6(\omega)$	
		$K_0$	$K_1$	$K_2$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$\delta_0, \%$	$t_0, c$	$\omega_{\min}, c^{-1}$	$\omega_c, c^{-1}$	$\omega_{\max}, c^{-1}$	
1	б	4,00	2,00	1,00	0,25	0,11	—	35	6,8	1,00	2,0	4,0	
2	б	1,60	2,50	2,50	0,25	0,25	—	35	6,8	1,00	2,0	4,0	
3	б	1,00	2,00	1,00	2,70	0,36	—	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
4	а	2,00	1,58	1,00	1,25	4,00	0,25	35	6,8	1,00	2,0	4,0	
5	б	4,00	2,50	1,27	3,30	0,36	—	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
6	б	2,50	2,00	2,00	0,25	0,25	—	35	6,8	1,00	2,0	4,0	
7	б	3,00	2,00	1,00	0,28	0,10	—	35	9,3	0,56	1,4	3,5	
8	а	0,79	2,00	2,00	1,00	4,00	0,36	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
9	б	3,00	2,00	1,00	6,00	0,36	—	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
10	б	2,00	1,50	2,00	0,28	0,28	—	35	9,3	0,56	1,4	3,5	
11	б	2,50	1,00	1,00	2,50	0,36	—	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
12	а	0,79	4,00	1,00	0,80	4,00	0,25	35	6,8	1,00	2,0	4,0	
13	а	1,00	4,00	1,00	1,00	5,00	0,25	35	6,8	1,00	2,0	4,0	
14	а	1,00	3,16	1,00	0,80	4,00	0,36	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
15	а	2,00	1,00	1,58	0,80	5,00	0,36	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
16	б	1,00	1,00	3,60	0,36	5,00	—	35	9,3	0,70	1,4	2,8	
17	б	4,00	2,00	1,00	0,20	0,10	—	35	6,8	0,80	2,0	5,0	
18	б	2,00	2,00	2,00	0,20	0,20	—	35	6,8	0,80	2,0	5,0	

За виразом (12.1) одержуємо

$$L_{\kappa}(\omega) = L_{\delta}(\omega) - L_{\text{нк}}(\omega).$$

Отже, для одержання ЛАЧХ  $L_{\kappa}(\omega)$  послідовного коригуючого пристрою необхідно від ЛАЧХ  $L_{\delta}(\omega)$  бажаної системи відняти ЛАЧХ  $L_{\text{нк}}(\omega)$  нескоригованої системи.

ЛАЧХ  $L_{\text{нк}}(\omega)$  розімкнутої нескоригованої системи будується згідно зі структурною схемою та заданими параметрами її елементів. Слід пам'ятати, що кількість різновидів ЛАЧХ  $L_{\text{нк}}(\omega)$  може бути дуже великою. У даній лабораторній роботі розглянуті найбільш поширені з цих різновидів (див. рис. 10.2).

Найбільш важливим і трудомістким етапом розрахунку є побудова ЛАЧХ бажаної розімкнутої системи  $L_{\delta}(\omega)$ . Початковим для цього є задана якість процесу керування. При цьому характеристика  $L_{\delta}(\omega)$  повинна бути такою, щоб при забезпеченні заданої якості роботи системи коригуючий пристрій був якомога простішим. У багатьох випадках цього можна досягти.

Побудову  $L_{\delta}(\omega)$  слід починати з середньочастотного діапазону, котрий визначає швидкодію та коливальність системи. У цьому діапазоні бажана характеристика повинна мати нахил  $-20$  дБ/дек. Діапазон частот для цього відрізка характеристики обмежується частотами  $\omega_{\min}$ ,  $\omega_c$ ,  $\omega_{\max}$ , які для кожного варіанту системи наведені в табл.12.1.

Низькочастотний відрізок  $L_{\delta}(\omega)$  зумовлює точність роботи системи в усталеному режимі. За низькочастотний відрізок  $L_{\delta}(\omega)$  можна взяти низькочастотний відрізок ЛАЧХ  $L_{\text{нк}}(\omega)$  нескоригованої системи. Спряження середньочастотного відрізка  $L_{\delta}(\omega)$  з низькочастотним проводиться або безпосередньо (з нахилом  $-20$  дБ/дек), або ж за допомогою відрізків прямих із нахилом  $-40$  дБ/дек ( $-60$  дБ/дек). Головною умовою тут є те, щоб у діапазоні низьких частот нахил ЛАЧХ  $L_{\delta}(\omega)$  якомога менше відрізнявся від нахилу ЛАЧХ  $L_{\text{нк}}(\omega)$ . На рис. 12.3 показані випадки як безпосереднього спряження низько- та середньочастотного відрізків  $L_{\delta}(\omega)$ , так і спряження за допомогою відрізка з нахилом  $-40 \dots -60$  дБ/дек.

Високочастотний відрізок ЛАЧХ  $L_{\delta}(\omega)$  слабо впливає на якість роботи системи. Тому його нахил прийнято таким, як і для  $L_{\text{нк}}(\omega)$ .

Якщо дотримуватися викладеного порядку побудови бажаної ЛАЧХ, то характеристика послідовного коригуючого пристрою  $L_{\kappa}(\omega)$  буде достатньо простою.

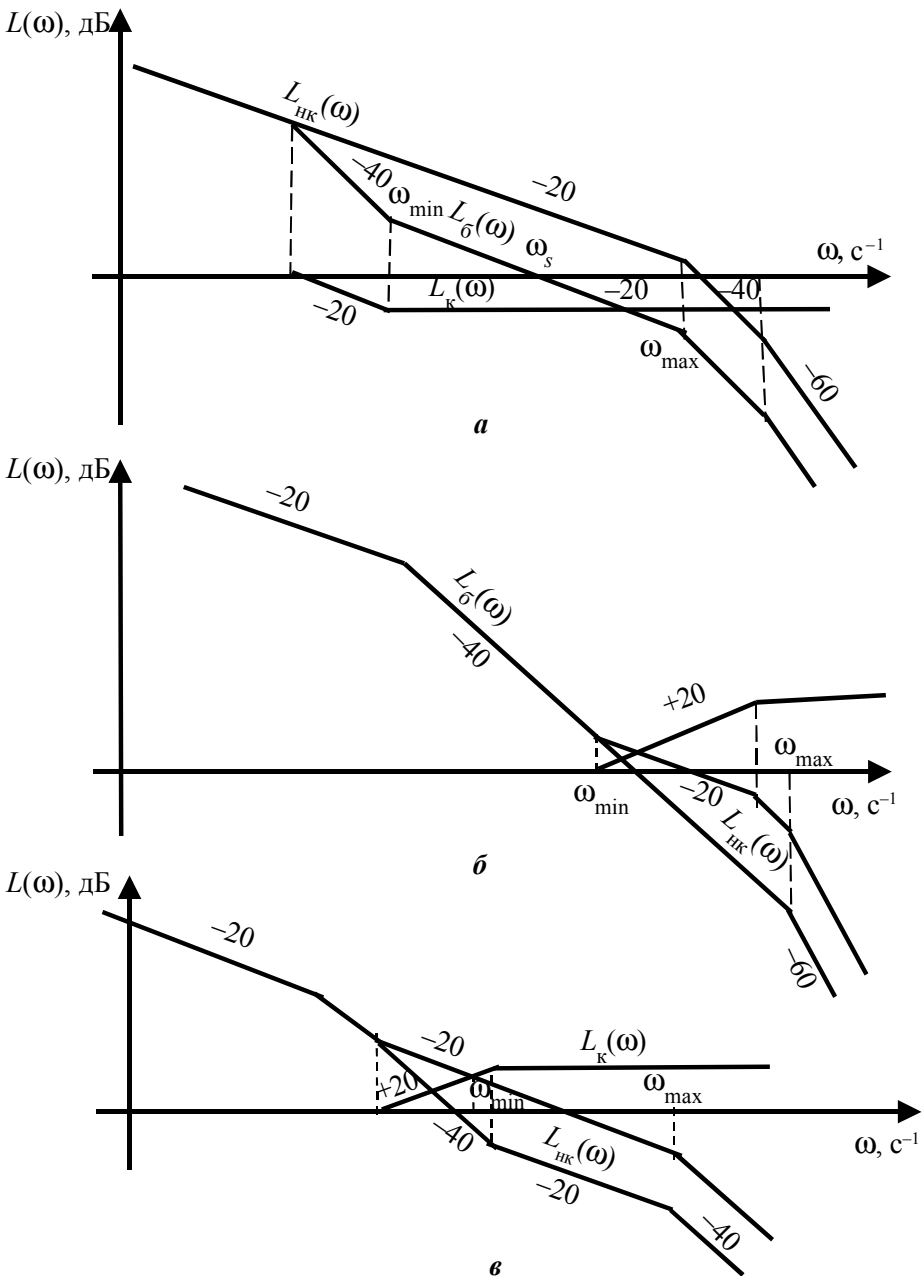


Рис. 12.3. Визначення ЛАЧХ послідовного коригуючого пристрою

## **Порядок виконання роботи**

1. Синтезувати послідовний коригуючий пристрій частотним методом, визначити його передаточну функцію та параметри.
2. Розрахувати перехідний процес у заданій та скоригованій системах.
3. В одній системі координат побудувати графіки перехідних характеристик заданої та скоригованої систем, визначити показники якості
4. Порівняти задані та одержані за результатами синтезу показники якості роботи системи. Зробити висновки.

## **Обробка результатів. Оформлення звіту**

1. Вихідні дані.
2. Результати синтезу послідовного коригуючого пристрою частотним методом.
3. Структурна схема скоригованої системи.
4. Побудовані в одній системі координат графіки перехідного процесу в нескоригованій та скоригованій системах.
5. Задані та одержані за результатами синтезу показники якості роботи системи.
6. Висновки про результати виконаної роботи.

## **Контрольні питання та завдання**

1. Які коригуючі пристрої називають послідовними?
2. З яких характерних відрізків складається бажана ЛАЧХ?
3. Які ЛАЧХ використовуються при синтезі послідовного коригуючого пристрою?
4. Як побудувати ЛАЧХ розімкнутої нескоригованої системи?
5. Як побудувати бажану ЛАЧХ?
6. Як одержати ЛАЧХ послідовного коригуючого пристрою?
7. Назвіть позитивні та негативні якості послідовних коригуючих пристроїв?

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. "Автоматика и телемеханика": В 2 ч./ *Н.А. Бабаков, А.А. Воронов* и др.; Под ред. *А.А. Воронова*. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с., ил.



2. Євстіфєєв В.О., Перекрест А.Л. Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія автоматичного управління" для студентів зі спеціальностей 7.091401 "Системи управління та автоматики" та 7.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" усіх форм навчання. – Кременчук, 2002. – 32 с.

## ДОДАТОК

### ПАКЕТИ РОЗШИРЕННЯ MATLAB

Для ознайомлення з пакетами розширення Matlab пропонуємо звернути увагу на коментарі щодо списку пакетів розширення, Simulink for Windows, пакет символної математики, пакети математичних обчислень, пакети аналізу й синтезу систем керування, пакети ідентифікації систем, додаткові засоби пакета Simulink, пакети для обробки сигналів і зображень, інші пакети прикладних програм.

У цих розділах коротко розглянуто основні засоби професійного розширення системи і її адаптації під розв'язання певних класів математичних і науково-технічних завдань з пакетами розширення системи MATLAB. Безсумнівно, що хоча б частині із цих пакетів повинен бути присвячений окремий навчальний курс або довідник, можливо, і не один. За кордоном більшості з таких розширень присвячені окремі книги, а обсяг документації щодо них становить сотні мегабайт.

**Коментарі щодо списку пакетів розширення.** Повний склад системи MATLAB 6.0 містить ряд компонентів: назва, номер версії й дату створення, які можна вивести на перегляд командою `ver`: `" ver MATLAB Version 6.0.0.88 (R12) on PCWIN MATLAB License Number: 0`

MATLAB Toolbox	Version 6.0	(R12)	06-Oct-2000
Simulink	Version 4.0	(R12)	16-Jun-2000
Stateflow	Version 4.0	(R12)	04-Oct-2000
Stateflow Coder	Version 4.0	(R12)	04-Oct-2000
Real-Time Workshop	Version 4.0	(R12)	01-Mar-2000
COMA Reference Blockset	Version 1.0.2	(R12)	01-Sep-2000
Communications Blockset	Version 2.0	(R12)	01-Sep-2000
Communications Toolbox	Version 2.0	(R12)	01-Sep-2000
Control System Toolbox	Version 5.0	(R12)	01-Sep-2000

DSP Blockset	Version 4.0	(R12)	01-Sep-2000
Data Acquisition Toolbox	Version 2.0	(R12)	05-Oct-2000
Database Toolbox	Version 2.1	(R12)	18-Jan-2000
Datafeed Toolbox	Version 1.2	(R12)	08-May-2000
Dials & Gauges Blockset	Version 1.1	(R12)	12-May-2000
Filter Design Toolbox	Version 2.0	(R12)	01-Aug-2000
Financial Derivatives Toolbox	Version 1.0	(R12)	14-Aug-2000
Financial Time Series Toolbox	Version 1.0	(R12)	01-Apr-1999
Financial Toolbox	Version 2.1.2	(R12)	01-Sep-2000
Fixed-Point Blockset	Version 3.0	(R12)	26-May-2000
Fuzzy Logic Toolbox	Version 2.1	(R12)	15-Jun-2000
GARCH Toolbox	Version 1.0	(R12)	01-Jun-1999
Image Processing Toolbox	Version 2.2.2	(R12)	10-Mar-2000
Instrument Control Toolbox	Version 1.0	(R12)	01-Sep-2000
LMI Control Toolbox	Version 1.0.6	(R12)	12-Jun-2000
MATLAB Compiler	Version 2.1	(R12)	26-Jul-2000
MATLAB Report Generator	Version 1.1	(R12)	01-Apr-2000
Mapping Toolbox	Version 1.2	(R12)	22-May-2000
Model Predictive Control Toolbox	Version 1.0.5	(R12)	10-May-2000
Motorola DSP Developer's Kit	Version 1.1	(R12)	01-Sep-2000
Mi-Analysis and Synthesis Toolbox	Version 3.0.5	(R12)	12-Jun-2000
Neural Network Toolbox	Version 4.0	(R12)	26-May-2000
Nonlinear Control Design Blockset	Version 1.1.4	(R12)	12-Jun-2000
Optimization Toolbox	Version 2.1	(R12)	07-Jun-2000
Partial Differential Equation Toolbox	Version 1.0.3	(R12)	31-Dec -1999
Power System Blockset	Version 2.1	(R12)	12-Jun-2000
Real-Time Workshop Ada Coder	Version 4.0	(R12)	01-Mar-2000
Real-Time Workshop Embedded Coder	Version 1.0	(R12)	01-Mar-2000
Requirements Management Interface	Version 1.0.1	(R12)	03-Mar-2000
Robust Control Toolbox	Version 2.0.7	(R12)	10-May-2000
SB2SL (converts SystemBuild to Simu)	Version 2.1	(R12)	16-Jun-2000
Signal Processing Toolbox	Version 5.0	(R12)	01-Jun-2000
Simulink Accelerator	Version 1.0	(R12)	01-Mar-2000
Model Differencing for Simulink and...	Version 1.0	(R12)	19-Jul-2000

Simulink Model Coverage Tool	Version 1.0	(R12)	02-Jun-2000
Simulink Report Generator	Version 1.1	(R12)	01-Apr-2000
Spline Toolbox	Version 3.0	(R12)	13-Mar-2000
Statistics Toolbox	Version 3.0	(R12)	01-Sep-2000

***Simulink for Windows.*** Пакет розширення Simulink служить для імітаційного моделювання моделей, що складаються із графічних блоків із заданими властивостями (параметрами). Компоненти моделей, у свою чергу, є графічними блоками й моделями, які зберігаються в ряді бібліотек і за допомогою миші можуть переноситися в основне вікно й з'єднуватися один з одним необхідними зв'язками.

До складу моделей можуть включатися джерела сигналів різного виду, віртуальні прилади для реєстрації, графічні засоби анімації. Подвійним натисканням мишею на блоці моделі виводиться вікно зі списком його параметрів, які користувач може змінювати. Запуск імітації забезпечує математичне моделювання побудованої моделі з візуальним поданням результатів. Пакет заснований на побудові блокових схем шляхом переносу блоків з бібліотеки компонентів у вікно редагування створюваної користувачем моделі. Потім модель запускається на виконання. Можливе моделювання складних систем, що складаються з безлічі підсистем.

Simulink зіставляє і вирішує рівняння стану моделі й дозволяє підключати в потрібні її крапки різноманітні віртуальні вимірювальні прилади.

Попередня версія пакета досить докладно описана в книгах. Основним нововведенням є обробка матричних сигналів. Додано окремі пакети підвищення продуктивності Simulink, такі як Simulink Accelerator для компіляції коду моделей, Simulink profiler для аналізу коду тощо.

***Real Time Windows Target й Workshop.*** Підключається до Simulink потужна підсистема імітаційного моделювання в реальному масштабі часу (при наявності додаткових апаратних засобів у вигляді плат розширення комп'ютера), представлена пакетами розширення Real Time Windows Target й Workshop, є потужним засобом керування реальними об'єктами й системами. Крім того, ці розширення дозволяють створювати виконавчі коди моделей. У компонентах моделей Simulink можна задавати не тільки фіксовані параметри, але й математичні співвідношення, що описують поведінку моделей.

***Report Generator для MATLAB і Simulink.*** Генератори звітів –

засіб, уведений ще в MATLAB 5.3.1, подає інформацію про роботу системи MATLAB і пакета розширення Simulink. Цей засіб дуже корисний при налагодженні складних обчислювальних алгоритмів або при моделюванні складних систем. Генератори звітів запускаються командою Report. Звіти можуть бути представлені у вигляді програм і редагуватися. Генератори звітів можуть запускати вхідні у звіти команди й фрагменти програм і дозволяють проконтролювати складні обчислення.

**Neural Networks Toolbox.** Пакет прикладних програм, що містять засоби для побудови нейронних мереж, які базуються на поведінці математичного аналога нейрона. Пакет забезпечує ефективну підтримку проектування, навчання й моделювання безлічі відомих мережних парадигм, від базових моделей перцептрона до найсучасніших асоціативних і мереж, що самоорганізуються. Пакет може бути використаний для дослідження й застосування нейронних мереж до таких завдань, як обробка сигналів, нелінійне керування й фінансове моделювання. Забезпечено можливість генерації переносного Сі-коду за допомогою Real Time Workshop.

У пакет включені більше ніж 15 відомих типів мереж і навчальних правил, що дозволяють користувачу вибирати найбільш оптимальну для конкретного додатка або дослідницького завдання парадигму. Для кожного типу архітектури й навчальних правил є функції ініціалізації, навчання, адаптації, створення й моделювання, демонстрації й приклад додатка мережі.

Для керованих мереж можна вибрати пряму або рекуррентну архітектуру, використовуючи безліч навчальних правил і методів проектування, таких як перцептрон, зворотне поширення, зворотне поширення Левенберга, мережі з радіальним базисом і рекуррентні мережі. Можна легко змінювати будь-які архітектури, навчальні правила або перехідні функції, додавати нові і все це без написання єдиного рядка на Сі або ФОРТРАН.

**Fuzzy Logic Toolbox.** Пакет прикладних програм Fuzzy Logic відноситься до теорії нечітких (розмитих) множин. Забезпечується підтримка сучасних методів нечіткої кластеризації й адаптивних нечітких нейронних мереж. Графічні засоби пакета дозволяють інтерактивно відстежувати особливості поведінки системи. Основні можливості пакета: визначення змінних, нечітких правил і функцій приналежності; інтерактивний перегляд нечіткого логічного висновку; сучасні методи: адаптивний нечіткий висновок з використанням

нейронних мереж, нечітка кластеризація; інтерактивне динамічне моделювання в Simulink; генерація переносного Сі-коду за допомогою Real-Time Workshop. Цей приклад наочно демонструє відмінності в поведінці моделі при обліку нечіткої логіки й без такого обліку.

***Symbolic Math Toolbox***. Пакет прикладних програм, що дають системі MATLAB принципово нові можливості – можливості розв'язання завдань у символьному (аналітичному) вигляді, включаючи реалізацію точної арифметики довільної розрядності. Пакет базується на застосуванні ядра символьної математики однієї з найпотужніших систем комп'ютерної алгебри – Maple V R4. Забезпечує виконання символьного диференціювання й інтегрування, обчислення сум і добутків, розкладання в ряди Тейлора й Маклорена, операції зі степеневими багаточленами (поліномами), обчислення коренів поліномів, розв'язання в аналітичному вигляді нелінійних рівнянь, різноманітні символьні перетворення, підстановки тощо. Має команди прямого доступу до ядра системи Maple V. Пакет дозволяє готувати процедури із синтаксисом мови програмування системи Maple V R4 і встановлювати їх у системі MATLAB. На жаль, можливостями символьної математики пакет сильно поступається спеціалізованим системам комп'ютерної алгебри, наприклад, новітнім версіям Maple і Mathematica.

## ПАКЕТИ МАТЕМАТИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

До MATLAB входить безліч пакетів розширення, що підсилюють математичні можливості системи та підвищують швидкість, ефективність і точність обчислень.

***NAG Foundation Toolbox*** – одна з найпотужніших бібліотек математичних функцій, створена спеціальною групою The Numerical Algorithms Group, Ltd. Пакет містить сотні нових функцій. Назви функцій і синтаксис їхнього виклику запозичені з відомої бібліотеки NAG Foundation Library. Внаслідок цього досвідчені користувачі NAG ФОРТРАН можуть без ускладнень працювати з пакетом NAG у MATLAB. Бібліотека NAG Foundation надає свої функції у вигляді об'єктних кодів і відповідних m-файлів для їхнього виклику. Користувач може легко модифікувати ці Mex-файли на рівні вихідного коду.

Пакет забезпечує наступні можливості:

корні багаточленів і модифікований метод Лагерра;

обчислення суми ряду: дискретне й ермитово-дискретне перетворення Фур'є;

звичайні диференціальні рівняння: методи Адамса й Рунге-Кутта; рівняння у частинних похідних; інтерполяція;

обчислення власних значень і векторів, сингулярних чисел, підтримка комплексних і дійсних матриць;

апроксимація кривих і поверхонь: поліноми, кубічні сплайни, поліноми Чебишева;

мінімізація й максимізація функцій: лінійне й квадратичне програмування, екстремуми функцій декількох змінних;

розкладання матриць;

рішення систем лінійних рівнянь;

лінійні рівняння (LAPACK);

статистичні розрахунки, зокрема описова статистика й розподіли ймовірностей;

кореляційний і регресійний аналіз: лінійні, багатомірні й узагальнені лінійні моделі;

багатомірні методи: головних компонентів, ортогональні обертання;

генерація випадкових чисел: нормальний розподіл, розподіли Пуассона, Вейбулла й Коці;

непараметричні статистики: Фрідмана, Крускала-Уолліса, Манна-Уїтні;

тимчасові ряди: одномірні й багатомірні;

апроксимації спеціальних функцій: інтегральна експонента, гамма-функція, функції Бесселя й Ганкеля.

Нарешті, цей пакет дозволяє користувачеві створювати програми на ФОРТРАН, які динамічно лінкуються з MATLAB.

***Spline Toolbox*** – пакет прикладних програм для роботи зі сплайнами. Підтримує одновимірну, двовимірну й багатовимірну сплайн-інтерполяцію й апроксимацію. Забезпечує подання й відображення складних даних і підтримку графіки. Пакет дозволяє виконувати інтерполяцію, апроксимацію й перетворення сплайнів з В-форми в кусочно-поліноміальну, інтерполяцію кубічними сплайнами й згладжування, виконання операцій над сплайнами: обчислення похідної, інтеграла й відображення.

Пакет Spline оснащений програмами роботи з В-сплайнами, описаними в роботі "A Practical Guide to Splines" Карлом Дебуром,

творцем сплайнів й автором пакета Spline. Функції пакета разом із мовою MATLAB і докладним керівництвом користувача полегшують розуміння сплайнів та їхнє ефективне застосування до розв'язання різноманітних завдань.

У пакет включені програми для роботи із двома найбільш розповсюдженими формами подання сплайнів: B-формою й кусочно-поліноміальною формою. B-форма зручна на етапі побудови сплайнів, у той час як кусочно-поліноміальна форма більш ефективна під час постійної роботи зі сплайном. Пакет має функції для створення, відображення, інтерполяції, апроксимації й обробки сплайнів у B-формі й у вигляді відрізків поліномів.

**Statistics Toolbox** – пакет прикладних програм зі статистики, що значно розширює можливості системи MATLAB в області реалізації статистичних обчислень і статистичної обробки даних. Містить досить представницький набір засобів генерації випадкових чисел, векторів, матриць і масивів з різними законами розподілу, а також безліч статистичних функцій. Слід зазначити, що найпоширеніші статистичні функції входять до складу ядра системи MATLAB (у тому числі функції генерації випадкових даних з рівномірним і нормальним розподілом). Основні можливості пакета: описова статистика; розподіл ймовірностей; оцінка параметрів й апроксимація; перевірка гіпотез; множинна регресія; інтерактивна покрокова регресія; моделювання Монте-Карло; апроксимація на інтервалах; статистичне керування процесами; планування експерименту; моделювання поверхні відгуку; апроксимація нелінійної моделі; аналіз головних компонентів; статистичні графіки; графічний інтерфейс користувача.

Пакет включає 20 різних розподілів ймовірностей, включаючи  $t$  (Стюдента), F- та  $\chi^2$ -квадрат. Підбір параметрів, графічне відображення розподілів і спосіб обчислення кращих апроксимацій надаються для всіх типів розподілів. Передбачено безліч інтерактивних інструментів для динамічної візуалізації й аналізу даних. Є спеціалізовані інтерфейси для моделювання поверхні відгуку, візуалізації розподілів, генерації випадкових чисел і ліній рівня.

**Optimization Toolbox** – пакет прикладних завдань для розв'язання оптимізаційних завдань і систем нелінійних рівнянь. Підтримує основні методи оптимізації функцій ряду змінних: безумовна оптимізація нелінійних функцій; метод найменших квадратів і нелінійна інтерполяція; розв'язання нелінійних рівнянь; лінійне програмування;

квадратичне програмування; умовна мінімізація нелінійних функцій; метод мінімакса; багатокритеріальна оптимізація.

Різноманітні приклади демонструють ефективне застосування функцій пакета. З їхньою допомогою можна також порівняти, як одне й те саме завдання розв'язується різними методами.

***Partial Differential Equations Toolbox*** – досить важливий пакет прикладних програм, що містить безліч функцій для розв'язання систем диференціальних рівнянь у частинних похідних. Дає ефективні засоби для розв'язання таких систем рівнянь, у тому числі жорстких. У пакеті використовується метод кінцевих елементів. Команди й графічний інтерфейс пакета можуть бути використані для математичного моделювання рівнянь у частинних похідних стосовно широкого класу інженерних і наукових додатків, включаючи завдання опору матеріалів, розрахунки електромагнітних пристроїв, завдання тепломасоперенесення й дифузії. Основні можливості пакета: овноцінний графічний інтерфейс для обробки рівнянь із частковими похідними другого порядку; автоматичний й адаптивний вибір сітки; завдання граничних умов: Діріхле, Неймана й змішаних; гнучка постановка завдання з використанням синтаксису MATLAB; повністю автоматична сіткова розбивка й вибір величини кінцевих елементів; нелінійні й адаптивні розрахункові схеми; можливість візуалізації полів різних параметрів і функцій розв'язання, демонстрація прийнятої розбивки й анімаційні ефекти.

Пакет інтуїтивно слідує шести крокам розв'язання PDE за допомогою методу кінцевих елементів. Ці кроки й відповідні режими пакета такі: визначення геометрії (режим малювання), завдання граничних умов (режим граничних умов), вибір коефіцієнтів, що визначають завдання (режим PDE), дискретизація кінцевих елементів (режим сітки), завдання початкових умов і розв'язання рівнянь (режим розв'язання), наступна обробка розв'язку (режим графіки).

## ПАКЕТИ АНАЛІЗУ Й СИНТЕЗУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Control System Toolbox. Пакет Control System призначений для моделювання, аналізу й проектування систем автоматичного керування – як безперервних, так і дискретних. Функції пакета реалізують традиційні методи передаточних функцій і сучасні методи простору станів. Частотні й тимчасові відгуки, діаграми розташування нулів



і полюсів можуть бути швидко обчислені й відображені на екрані. У пакеті реалізовані: повний набір засобів для аналізу МІМО-систем (безліч входів – безліч виходів систем); тимчасові характеристики: передатна й перехідна функції, реакція на довільний вплив; частотні характеристики: діаграми Боде, Ніколса, Найквіста та ін.; розробка зворотних зв'язків; проектування LQR-, LQE-регуляторів; характеристики моделей: керованість, спостереження, зниження порядку моделей; підтримка систем із запізнюванням.

Додаткові функції побудови моделей дозволяють конструювати більш складні моделі. Часовий відгук може бути розрахований для імпульсного входу, одиничного стрибка або довільного вхідного сигналу. Є також функції для аналізу сингулярних чисел.

Інтерактивне середовище для порівняння тимчасового й частотного відгуку систем надає користувачеві графічні керуючі елементи для одночасного відображення відгуків і перемикання між ними. Можна обчислювати різні характеристики відгуків, такі, як час розгону й час регулювання.

Пакет Control System містить засоби для вибору параметрів зворотного зв'язку. Серед традиційних методів: аналіз особливих точок, визначення коефіцієнта підсилення й загасання. Серед сучасних методів: лінійно-квадратичне регулювання й ін. Пакет Control System містить велику кількість алгоритмів для проектування й аналізу систем керування. Крім того, він володіє настроювальним оточенням й дозволяє створювати свої власні m-файли.

**Nonlinear Control Design Toolbox.** Nonlinear Control Design (NCD) Blockset реалізує метод динамічної оптимізації для проектування систем керування. Цей інструмент, розроблений для використання з Simulink, автоматично набудовує системні параметри, ґрунтуючись на заданих користувачем обмеженнях на тимчасові характеристики.

Пакет використовує перенос об'єктів мишею для зміни тимчасових обмежень прямо на графіках, що дозволяє легко набудовувати змінні й указувати невизначені параметри, забезпечує інтерактивну оптимізацію, реалізує моделювання методом Монте-Карло, підтримує проектування SISO- (один вхід – один вихід) і МІМО-систем керування, дозволяє моделювати заглушення перешкод, спостереження й інші типи відгуків, підтримує проблеми повторюваного параметра й завдання керування системами із запізнюванням, дозволяє здійснювати вибір між задоволеними й недосяжними обмеженнями.

**Robust Control Toolbox.** Пакет Robust Control включає засоби для проектування й аналізу багатопараметричних стійких систем керування. Це системи з помилками моделювання, динаміка яких відома не повністю або параметри яких можуть змінюватися в ході моделювання. Потужні алгоритми пакета дозволяють виконувати складні обчислення з урахуванням зміни безлічі параметрів. Пакет має такі можливості: синтез LQG-регуляторів на основі мінімізації рівномірної й інтегральної норми; багатопараметричний частотний відгук; побудова моделі простору станів; перетворення моделей на основі сингулярних чисел; зниження порядку моделі; спектральна факторизація.

Пакет Robust Control базується на функціях пакета Control System, одночасно надаючи вдосконалений набір алгоритмів для проектування систем керування. Пакет забезпечує перехід від сучасної теорії керування до практичних додатків. Він має безліч функцій, що реалізують сучасні методи проектування й аналізу багатопараметричних робостних регуляторів.

Прояви невизначеностей, що порушують стійкість систем, різноманітні – шуми й збурювання в сигналах, неточність моделі передаточної функції – немодельюча нелінійна динаміка. Пакет Robust Control дозволяє оцінити багатопараметричну границю стійкості при різних невизначеностях. Серед використовуваних методів: алгоритм Перрона, аналіз особливостей передатних функцій й ін.

Пакет Robust Control забезпечує різні методи проектування зворотних зв'язків, серед яких: LQR, LQG, LQG/LTR й ін. Необхідність зниження порядку моделі виникає в декількох випадках: зниження порядку об'єкта, зниження порядку регулятора, моделювання більших систем. Якісна процедура зниження порядку моделі повинна бути чисельно стійка. Процедури, включені в пакет Robust Control, успішно виконують ці завдання.

**Model Predictive Control Toolbox.** пакет Model Predictive Control містить повний набір засобів для реалізації стратегії предикативного (упереджувального) керування. Ця стратегія була розроблена для розв'язання практичних завдань керування складними багатоканальними процесами при наявності обмежень на змінні стану й керування. Методи предикативного керування використовуються в хімічній промисловості й для керування іншими безперервними процесами. Пакет забезпечує: моделювання, ідентифікацію й діагностику систем; підтримку MISO (багато входів – один вихід), MIMO, перехідних

характеристик, моделей простору станів; системний аналіз; конвертування моделей у різні форми подання (простір станів, передатні функції); надання підручників і демонстраційних прикладів.

Предикативний підхід до завдань керування використовує явну лінійну динамічну модель об'єкта для прогнозування впливу майбутніх змін керуючих змінних на поведінку об'єкта. Проблема оптимізації формулюється у вигляді завдання квадратичного програмування з обмеженнями, розв'язуваної на кожному етапі моделювання заново. Пакет дозволяє створювати й тестувати регулятори як для простих, так і для складних об'єктів.

Пакет містить більше півсотні спеціалізованих функцій для проектування, аналізу й моделювання динамічних систем з використанням предикативного керування. Він підтримує наступні типи систем: імпульсні, безперервні й дискретні за часом, простір станів. Обробляються різні види збурювань. Крім того, у модель можуть бути явно включені обмеження на вхідні й вихідні змінні.

Засоби моделювання дозволяють здійснювати спостереження й стабілізацію. Засоби аналізу включають обчислення полюсів замкнутого контуру, частотного відгуку, інші характеристики системи керування. Для ідентифікації моделі в пакеті є функції взаємодії з пакетом System Identification. Пакет також включає дві функції Simulink, що дозволяють тестувати нелінійні моделі.

**Mi-Analysis and Synthesis.** Пакет Mi-Analysis and Synthesis містить функції для проектування стійких систем керування. Пакет використовує оптимізацію в рівномірній нормі й сингулярний параметр  $i$ . У цей пакет включений графічний інтерфейс для спрощення операцій із блоками при проектуванні оптимальних регуляторів. Пакет має такі властивості: проектування регуляторів, оптимальних у рівномірній й інтегральній нормі; оцінка дійсного й комплексного сингулярного параметра  $\mu$ ; D-K-ітерації для наближеного Mi-синтезу; графічний інтерфейс для аналізу відгуку замкнутого контуру; засоби зниження порядку моделі; безпосереднє зв'язування окремих блоків більших систем.

Модель простору станів може бути створена й проаналізована на основі системних матриць. Пакет підтримує роботу з безперервними й дискретними моделями. Пакет має повноцінний графічний інтерфейс, що включає в себе можливість установлювати діапазон ввідних даних, спеціальне вікно для редагування властивостей D-K-ітерацій і графічне подання частотних характеристик. Має функції

для матричного додавання, множення, різних перетворень й інших операцій над матрицями. Забезпечує можливість зниження порядку моделей.

**Stateflow** – пакет моделювання подійно-керованих систем, заснований на теорії кінцевих автоматів. Цей пакет призначений для використання разом з пакетом моделювання динамічних систем Simulink. У будь-яку Simulink-модель можна вставити Stateflow-діаграму (або SF-діаграму), що буде відображати поведінку компонентів об'єкта (або системи) моделювання. SF-діаграма є анімаційною. По її блоках і зв'язках, що виділяються кольором, можна простежити всі стадії роботи моделюючої системи або пристрою й поставити її роботу в залежність від тих або інших подій.

**Quantitative Feedback Theory Toolbox.** Пакет містить функції для створення робостних (стійких) систем зі зворотним зв'язком. Quantitative feedback Theory (QFT, кількісна теорія зворотних зв'язків) – інженерний метод, що використовує частотну підстановку моделей для задоволення різних вимог до якості при наявності невизначених характеристик об'єкта. В основі методу лежить спостереження, що зворотний зв'язок необхідний у тих випадках, коли деякі характеристики об'єкта невизначені й/або на його вхід подаються невідомі збурювання. Пакету властиві такі можливості: оцінка частотних границь невизначеності, властиві зворотному зв'язку; графічний інтерфейс користувача, що дозволяє оптимізувати процес знаходження необхідних параметрів зворотного зв'язку; функції для визначення впливу різних блоків, що вводять у модель (мультиплексорів, суматорів, петель зворотного зв'язку), при наявності невизначеностей; підтримка моделювання аналогових і цифрових контурів зворотного зв'язку, каскадів і багатоконтурних схем; допуск невизначеності в параметрах об'єкта з використанням параметричних і непараметричних моделей або комбінації цих типів моделей.

Теорія зворотних зв'язків є природним продовженням класичного частотного підходу до проектування. Її основна мета – проектування простих регуляторів невеликого порядку з мінімальною шириною смуги пропускання, що задовольняють якісним характеристикам при наявності невизначеностей.

Пакет дозволяє обчислювати різні параметри зворотних зв'язків, фільтрів, проводити тестування регуляторів як у безперервному, так і у дискретному просторі. Має зручний графічний інтерфейс, що дозволяє створювати прості регулятори, які задовольняють вимоги користувача.

QFT дозволяє проектувати регулятори, що задовольняють різним вимогам, незважаючи на зміни параметрів моделі. Вимірювані дані можуть бути безпосередньо використані для проектування регуляторів, без необхідності ідентифікації складного відгуку системи.

**LMI Control Toolbox.** Пакет Linear Matrix Inequality Control (LMI Control) забезпечує інтегроване середовище для постановки й розв'язання завдань лінійного програмування. Призначений спочатку для проектування систем керування пакет дозволяє розв'язувати будь-які завдання лінійного програмування практично в будь-якій сфері діяльності, де вони виникають. Основні можливості пакета: розв'язання завдань лінійного програмування (завдання спільності обмежень, мінімізація лінійних цілей при наявності лінійних обмежень, мінімізація власних значень); дослідження завдань лінійного програмування; графічний редактор завдань лінійного програмування; завдання обмежень у символічному вигляді; багатокритерійне проектування регуляторів; перевірка стійкості: квадратична стійкість лінійних систем, стійкість по Ляпунову, перевірка критерію Попова для нелінійних систем.

Пакет LMI Control містить сучасні симплексні алгоритми для розв'язання завдань лінійного програмування. Використовує структурне подання лінійних обмежень, що підвищує ефективність і мінімізує вимоги до пам'яті. Пакет має спеціалізовані засоби для аналізу й проектування систем керування на основі лінійного програмування.

За допомогою розв'язувачів завдань лінійного програмування можна легко виконувати перевірку стійкості динамічних систем і систем з нелінійними компонентами. Раніше цей вид аналізу вважався занадто складним для реалізації. Пакет дозволяє навіть таке комбінування критеріїв, що раніше розв'язувалося лише за допомогою евристичних підходів.

Пакет є потужним засобом для розв'язання опуклих завдань оптимізації, що виникають у таких областях, як керування, ідентифікація, фільтрація, структурне проектування, теорія графів, інтерполяція й лінійна алгебра. Пакет LMI Control включає два види графічного інтерфейсу користувача: редактор завдання лінійного програмування (LMI Editor) та інтерфейс Magshape. LMI Editor дозволяє задавати обмеження в символічному вигляді, а Magshape забезпечує користувача зручними засобами роботи з пакетом.

## ПАКЕТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИСТЕМ

**System Identification Toolbox.** Пакет System Identification містить засоби для створення математичних моделей динамічних систем на основі спостережуваних вхідних і вихідних даних. Він має гнучкий графічний інтерфейс, що допомагає організувати дані й створювати моделі. Методи ідентифікації, що входять у пакет, застосовні розв'язання широкого класу завдань: від проектування систем керування й обробки сигналів до аналізу тимчасових рядів і вібрації. Основні властивості пакета: простий і гнучкий інтерфейс; попередня обробка даних, зокрема попередня фільтрація, видалення трендів і зсувів; вибір діапазону даних для аналізу; методи авторегресії; аналіз відгуку в тимчасовій і частотній області; відображення нулів і полюсів передаточної функції системи; аналіз нев'язок при тестуванні моделі; побудова складних діаграм, таких як діаграма Найквіста й ін.

Графічний інтерфейс спрощує попередню обробку даних, а також діалоговий процес ідентифікації моделі. Можлива також робота з пакетом у командному режимі й із застосуванням розширення Simulink. Операції завантаження й збереження даних, вибору діапазону, видалення зсувів і трендів виконуються з мінімальними зусиллями й перебувають у головному меню.

Подання даних й ідентифікованих моделей графічно організовано таким чином, що в процесі інтерактивної ідентифікації користувач легко може повернутися до попереднього кроку роботи. Для новачків існує можливість переглядати наступні можливі кроки. Фахівцеві графічні засоби дозволяють відшукати кожен з раніше отриманих моделей й оцінити її якість у порівнянні з іншими моделями.

Почавши з виміру виходу й входу, можна створити параметричну модель системи, що описує її поведінку в динаміці. Пакет підтримує всі традиційні структури моделей, включаючи авторегресію, структуру Бокса-Дженкінса й ін. Він підтримує лінійні моделі простору станів, які можуть бути визначені як у дискретному, так і у безперервному просторі. Ці моделі можуть містити довільне число входів і виходів. Пакет має функції, які можна використати як тестові дані для ідентифікованих моделей.

Ідентифікація лінійних моделей широко використовується при проектуванні систем керування, коли потрібно створити модель об'єкта. У завданнях обробки сигналів моделі можуть бути використані

для адаптивної обробки сигналів. Методи ідентифікації успішно застосовуються й для фінансових додатків.

**Frequency Domain System Identification Toolbox.** Пакет Frequency Domain System Identification надає спеціалізовані засоби для ідентифікації лінійних динамічних систем по їх тимчасовому або частотному характеру. Частотні методи спрямовані на ідентифікацію безперервних систем, що є потужним доповненням до більш традиційної дискретної методики. Методи пакета можуть бути застосовані до таких завдань, як моделювання електричних, механічних й акустичних систем. Пакет має такі властивості: періодичні збурювання, пік-фактор, оптимальний спектр, псевдовипадкові й дискретні двійкові послідовності; розрахунок довірчих інтервалів амплітуди й фази, нулів і полюсів; ідентифікація безперервних і дискретних систем з невідомим запізнюванням; діагностика моделі, включаючи моделювання й обчислення нев'язань; перетворення моделей у формат System Identification Toolbox і навпаки.

Використовуючи частотний підхід, можна домогтися найкращої моделі в частотній області, уникнути помилок дискретизації, легко виділяти постійну складову сигналу, істотно поліпшити відношення сигнал-шум. Для одержання збурюючих сигналів пакет надає функції генерації двійкових послідовностей, мінімізації величини піка й поліпшення спектральних характеристик. Пакетом забезпечується ідентифікація безперервних і дискретних лінійних статичних систем, автоматична генерація вхідних сигналів, а також графічне зображення нулів і полюсів передатної функції результуючої системи. Функції для тестування моделі включають обчислення нев'язань, передатних функцій, нулів і полюсів, прогін моделі з використанням тестових даних.

## ДОДАТКОВІ ПАКЕТИ РОЗШИРЕННЯ MATLAB

**Communications Toolbox.** Пакет прикладних програм для побудови й моделювання різноманітних телекомунікаційних пристроїв: цифрових ліній зв'язку, модемів, перетворювачів сигналів й ін. Має найбагатший набір моделей різноманітних пристроїв зв'язку й телекомунікацій. Містить ряд цікавих прикладів моделювання комунікаційних засобів, наприклад модему, що працює по протоколу v34, модулятора для забезпечення однополосних модуляції та ін.

**Digital Signal Processing (DSP) Blockset.** Пакет прикладних

програм для проектування пристроїв, що використовують процесори цифрової обробки сигналів. Це насамперед високоефективні цифрові фільтри із заданою або адаптивною до параметрів сигналів частотною характеристикою (АЧХ). Результати моделювання й проектування цифрових пристроїв за допомогою цього пакета можуть використовуватися для побудови високоефективних цифрових фільтрів на сучасних мікропроцесорах цифрової обробки сигналів.

**Fixed-Point Blockset.** Цей спеціальний пакет орієнтований на моделювання цифрових систем керування й цифрових фільтрів у складі пакета Simulink. Спеціальний набір компонентів дозволяє швидко переключатися між обчисленнями з фіксованою й плаваючою коми (точки). Можна вказувати 8-, 16- або 32-бітову довжину слова. Пакет має ряд властивостей: застосування беззнакової або двійкової арифметики; вибір користувачем положення двійкової точки; автоматична установка положення двійкової точки; перегляд максимального й мінімального діапазонів сигналу моделі; переключення між обчисленнями з фіксованою й плаваючою крапкою; корекція переповнення й наявність ключових компонентів для операцій з фіксованою точкою; логічні оператори, одно- і двовимірні довідкові таблиці.

## ПАКЕТИ ДЛЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ І ЗОБРАЖЕНЬ

**Signal Processing Toolbox.** Потужний пакет з аналізу, моделювання й проектування пристроїв обробки різних сигналів, забезпечення їхньої фільтрації й безлічі перетворень.

Пакет Signal Processing забезпечує надзвичайно великі можливості створення програм обробки сигналів для сучасних наукових і технічних додатків. У пакеті використовується різноманітна техніка фільтрації й новітні алгоритми спектрального аналізу. Пакет містить модулі для розробки лінійних систем й аналізу тимчасових рядів. Пакет буде корисний, зокрема, у таких областях, як обробка аудіо- і відеоінформації, телекомунікація, геофізика, завдання керування в реальному режимі часу, економіка, фінанси й медицина. Основними властивостями пакета є: моделювання сигналів і лінійних систем; проектування, аналіз і реалізація цифрових й аналогових фільтрів; швидке перетворення Фур'є, дискретне косинусне й інші перетворення; оцінка спектрів і статистична обробка сигналів; параметрична обробка тимчасових рядів; генерація сигналів різної форми.



Пакет Signal Processing – ідеальна оболонка для аналізу й обробки сигналів. У ньому використовуються перевірені практикою алгоритми, обрані за критеріями максимальної ефективності й надійності. Пакет містить широкий спектр алгоритмів для подання сигналів і лінійних моделей. Цей набір дозволяє користувачеві досить гнучко підходити до створення сценарію обробки сигналів. Пакет включає в себе алгоритми для перетворення моделі з одного подання в інше.

Пакет Signal Processing містить повний набір методів для створення цифрових фільтрів з різноманітними характеристиками. Він дозволяє швидко розробляти фільтри верхніх і нижніх частот, смугові пропускні й затримуючі фільтри, багатослужбні фільтри, у тому числі фільтри Чебишева, Юла-Уолкера, еліптичні та ін.

Графічний інтерфейс дозволяє проектувати фільтри, задаючи вимоги до них у режимі переносу об'єктів мишею. У пакет включені наступні нові методи проектування фільтрів: узагальнений метод Чебишева для створення фільтрів з нелінійною фазовою характеристикою, комплексними коефіцієнтами або довільним відкликом. Алгоритм розроблений Макленаном і Карамом в 1995 р.; метод найменших квадратів з обмеженнями дозволяє користувачеві ретельно контролювати максимальну помилку (згладжування); метод розрахунку мінімального порядку фільтра з вікном Кайзера; узагальнений метод Баттерворта для проектування низькочастотних фільтрів з максимально однорідними смугами пропускання й загасання.

Заснований на оптимальному алгоритмі швидкого перетворення Фур'є пакет Signal Processing має неперевершені характеристики для частотного аналізу й спектральних оцінок. Пакет містить функції для обчислення дискретного перетворення Фур'є, дискретного косинусного перетворення, перетворення Гільберта й інших перетворень, які часто застосовуються для аналізу, кодування й фільтрації. У пакеті реалізовані такі методи спектрального аналізу, як метод Вельха, метод максимальної ентропії та ін.

Новий графічний інтерфейс дозволяє переглядати й візуально оцінювати характеристики сигналів, проектувати й застосовувати фільтри, робити спектральний аналіз, досліджуючи вплив різних методів й їхніх параметрів на одержуваний результат. Графічний інтерфейс особливо корисний для візуалізації тимчасових рядів, спектрів, тимчасових і частотних характеристик, розташування нулів і полюсів передатних функцій систем.

Пакет Signal Processing є основою для розв'язання багатьох інших завдань. Наприклад, комбінуючи його з пакетом Image Processing, можна обробляти й аналізувати двовимірні сигнали й зображення. У парі з пакетом System Identification пакет Signal Processing дозволяє виконувати параметричне моделювання систем у тимчасовій області. У сполученні з пакетами Neural Network й Fuzzy Logic може бути створено безліч засобів для обробки даних або виділення класифікаційних характеристик. Засіб генерації сигналів дозволяє створювати імпульсні сигнали різної форми.

**Higher-Order Spectral Analysis Toolbox.** Пакет Higher-Order Spectral Analysis містить спеціальні алгоритми для аналізу сигналів з використанням моментів вищого порядку. Пакет надає широкі можливості для аналізу негаусових сигналів, тому що містить алгоритми, мабуть, найбільш передових методів для аналізу й обробки сигналів. Основні можливості пакета: оцінка спектрів високого порядку; традиційний або параметричний підхід; відновлення амплітуди й фази; адаптивне лінійне прогнозування; відновлення гармонік; оцінка запізнювання; блокова обробка сигналів.

Пакет Higher-Order Spectral Analysis дозволяє аналізувати сигнали, ушкоджені негаусовим шумом, і процеси, що відбуваються в нелінійних системах. Спектри високого порядку, обумовлені в термінах моментів високого порядку сигналу, містять додаткову інформацію, що неможливо одержати, користуючись тільки аналізом автокореляції або спектра потужності сигналу. Спектри високого порядку дозволяють заглушити аддитивний кольоровий гаусів шум; ідентифікувати немінімально-фазові сигнали; виділити інформацію, обумовлену негаусовим характером шуму; виявити й проаналізувати нелінійні властивості сигналів.

Можливі додатки спектрального аналізу високого порядку включають акустику, біомедицину, економетрію, сейсмологію, океанографію, фізику плазми, радары й локатори. Основні функції пакета підтримують спектри високого порядку, взаємну спектральну оцінку, лінійні моделі прогнозу й оцінку запізнювання.

**Image Processing Toolbox.** Пакет Image Processing надає вченим, інженерам і навіть художникам широкий спектр засобів для цифрової обробки й аналізу зображень. Пакет тісно пов'язаний із середовищем розробки додатків MATLAB, а тому здатний звільнити користувача від виконання тривалих операцій кодування й налагодження алгоритмів і дозволити зосередити увагу на розв'язанні основного

наукового або практичного завдання. Основні властивості пакета: відновлення й виділення деталей зображень; робота з виділеною ділянкою зображення; аналіз зображення; лінійна фільтрація; перетворення зображень; геометричні перетворення; збільшення контрастності важливих деталей; бінарні перетворення; обробка зображень і статистика; колірні перетворення; зміна палітри; перетворення типів зображень.

Пакет Image Processing дає широкі можливості для створення й аналізу графічних зображень у середовищі MATLAB. Цей пакет забезпечує надзвичайно гнучкий інтерфейс, що дозволяє маніпулювати зображеннями, інтерактивно розробляти графічні картини, візуалізувати набори даних й анотувати (записувати) результати для технічних описів, доповідей і публікацій. Завдяки гнучкості поєднання алгоритмів пакета з такою особливістю MATLAB, як матрично-векторний опис, пакет дуже вдало розв'язує практично будь-які завдання з розробки й подання графіки. До MATLAB входять спеціально розроблені процедури, що дозволяють підвищити ефективність графічної оболонки, зокрема, інтерактивне налагодження при розробці графіки; профілювальник для оптимізації часу виконання алгоритму; засоби побудови інтерактивного графічного інтерфейсу користувача (GUI Builder) для прискорення розробки GUI-шаблонів, що дозволяють набудувати його під завдання користувача.

Пакет дозволяє користувачеві витратити значно менше часу й сил на створення стандартних графічних зображень і, таким чином, сконцентрувати зусилля на важливих деталях й особливостях зображень. MATLAB і пакет Image Processing максимально пристосовані для розвитку, впровадження нових ідей і методів користувача. Для цього є набір супроводжувальних пакетів спрямованих на розв'язання різних специфічних завдань і завдань у нетрадиційній постановці.

Пакет Image Processing у цей час інтенсивно використовується в більш ніж 4000 компаніях й університетах по всьому світі. Коло завдань, що розв'язуються за допомогою даного пакета, є дуже широким, наприклад космічні дослідження, військові розробки, астрономія, медицина, біологія, робототехніка, матеріалознавство, генетика тощо.

**Wavelet Toolbox.** Пакет Wavelet надає користувачеві повний набір програм для дослідження багатомірних нестационарних явищ за допомогою вейвлетів (коротких хвильових пакетів). Порівняно недавно створені методи пакета Wavelet розширюють можливості

в тих областях, де звичайно застосовується техніка Фур'є-розкладання. Пакет може бути застосований для таких додатків, як обробка мови й аудіосигналів, телекомунікація, геофізика, фінанси й медицина. Основними властивостями пакета є удосконалений графічний користувальницький інтерфейс і набір команд для аналізу, синтезу, фільтрації сигналів і зображень; перетворення багатомірних безперервних сигналів; дискретне перетворення сигналів; декомпозиція й аналіз сигналів і зображень; широкий вибір базисних функцій, зокрема корекція граничних ефектів; пакетна обробка сигналів і зображень; аналіз пакетів сигналів, заснований на ентропії; фільтрація з можливістю встановлення жорстких і нежорстких порогів; оптимальний стиск сигналів.

Використовуючи пакет, можна аналізувати такі особливості, які випускають інші методи аналізу сигналів, тобто тренди, викиди, розриви в похідних високих порядків. Пакет дозволяє стискати й фільтрувати сигнали без явних втрат навіть у тих випадках, коли потрібно зберегти високо- і низькочастотні компоненти сигналу. Є алгоритми стиску та фільтрації і для пакетної обробки сигналів. Програми стиску виділяють мінімальне число коефіцієнтів, що представляють вихідну інформацію найбільш точно, що дуже важливо для наступних стадій роботи системи стиску. У пакет включені наступні базисні набори вейвлетів: біртогональний, Хаара, "Мексиканський капелюх", Майера та ін. Також можна додати до пакета власні базиси.

## ІНШІ ПАКЕТИ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ

**Power System Blockset.** Пакет моделювання потужних енергетичних (в основному електротехнічних) систем, таких, як лінії передачі, силові ключі, регулятори напруги й струму, пристрою керування електродвигунами різного типу й нагрівальних систем. Цей пакет забезпечує моделювання широкого спектра енергетичних систем і пристроїв – починаючи з аналізу найпростіших електричних ланцюгів і закінчуючи моделюванням складних перетворювальних пристроїв і навіть цілих електричних систем. Результати моделювання відображаються різноманітними віртуальними вимірювальними приладами, такими як графобудівники, осцилографи та ін.

**Data Acquisition Toolbox й Instrument Control Toolbox.** Data Acquisition Toolbox – пакет розширення, що відноситься до області збору

даних через блоки, що підключають до внутрішньої шини комп'ютера, функціональних генераторів, аналізаторів спектра, тобто, приладів, широко використовуваних у дослідницьких цілях для одержання даних. Вони підтримані відповідною обчислювальною базою. Новий блок Instrument Control Toolbox дозволяє підключати прилади й пристрої з послідовним інтерфейсом і з інтерфейсами Канал загального користування й VXI.

**Database toolbox й Virtual Reality Toolbox.** Більше ніж у 100 разів підвищена швидкість роботи Database toolbox, за допомогою якого здійснюється обмін інформацією із цілим рядом систем керування базами даних через драйвери ODBC або JDBC: Oracle 7.3.3; Access 95 або 97 Microsoft; Microsoft SQL Server 6.5 або 7.0; Sybase Adaptive Server 11; Sybase (колишній Watcom) SQL Server Anywhere 5.0; IBM DB2 Universal 5.0; Informix 7.2.2; Computer Associates Ingres (усі версії).

Всі дані попередньо перетворюються до масиву комірок у MATLAB 6.0. У MATLAB 6.1 можна використати й масив структур. Візуальний конструктор (Visual Query Builder) дозволяє ставити як завгодно складні запити на діалектах мови SQL цих баз даних навіть без знання SQL. В одному сеансі може бути відкрито багато неоднорідних баз даних.

Пакет Virtual Reality Toolbox доступний починаючи з версії MATLAB 6.1. Дозволяє здійснювати тривимірну анімацію й мультиплікацію, у тому числі моделей Simulink. Мова програмування Virtual Reality Modeling Language (VRML) – мова моделювання віртуальної реальності. Перегляд анімації можливий з будь-якого комп'ютера, оснащеного браузером з підтримкою VRML. Підтверджує, що математика – наука про кількісні співвідношення й просторові форми будь-яких дійсних або віртуальних світів.

EXCEL LINK дозволяє використати Microsoft Excel 97 як процесор вводу-виводу MATLAB. Для цього досить установити в Excel як add-in функцію що поставляє Math Works файл excllinkxla. В Excel потрібно набрати "Сервіс > Налаштування > Обзор", вибрати файл у каталозі \MATLABr12\toolbox\exlink й установити його. Тепер при кожному запуску Excel з'явиться командне вікно MATLAB, а панель керування Excel доповниться кнопками getmatrix, putmatrix, evalstring. Для закриття MATLAB з Excel досить набрати =MLC1ose() у будь-якій комірці Excel. Для відкриття після виконання цієї команди потрібно або натиснути мишею на одну з кнопок getmatrix, putmatrix, evalstring або набрати в Excel "Сервіс > Макрос > Выполнить". Виділивши мишею

діапазон комірок Excel, можна натиснути на `getmatrix` і набрати ім'я змінної MATLAB – Матриця з'явиться в Excel. Заповнивши числами діапазон комірок Excel, ви можете виділити цей діапазон, натиснути на `putmatrix` і ввести ім'я змінної MATLAB. На відміну від MATLAB Excel Link не чутливий до регістра: I й i, J й j рівноцінні.

**MATLAB Compiler.** Компілятор для програм, створюваних мовою програмування системи MATLAB. Транслює коди цих програм у програми мовою Си++. Застосування компілятора забезпечує можливість створення виконавчих кодів, час виконання яких для програм з більшим числом циклічних операцій зменшується в 10–15 разів. Може інтегруватися в середовище Microsoft Visual Studio і використовуватися разом з Visual C++. Крім нього можна використати й інші компілятори Си++.

## ЗМІСТ

Вимоги до техніки безпеки .....	3
Лабораторна робота № 1. Ознайомлення з пакетом програм MATLAB.....	3
Лабораторна робота № 2. Дослідження характеристик типових динамічних ланок.....	8
Лабораторна робота № 3. Дослідження систем автоматичного регулювання із запізнюванням.....	20
Лабораторна робота № 4. Передаточні функції та характери- стики систем автоматичного керування.....	23
Лабораторна робота № 5. Аналіз лінійної системи автоматич- ного регулювання на ПЕОМ.....	28
Лабораторна робота № 6. Дослідження стійкості та якості лі- нійної безперервної системи автоматичного управління на ПЕОМ.....	32
Лабораторна робота № 7. Вивчення впливу зворотних зв'язків на характеристики динамічних ланок в системах автоматичного керування .....	36
Лабораторна робота № 8. Вивчення методів підвищення точ- ності в сталих режимах.....	41
Лабораторна робота № 9. Вплив послідовних коригуючих пристроїв на якість роботи систем автоматичного керування.....	45
Лабораторна робота № 10. Вплив жорстких та зворотних зв'язків на якість роботи систем автоматичного керування.....	48
Лабораторна робота № 11. Синтез паралельного коригую- чого пристрою.....	53
Лабораторна робота № 12. Синтез послідовного коригуючого пристрою.....	59
Список літератури.....	64
Додаток.....	65

*Навчальне видання*

**ХЛОПЕНКО Микола Якович  
БРОВИНСЬКА Ніна Михайлівна  
ШАРЕЙКО Дмитро Юрійович**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт з курсу**

**"ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ"**

Частина I

**АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ**

*(українською мовою)*

Редактор О.Г. Тулузакова  
Комп'ютерна правка та верстка К.О. Докієнко  
Коректор Н.О. Шайкіна

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Підписано до друку 15.05.06. Папір офсетний. Формат 60×84/16.  
Гарнітура "Таймс". Друк офсетний. Ум. друк. арк. 5,1. Обл.-вид. арк. 5,5.  
Тираж 250 прим. Вид. № 38. Зам. № 300. Ціна договірна

---

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,  
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5