

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних та контрольних робіт
з дисципліни "Теорія автоматичного керування"**

для студентів спеціальності 123 "Комп'ютерна інженерія"
заочної форми навчання

2019

Методичні вказівки до виконання лабораторних та контрольних робіт з дисципліни "Теорія автоматичного керування" для студентів спеціальності 123 "Комп'ютерна інженерія" заочної форми навчання / Укл. М.В. Єфименко, Н.В. Луценко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 46 с.

Укладачі: М.В. Єфименко, доцент, к.т.н.
Н.В. Луценко, ст. викладач

Рецензент: Р.К. Кудерметов, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск: Н.В. Луценко, ст. викладач

Затверджено
на засіданні кафедри КСМ
Протокол № 7 від 21.01.2019

Затверджено
на засіданні НМК КНТ
Протокол № 6 від 31.01.2019

ЗМІСТ

Порядок виконання контрольних та лабораторних робіт.....	4
Загальні відомості.....	5
Основні компоненти та види САК.....	5
Типи ланок САК	6
Основні види характеристик ланки	8
Умови стійкості САК.....	9
Показники якості перехідного процесу САК.....	10
Види корегуючих пристроїв.....	11
Дискретні САК	12
Лабораторна робота № 1 Вивчення основ роботи з системою для математичних та інженерних розрахунків	15
1.1 Робочий простір системи MATLAB і її командне вікно	15
1.2 Створення файл-сценарію	17
1.3 Створення М-функцій	19
1.4 Порядок виконання роботи.....	21
Лабораторна робота № 2 Дослідження динамічних характеристик ланок різного типу.....	22
2.1 Дослідження характеристик ланки	22
2.2 Побудова динамічних характеристик САК.....	23
2.3 Порядок виконання роботи.....	26
Лабораторна робота № 3 Моделювання диференційного рівняння n -ого порядку	28
3.1 Побудова структурних схем за допомогою пакету SIMULINK.....	28
3.2 Дослідження характеристик системи	33
3.3 Порядок виконання роботи.....	36
Лабораторна робота № 4 Дослідження САК з корегуючими пристроями.....	37
4.1 Визначення якості перехідного процесу в системі MATLAB.....	37
4.2 Дослідження впливу гнучкого зворотного зв'язку	38
4.3 Дослідження впливу ПД-регулятора.....	40
4.4 Порядок виконання роботи.....	42
Контрольні питання з дисципліни	44
Зміст контрольної роботи	45
Література.....	46

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Контрольна робота з дисципліни "Теорія автоматичного керування" складається з декількох завдань з різними варіантами.

Для виконання контрольної роботи студент повинен вивчити основні положення та відомості з дисципліни, відповісти на контрольні питання, виконати лабораторні роботи згідно заданому викладачем варіанту [3]. Результати зробленої роботи студент повинен привести записці до контрольної роботи.

Лабораторні роботи складаються з декількох програм, завдань до них. Студент повинен зробити програми і проаналізувати результати їх роботи. Лабораторна робота № 1 виконується під час установчої сесії, результати цієї роботи показуються викладачеві. Лабораторні роботи № 2, 3, 4 виконуються самостійно. Результати цих робіт приводяться в записці до контрольній роботі.

Для зарахування контрольної роботи та отримання заліку з дисципліни треба виконати лабораторні роботи, написати записку до контрольної роботи, вміти відповісти на питання з переліку контрольних питань до контрольної роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Основні компоненти та види САК

Система автоматичного керування (САК) – це сукупність взаємозв'язаних об'єктів, в якій протягом тривалого часу потрібним чином змінюються (або підтримуються постійними) задані фізичні параметри в визначеному фізичному процесі без втручання людини.

Основні компоненти САК (рис.1):

- 1) об'єкт керування (ОК), яким система повинна керувати;
- 2) датчики, які забезпечують отримання інформації про об'єкт;
- 3) пристрій керування – головний компонент системи керування, який порівнює задані і вимірювані на об'єкті дані та формує вхідні змінні, поступають на об'єкт.

Задані дані подаються в пристрій керування. Вихідні дані з об'єкту керування вимірюються за допомогою датчиків і вимірювані значення поступають в пристрій керування. Пристрій керування формує вхідні дані, які поступають на вхід об'єкту керування.

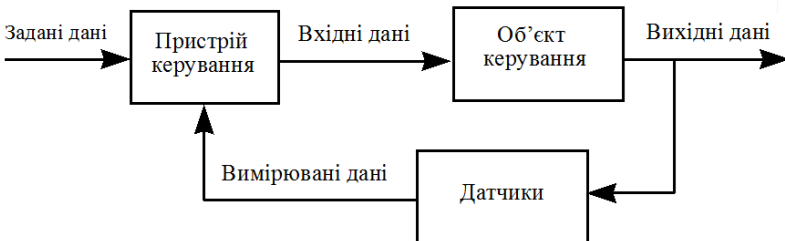


Рисунок 1 – Основні компоненти САК

Система стабілізації – це система автоматичного керування, в якій значення заданих даних, є постійними протягом тривалого часу, а на виході об'єкта ці значення підтримуються з заданою точністю.

Приклад такої системи – система опалювання будинку, яка всередині будинку підтримує постійну задану температуру при значних коливаннях температури навколишнього середовища.

Система слідкування – це система автоматичного керування, в якій значення заданих даних змінюються в часі, а на виході об'єкта відслідковується зміни цих значень з заданою точністю.

Приклад такої системи: радарна установка, яка відслідкує переміщення об'єктів, що рухаються.

Термінальна система – це система автоматичного керування, в якій, вихідні змінні повинні досягнути значення заданої змінної за визначений час.

Приклад такої системи: антена, що слідує за літальними об'єктами, приймає потрібне положення за мінімально можливий час (в заданий момент часу) без перевантаження двигуна.

Типи ланок САК

Для дослідження динаміки САК уся система розбивається на окремі ланки.

Ланка системи – це технічний пристрій будь-якої фізичної природи, конструкції та призначення, що описується визначеним диференціальним рівнянням. Рівняння ланки повинно бути складено таким чином, щоб воно відображало залежність (в динамічному процесі) між теми величинами, які в схемі системи вказані на виході та вході даної ланки. Для аналізу систем диференціальних рівнянь часто використовуються передатні функції.

Передатна функція ланки – це відношення зображень Лапласу вихідної та вхідної величин при нульових початкових умовах.

Передатна функція ланки в загальному випадку виглядає:

$$W(s) = \frac{X_2(s)}{X_1(s)} = \frac{k_1 N(s)}{L(s)},$$

де $X_2(s)$, $X_1(s)$ – відповідно вихід та вхід ланки, $N(s)$ и $L(s)$ – багато-члени з коефіцієнтами **1** в молодших членах, k_1 – коефіцієнт передачі.

Якщо знаменник передатної функції прирівняти до нуля, то отримаємо *характеристичне рівняння* $L(\lambda)=0$, корні якого називаються *полюсами* передатної функції.

Якщо чисельник прирівняти до нуля $N(\lambda)=0$ та розв'язати це рівняння, то корні цього рівняння називаються *нулями* передатної функції.

Типи ланок САК різняться за виглядом їх передатних функцій, які визначають всі динамічні якості та характеристики.

Основні типи ланок розподіляються на три групи: позиційні, диференціальні, інтегруючі.

Позиційні ланки – це такі ланки, в передатних функціях яких багаточлени чисельника та знаменника мають вільні члени (рівні одиниці), тобто ці ланки мають статичну характеристику $x_2=k_1x_1$ в усталеному режимі.

До таких ланок відносяться ланки з наступними передатними функціями:

– безінерційна ланка $W(s) = k_1$;

– аперіодична ланка 1-го порядку (інерційна) $W(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}$;

– аперіодична ланка 2-го порядку $W(s) = \frac{k_1}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$, якщо $T_1 \geq 2T_2$;

передатна функція для такої ланки може бути записана у вигляді:

$W(s) = \frac{k}{(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}$, де $T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}$, причому ($T_3 > T_4$).;

– коливальна ланка $W(s) = \frac{k_1}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$, якщо $T_1 < 2T_2$;

передатна функція для такої ланки може бути записана у вигляді:

$W(s) = \frac{k_1}{T^2 s^2 + 2dT s + 1}$, де $T = T_2$, $d = \frac{T_1}{2T_2}$ – коефіцієнт згасання;

– консервативна ланка $W(s) = \frac{k_1}{T^2 s^2 + 1}$.

Диференційні ланки – це такі ланки, в передатних функціях яких в чисельнику відсутній вільний член. До таких ланок відносяться з наступними передатними функціями:

– диференційна ланка 1-го порядку $W(s) = k_1 s$;

– диференційна ланка 2-го порядку $W(s) = k_1 s^2$;

– диференційна інерційна ланка $W(s) = \frac{k_1 s}{T_1 s + 1}$.

Інтегруючі ланки – це такі ланки, в передатних функціях яких в знаменнику відсутній вільний член. До таких ланок відносяться з наступними передатними функціями:

– інтегруюча ланка 1-го порядку $W(s) = \frac{k_1}{s}$;

– інтегруюча інерційна ланка $W(s) = \frac{k_1}{s(Ts + 1)}$.

В усіх передатних функціях використовується такі позначення: k_1 – коефіцієнт передачі, T, T_1, T_2, T_3, T_4 – постійні часу.

Основні види характеристик ланки

Для дослідження динаміки САК використовуються часові та частотні характеристики.

Часові характеристики – це реакція ланки (зміна в часі вихідного параметру системи) на вхідний сигнал визначеного вигляду. До них відносяться перехідна та імпульсна перехідна функції.

Перехідна функція $h(t)$ – це реакція системи на одиничний ступінчастий вхідний сигнал $1(t)$, тобто перехідний процес на виході $x_2(t)$ при стрибку $1(t)$ на вході $x_1(t)$ при нульових початкових умовах.

Імпульсна перехідна функція $g(t)$ – це реакція системи на одиничний вхідний імпульс, тобто на дельту-функцію $\delta(t)$, при нульових початкових умовах.

Частотні характеристики САК – це реакція системи на вхідний синусоїдальний сигнал з одиничною амплітудою при зміні кутової частоти від нуля до нескінченості. Кутова частота вимірюється в рад/сек.

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) – це комплексне число $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = W(s)|_{s=j\omega}$, модуль якого дорівнює відношенню амплітуди вхідного сигналу до амплітуди вихідного сигналу $|W(j\omega)| = A(\omega)$, а аргумент – зсуву фаз вихідного сигналу по відношенню до вхідного сигналу $\arg W(j\omega) = \varphi(\omega)$ при зміні частоти від нуля до нескінченості.

Графічно АФЧХ – це геометричне місце кінців обчислених векторів амплітуд на комплексній площині при зміні частоти від нуля до нескінченості. Довжина вектора відповідає амплітуді вихідного сигналу, а кут між віссю абсцис та вектором – зсув фази вихідного сигналу по відношенню до вхідного сигналу.

Амплітудна частотна характеристика (АЧХ) показує залежність зміни амплітуди при зміні частоти.

Логарифмічна амплітудна частотна характеристика (ЛАЧХ) – це залежність значень амплітуди в вигляді $Lm(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg A(\omega)$ від зміни логарифма частоти. Величина $Lm(\omega)$ вимірюється в децибелах (1 дБ відповідає зміні амплітуди в $10^{1/20} = 1,122$ рази, 20 дБ – зміні амплітуди в 10 разів).

Фазова частотна характеристика (ФЧХ) показує зсув фази вихідного сигналу при зміні частоти. Фаза вимірюється в градусах.

Логарифмічна фазова частотна характеристика (ЛФЧХ) – це залежність зсуву фази вихідного сигналу від зміни логарифма частоти.

Умови стійкості САК

Система автоматичного керування (САК) повинна відповідати трьом вимогам:

- 1) бути *стійкою*;
- 2) працювати з заданою *точністю*;
- 3) мати потрібну *якість перехідного процесу*.

Точність системи задається та визначається в усталеному режимі. Стійкість системи гарантує згасання перехідного процесу, після чого забезпечується якість перехідного процесу.

Стійкість САК – це властивість згасання перехідних процесів в продовж часу, тобто $x_{\text{власне}}(t) \rightarrow 0$, якщо $t \rightarrow \infty$.

Для стійкості САК, тобто, для згасання перехідних процесів, *необхідно та достатньо*, щоб усі корені $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ характеристичного рівняння передатної функції, яка описує систему, (дійсні та комплексні) мали від'ємну дійсну частину.

Необхідною умовою стійкості САК є додатність усіх коефіцієнтів характеристичного рівняння. Ця умова необхідна, але не достатня.

Можна виділити такі *типи межі стійкості* лінійної системи:

- 1) *апериодична*, що характеризується нульовим коренем $\lambda_1=0$;
- 2) *коливальна*, що характеризується парою уявних коренів $\lambda_{1,2}=\pm j\omega$.

Якщо неможливо, або важко обчислити корні характеристичного рівняння, то для визначення стійкості системи можна використовувати різні *критерії стійкості*.

Критерій стійкості Гурвіца: Для стійкості лінійної системи n -ого порядку необхідно та достатньо, щоб були додатними n головних визначників матриці Гурвіца з коефіцієнтами характеристичного рівняння.

Критерій стійкості Михайлова: Для стійкості лінійної системи n -ого порядку необхідно та достатньо, щоб крива Михайлова проходила послідовно n квадрантів проти часової стрілки, весь час оточуючи початок координат. Крива Михайлова будується на комплексній площі за формулою $D(j\omega)=X(\omega)+jY(\omega)$, де $D(j\omega)$ – це характеристичне рівняння системи, в якому змінна $\lambda = j\omega$.

Запас стійкості по амплітуді – це значення АЧХ на частоті, де ФЧХ дорівнює -180° . *Запас стійкості по фазі* – це різниця між значенням ФЧХ та -180° на частоті зрізу. *Частота зрізу* – це частота, на якій значення АЧХ дорівнює 1.0 або 0 дБ, тобто амплітуди вхідного та вихідного сигналів рівні.

Показники якості перехідного процесу САК

Одною з важливих властивостей системи є якість перехідного процесу. При нульових початкових умовах перехідний процес по вихідній змінній y може мати вигляд, приведений на рис. 2.

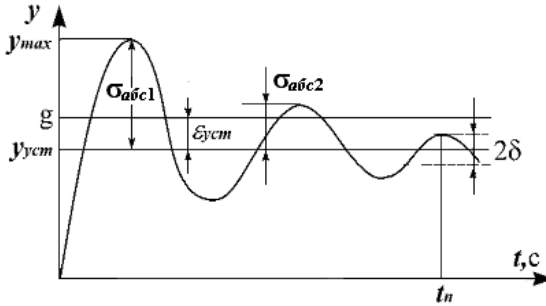


Рисунок 2 – Перехідний процес в САК

Можна визначити такі показники якості.

1. Усталена помилка системи $\varepsilon_{уст} = g - y_{уст}$ – різниця між вхідним (заданим) сигналом g та усталеним вихідним сигналом $y_{уст}$.
2. Припустима помилка системи $\pm \delta$ – допустиме відхилення від усталеного вихідного сигналу $y_{уст}$ (за замовчанням $\pm \delta = 0.02 y_{уст}$).
3. Час перехідного процесу t_n – проміжок часу від початку перехідного процесу до того часу, коли коливання остаточно увійдуть у зону припустимої помилки $\pm \delta$ відносно усталеного вихідного сигналу $y_{уст}$.
4. Абсолютне перегулювання – модуль різниці між максимальним та усталеним значенням вихідного сигналу $\sigma_{абс1} = |y_{max} - y_{уст}|$;
5. Відносне перегулювання – це відношення абсолютного перегулювання до усталеного значення $\sigma_{відн} = \sigma_{абс1} / y_{уст}$. Система вважається доброю, якщо $\sigma_{відн} < 0.25$.
6. Коефіцієнт затухання – це відношення різниці перших двох абсолютних перегулювань до першого абсолютного перегулювання $\xi = (\sigma_{абс1} - \sigma_{абс2}) / \sigma_{абс1}$. Система вважається доброю, якщо $\xi > 0.9$.
7. Коефіцієнт коливальності M – це кількість перерегулювань (коливань) за час перехідного процесу.
8. Статизм системи – це відношення усталеного вихідного сигналу до вхідного (заданого) сигналу $\gamma = \varepsilon_{уст} / g = 1 / (1 + k_{op})$.
Якщо $g=1$, то усталена помилка системи $\varepsilon_{уст} = 1 / (1 + k_{op})$.

Види корегуючих пристроїв

Для отримання потрібної якості процесу керування в САК додатково вводяться корегуючі пристрої. Керуючі пристрої за способом введення в загальну систему керування поділяються на паралельні та послідовні пристрої.

Паралельні корегуючі пристрої виконується за рахунок введення додаткових місцевих (жорстких та гнучких) зворотних зв'язків $W_{zz}(s)$.

Загальна передатна функція такої розімкнутої системи з паралельними

корегуючими пристроями має вигляд $W(s) = \frac{W_o(s)}{1 + W_{zz}(s)W_o(s)}$ (рис. 3).

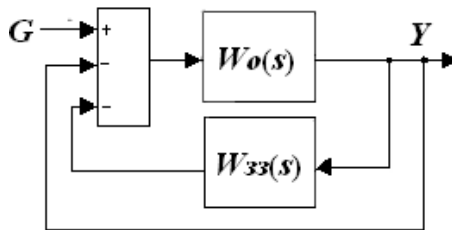


Рисунок 3 – САК зі зворотним зв'язком

Жорсткий зворотний зв'язок ($W_{zz}=k_{zz}$) та *інерційний жорсткий зворотний зв'язок* ($W_{zz}=k_{zz}/(\tau_k s + 1)$) покращують якість перехідного процесу, збільшують стійкість системи, але зменшують точність та анулюють астатизм системи.

Гнучкий зворотний зв'язок ($W_{zz}=k_{zz}s$) покращує якість перехідного процесу, збільшує стійкість системи, не впливає на точність системи, зберігає астатизм системи, але погіршує перешкодостійкість системи. Тому в *інерційний гнучкий зворотний зв'язок* вводиться інерційна ланка з добрими фільтруючими властивостями ($W_{zz}(s)=k_{zz}s/(\tau_k s + 1)$).

Послідовні корегуючі пристрої виконується за рахунок введення послідовної додаткової ланки $W_k(s)$. Загальна передатна функція такої розімкнутої системи має вигляд $W(s)=W_k(s)W_o(s)$ (рис. 4).

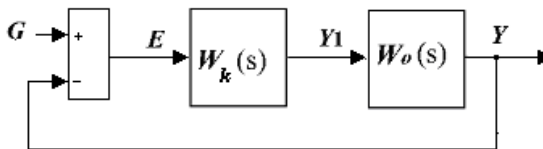


Рисунок 4 – САК з послідовним керуючим пристроєм

Послідовні корегуючі пристрої ще називають ПД-регулятором, що складається з пропорційної (П), інтегруючої (І) та диференційної (Д) ланок. Передатна функція такого ПД-регулятора має вигляд:

$$W_{pec}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s.$$

Введення *пропорційної складової* ($W_p = k_p$) дозволяє збільшити загальний коефіцієнт передачі розімкнутої системи, що підвищує точність, але зменшує стійкість системи і погіршує якість перехідного процесу.

Введення *інтегруючої складової* ($W_i = k_i/s$) підвищує порядок астатизму системи, збільшує точність системи, але погіршує якість перехідного процесу і зменшує стійкість системи.

Введення *диференційної складової* ($W_d = k_d s$) покращує якість перехідного процесу, збільшує стійкість системи, але зменшує перешкодостійкість системи. Тому диференційну складову використовують з інерційною ланкою ($W_d = k_d s / (\tau_k s + 1)$), яка хоч і зменшує покращення якості перехідного процесу, але має гарні фільтруючі властивості.

Система вважається статичною по відношенню до вхідного сигналу $g = const$, якщо система в усталеному режимі має помилку $\mathcal{E}_{уст}$, що відрізняється від нуля. Якщо при тих же умовах система має нульову помилку $\mathcal{E}_{уст} = 0$, то така система астатична по відношенню до вхідного сигналу g .

Дискретні САК

Дискретними системами називають системи автоматичного керування, в яких використовується дискретизація вхідних або вихідних сигналів. При дискретизації сигналів "безперервні" значення сигналів замінюються дискретними. Дискретизація сигналів може бути виконана за часом, за рівнем, або за часом та рівнем одночасно. До таких систем відносяться *імпульсні* та *цифрові* системи.

В імпульсних системах проводиться квантування сигналів за часом, або за рівнем, а в цифрових – за часом та рівнем одночасно. В імпульсних системах є одна або кілька ланок з імпульсним елементом.

Цифрова система складається з об'єкту керування (ОК), з аналого-цифрових (АЦП) і цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів, таймеру часу та пристрою керування, що реалізований на комп'ютері (спецобчислювачі, мікропроцесорі).

Для аналізу дискретних систем можна використовувати *різницеві рівняння*, в яких стан системи визначено тільки в точках квантування. Для аналізу різницевих рівнянь зручно використовувати **z-перетворення**, що є аналогом перетворення Лапласа. Якщо в перетворенні Лапласа ввести комплексну змінну $z = e^{sT_s}$, де T_s – період дискретизації, то отримаємо:

$$X(z) = Z\{x_i\} = \sum_{i=0}^{\infty} x_i e^{-iT_s} = \sum_{i=0}^{\infty} x_i z^{-i}.$$

Основні властивості z-перетворення:

- лінійність: $x_i = a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i}$; $X(z) = a_1 X_1(z) + a_2 X_2(z)$.
- зсув за часом: $Z\{x_{i-m}\} = z^{-m} X(z)$;

$$Z\{x_{i+m}\} = z^m (X(z) - F_0(z)); \text{ де } F_0(z) = \sum_{j=0}^{m-1} x_j z^{-j}.$$

- згортання: $Z\{x \cdot g\} = Z \sum_{j=0}^{\infty} x_j g(k-j) = Z(x) \cdot Z(g)$.

Дискретні системи поділяються на лінійні та нелінійні. В загальному випадку всі системи є нелінійними.

Лінійна дискретна система (ЛДС) – це система, яка може бути реалізована за допомогою трьох базових операцій:

- складення;
- множення на постійний коефіцієнт;
- затримки.

Передатна функція ЛДС – це відношення **z**-перетворення вихідної послідовності сигналів до **z**-перетворень вхідної послідовності сигналів за нульовими початковими умовами.

Для *стійкості дискретної системи* необхідно та достатньо, щоб всі полюси передатної функції (корні характеристичного рівняння) знаходилися на **z**-площині всередині одиничного кола $|z| < 1$.

Частотні характеристики ЛДС – це функції аргументу $e^{j\omega T_s}$, вони є періодичними за частотою з періодом, що відповідає частоті дискретизації $\omega_s = 2\pi/T_s$.

Для дискретних систем одним з важливих параметрів є *період дискретизації*.

Цей період можна визначити, якщо скористатися *теоремою Котельникова*: Сигнал $x(t)$, перетворення Фур'є якого не має складових з частотами більш ніж ω_s , повністю визначається своїми

миттєвими значеннями, що відраховуються в дискретні моменти часу $T_s \leq 2\pi/\omega_s$.

Частоту $\omega_N = \omega_s/2$ називають *частотою Найквіста*. Тому *теорему Котельникова* можна сформулювати інакше: Сигнал, перетворення Фур'є якого прямує до нуля при частотах більших, ніж частота Найквіста, може бути повністю відновленим.

При роботі з дискретними системами важливо обрати частоту дискретизації такою, щоб вона була достатньо велика порівняно з частотною складовою сигналу. Крім того, перед квантуванням бажано профільтрувати безперервний сигнал, щоб частотні складові, що перебільшують частоту Найквіста $\omega_N = \omega_s/2$, не спотворювали низькочастотні компоненти основного сигналу.

Критерієм вибору періоду дискретизації може бути також час для перетворення, відновлення вхідних сигналів та постійні часу замкненої системи.

Для перетворення безперервної замкнутої системи керування в дискретну період дискретизації можна обрати $T_s \approx 0,15 \dots 0,5/\omega_c$, де ω_c – частота зрізу безперервної розімкнутої системи керування в рад/сек. При такому періоді дискретизації частота Найквіста буде в 5–20 разів більша частоти зрізу.

Для перетворення безперервної системи в дискретну використовують різні екстраполятори або дрібно-раціональну апроксимацію.

Екстраполятор нульового порядку отримує дискретний сигнал $u[k]$, генерує безперервний сигнал $u(t)$, що екстраполює кожне дискретне значення постійним значенням підчас одного періоду дискретизації, який подається на вхід безперервної ланки:

$$u(t) = u[k] \quad \text{при } kT_s \leq t < (k+1)T_s.$$

В *екстраполяторі першого порядку* використовується лінійна екстраполяція: $u(t) = u[k] + (t - kT_s)(u[k+1] - u[k])/T_s$ при $kT_s \leq t < (k+1)T_s$.

Дрібно-раціональна апроксимація Тастіна використовує приблизне відношення для представлення експоненти: $z = \exp(sT_s) = \frac{1+sT_s/2}{1-sT_s/2}$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Вивчення основ роботи з системою для математичних та інженерних розрахунків

Мета роботи – ознайомитися з системою **MATLAB** та вивчити основні принципи роботи з цією системою.

1.1 Робочий простір системи MATLAB і її командне вікно

В теорії автоматичного керування важливе місце приділяється аналізу та синтезу систем автоматичного керування. Одним з програмних продуктів, призначених для моделювання цих систем, є система **MATLAB**, яка реалізує широкий спектр математичних методів, засобів візуалізації та допоміжних засобів.

Після запуску програми **MATLAB** на екрані з'являється командне вікно системи **MATLAB**, що містить меню, лінійку з кнопками і клієнтську частину із знаком запрошення `>>`.

Після знака `>>` можна вводити з клавіатури числа, імена змінних і знаки операцій, що складають деякий вираз. Після натиснення клавіші **Enter** вираз обчислюється і результат виводиться на екран (рис. 1.1). Після обчислення виразу знизу вікна з'являється вільний рядок для введення нових даних і знак `>>`.

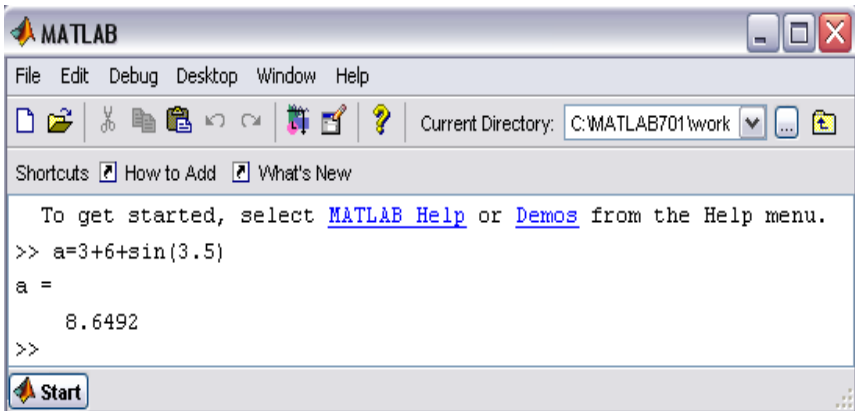


Рисунок 1.1 – Командне вікно системи **MATLAB**

Всі значення змінних, обчислені протягом поточного сеансу роботи, зберігаються в спеціальній області пам'яті, *робочому просторі системи MATLAB (Matlab Workspace)*.

Вся видима інформація у вікні системи **MATLAB** розташовується в двох зонах: *перегляду* і *редагування*. В зоні *перегляду* можна переглядати будь-яку інформацію, виділяти її та копіювати, але не можна виправляти. Зона *редагування* займає один рядок командного вікна з знаком **>>** та називається *рядком введення*, який може займати декілька фізичних рядків. Для продовження введення з показом видимої інформації на наступних фізичних рядках треба набрати після знаку операції три або більше крапок, а потім натиснути **Enter**. Але редагувати можна тільки на останній рядок.

Команда **clear ім'я1 ім'я2** видаляє задані змінні, а команда **clear** видаляє відразу всі змінні. Очистити видимий зміст командного вікна можна командою **clc**, але значення всіх обчислених змінних при цьому зберігаються. Їх можна продивитися, якщо задати ім'я змінної і натиснути **Enter**. Командою **who** можна перевірити, які змінні залишилися в робочому просторі.

Для збереження змісту робочого простору потрібно виконати команду меню **File|Save Workspace As**, задавши каталог на диску та ім'я файлу з розширенням **.mat**, або набрати в командному вікні команду: **save шлях_до_файлу\ім'я_MAT-файлу**. Такі файли називаються **MAT-файлами**. Для завантаження потрібного **MAT-файлу** можна виконати команду меню **File|Open** та вибрати ім'я **Mat-файлу** в діалоговому вікні, або набрати в командному вікні команду: **load шлях_до_файлу\ім'я_MAT-файлу**.

Одночасно можна завантажити декілька файлів, з'єднавши кілька попередніх сеансів роботи. Але, якщо імена змінних з різних сеансів співпадають, в поточному робочому просторі буде використовуватися змінна з останнього відкритого **Mat-файлу**. В робочий простір можна також ввести значення окремих змінних із записаного **Mat-файлу**, якщо доповнити команду іменами змінних:

```
load шлях_до_файлу\ім'я_MAT-файлу ім'я1, ім'я2
```

Якщо **Mat-файл** вказано без повного шляху до нього, то він повинен знаходитися в поточному каталозі системи **MATLAB**, який завжди можна визначити за допомогою команди **cd**, а змінити його можна командою **cd шлях_до_нового_каталогу**.

На будь-яку команду системи **MATLAB** можна отримати довідку, виконавши команду: **help ім'я_команди**.

Сеанс роботи з системою **MATLAB** називається *сесією* (session). Це поточний документ, який відображає роботу користувача з системою **MATLAB**. В ньому є рядки введення, виведення та повідомлення про помилки.

Система **MATLAB** підтримує ще *пакетний* режим роботи, в якому можна розробляти програми, що складаються з послідовності команд користувача та зберігаються на диску у вигляді окремого файлу з розширенням **.m**. Файли, які містять команди мови **MATLAB** (**М-мови**), називаються **м-файлами**. Створювати **м-файл** можна використовуючи спеціальний *редактор м-файлів*, що входить до складу **MATLAB**. При цьому всі файли проходять синтаксичний контроль. Є два типи **м-файлів**: *файли-сценарії* і *файли-функції*.

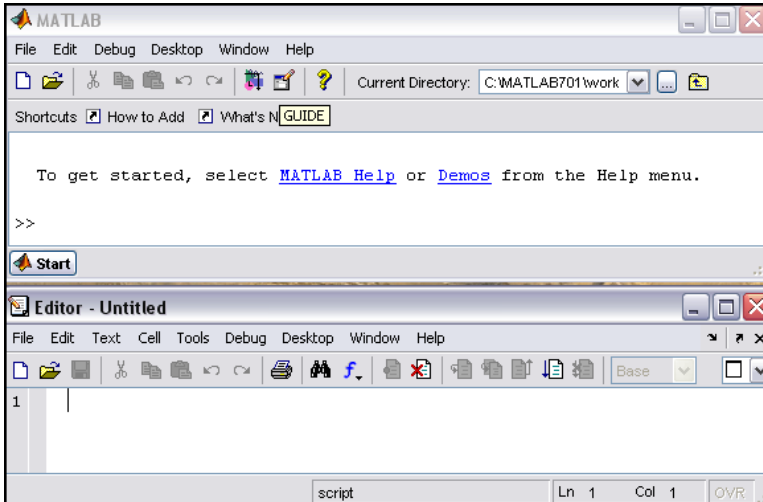
1.2 Створення файл-сценарію

Файл-сценарій, або **Script-файл**, є найпростішою програмою з записом серії команд без параметрів. *Файл-сценарій* не має вхідних і вихідних аргументів, використовує тільки глобальні змінні з робочої області, в процесі виконання не компілюється. Імена файлів-сценаріїв не можна використовувати як параметри функцій, оскільки файли-сценарії не повертають значень.

Файл-сценарій має наступну структуру: основний коментар, додатковий коментар, тіло файлу з будь-якими виразами. Основний коментар – це перший рядок текстових коментарів, що починається зі знаку **%** в першій позиції, а додатковий – подальші рядки зі знаком **%**. При виконанні команди **help ім'я_файлу** основний коментар виводиться в командному вікні.

Для створення **м-файлу** потрібно виконати команду **New M-File** головної панелі інструментів **MATLAB**. З'явиться нове вікно – текстовий редактор з готовим для редагування порожнім документом (рис. 1.2). Після набору тексту *файл-сценарію* і його відлагодження необхідно створити **м-файл**, для чого вибрати пункт меню **File|Save As ім'я_м-файлу**. Для виконання **м-файла-сценарію** можна скористатися командою меню **Debug|Run**, або викликати **м-файл** в командному вікні, вказавши тільки ім'я цього файлу без розширення.

Примітка: ім'я **м-файлу** не повинно починатися з цифри.

Рисунок 1.2 – Створення **М-файла**

Розглянемо наступний *файл-сценарій* для дослідження динамічних характеристик інтегруючої ланки, яка описується рівнянням $x_2' = 3x_1$, та має передатну функцією $W(s) = \frac{3}{s}$.

```
%Дослідження динамічних характеристик ланки
clc;
f1=[0 3]; %Чисельник передатної функції ланки
f2=[1 0]; %Знаменник передатної функції ланки
W=tf(f1,f2) %Формування передатної функції ланки
%Побудова перехідної характеристики ланки
subplot(2,1,1); step(W); grid on;
%Побудова імпульсної характеристики ланки
subplot(2,1,2); impulse(W); grid on;
```

Перший рядок – це основний коментар, інші – тіло файлу та додатковий коментар. Функція **tf(f1,f2)** формує передатну функцію ланки. Функція **subplot(m,n,p)** виводить в одному вікні відразу кілька графіків, тобто розбиває вікно на **m**×**n** підвікон, де **m** – кількість підвікон по горизонталі, **n** – кількість підвікон по вертикалі, **p** – номер підвікна (підвікна підраховуються послідовно за рядками). Команда **grid on** використовується для виведення сітки на графіку.

Примітка: якщо після виразу немає коми, то значення виразу буде виведено на екран.

1.3 Створення М-функцій

М-файл-функція є самостійним програмним модулем, який спілкується з іншими модулями через свої вхідні і вихідні параметри. Визначення *М-файл-функції* починається зі слова **function**. *Файл-функція* може використовувати локальні змінні, які ніяк не впливають на значення змінних за межами функції. При виявленні в процесі виконання програми *файл-функція* завжди компілюється, а тільки потім виконується.

Файл-функція з декількома вихідними параметрами має наступну запис:

```
function[var1,var2,...]=f_name(список_параметрів)
```

```
%Основний коментар
```

```
%Додатковий коментар
```

Тіло файлу з будь-якими виразами

```
var1=вираз, var2=вираз
```

де **f_name** – ім'я функції,

список_параметрів – імена вхідних параметрів, записані через кому в круглих дужках,

var1,var2,... – імена вихідних змінних, записані через кому в квадратних дужках,

Основний коментар – це перший рядок коментарів, що виводиться на екран, якщо задати в командному вікні **help f_name**.

За допомогою запису **var1=вираз, var2=вираз** *файл-функція* повертає результати обчислень.

Якщо *файл-функція* має один вихідний параметр, то його ім'я не береться в квадратні дужки. Така функція може використовуватися в математичних виразах в записі **f_name(список_параметрів)**.

Файл-функцію з декількома вихідними параметрами не можна використовувати безпосередньо в математичних виразах. Така функція спочатку записується як окремий елемент програми у вигляді: **[var1,var2]=f_name(список_параметрів)**, а вже потім вихідні змінні **var1,var2** можна використовувати в подальших виразах.

Файл-функція створюється аналогічно, як і *файл-сценарій*. Після набору тексту *М-функції* та її відлагодження необхідно створити **м-файл**, для чого скористатися пунктом меню **File|Save As ім'я f_name**.

Примітка: ім'я **м-файлу** з *М-функцією* повинно співпадати з ім'ям самої *функції*.

Викликати *М-файл-функцію* можна з командного вікна, або з *М-файлу-сценарію*, вказавши ім'я цього файлу з *М-функцією*.

Розглянемо приклад *М-функції* для дослідження динамічних характеристик ланки з вхідними параметрами:

```
function [y1,y2,t]=St_im(n1,n2,Tk,h);
%Перехідна та імпульсна характеристики ланки
W=tf(n1,n2) %Формування передатної функції ланки
i=1:1:fix(Tk/h)+1; %Завдання кількості точок в масивах
T(i,1)=(i-1)*h; %Формування масиву часу
[s1,T]=step(W,T); %Обчислення перехідної характеристики
[s2,T]=impz(W,T); %Обчислення імпульсної характеристики
y1=s1; y2=s2; t=T; %Повернення вихідних параметрів
де F – ім'я М-функції,
```

n1,n2 – вектори-рядки коефіцієнтів чисельника та знаменника передатної функції ланки,

Tk – кінцевий час моделювання,

h – крок моделювання,

y1,y2 – вектори-рядки обчислених значень перехідної та імпульсної функцій ланки,

t – масив точок часу.

Для виконання *М-функції* необхідно набрати в командному вікні, або запустити *файл-сценарій* для дослідження динамічних характеристик інтегруючої ланки з наступними вхідними параметрами:

```
%Дослідження динамічних характеристик ланки
clc;
Tk=10; h_int=0.01;
f1=[0 3]; %Чисельник передатної функції ланки
f2=[1 0]; %Знаменник передатної функції ланки
[s1,s2,T]=St_im(f1,f2,Tk,h_int);
set(plot(T,s1,'-b',T,s2,'-.r'),'LineWidth',1.5);
grid on;
legend('h1','g1',-1);
```

Функція `plot(...)` виводить на екран графіки змінних. В даному прикладі на одному графіку виводяться дві функції **s1(T)** та **s2(T)** з завданням вигляду та кольору лінії. Лінія може бути: безперервна – , штрих-пунктирна – . , подвійна пунктирна :, штрихова --, а колір лінії: **k** – чорний, **g** – зелений та т.д. Функція `set(...)` задає товщину ліній **1.5 пт**. На графіку також виводяться сітка та назви функцій.

1.4 Порядок виконання роботи

- 1 Ознайомтесь з командним вікном системи **MATLAB**.
- 2 Обчисліть наступні математичні вирази та збережіть у файлі з розширенням **.mat**:
 $2+3$, $x=\pi/4$, $z=2.301*\sin(x)$, $w=4+\exp(3)/5$, $y=8+z$,
 $f=\sqrt{y}/2$, $k=(4.5+z)*\cos(x)$.
- 3 Очистіть робочий простір, а потім зітріть видимий зміст робочого простору, а потім завантажте зміст робочого простору з файлу.
- 4 Отримайте передатні функції для рівнянь $a_0 x_2' + a_1 x_2 = b_0 x_1$ та $a_0 x_2' + a_1 x_2 = b_0 x_1'$, коефіцієнти для яких виберіть з таблиці 1.1, згідно заданому варіанту.
- 5 Розробіть *файл-сценарій* для дослідження динамічних характеристик ланок з отриманими передатними функціями та виконайте програму. Виведіть графіки перехідних та імпульсних характеристик. Запишіть *файл-сценарій* на диск і запустіть його з командного рядка **MATLAB**.
- 6 Розробіть *M-файл-функцію* для дослідження динамічних характеристик ланки з заданою передатною функцією.
- 7 Розробіть *файл-сценарій*, в якому зробіть три виклики *M-файл-функції* для дослідження динамічних характеристик ланок з усіма передатними функціями. Виведіть графіки перехідних та імпульсних функцій в три підвікна.

Таблиця 1.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a_0	15	20	25	50	60	70	80	60	90	100
a_1	3	4	5	10	3	7	10	12	15	20
b_0	60	40	50	80	60	70	30	48	60	50

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження динамічних характеристик ланок різного типу

Мета роботи – навчитися визначати тип ланки та досліджувати динамічні характеристики (часові та частотні) ланок різного типу.

2.1 Дослідження характеристик ланки

Для дослідження часових характеристик (перехідної та імпульсної функцій) в **MATLAB** можна використовувати приведену *М-файл-функцію*:

```
function [y1,y2,t]=St_im(n1,n2,Tk,h);
%Перехідна та імпульсна характеристики ланки
W=tf(n1,n2) %Формування передатної функції ланки
i=1:1:fix(Tk/h)+1; %Завдання кількості точок в масивах
T(i,1)=(i-1)*h; %Формування масиву часу
[s1,T]=step(W,T); %Обчислення перехідної характеристики
[s2,T]=impz(W,T); %Обчислення імпульсної характеристики
y1=s1; y2=s2; t=T; %Повернення вихідних параметрів
```

де $n1, n2$ – вектори-рядки коефіцієнтів чисельника та знаменника передатної функції ланки, Tk – кінцевий час моделювання, h – крок моделювання, $y1, y2$ – вектори-рядки обчислених значень перехідної та імпульсної функцій ланки, t – масив точок часу.

Для дослідження частотних характеристик в системі **MATLAB** можна використовувати приведені *М-файл-функції*:

Функція для обчислення АЧХ, ФЧХ та АФЧХ:

```
function[y1,y2,y3,y4,y5]=AFCH(n1,n2,w_k,dw);
%Частотні характеристики ланки АЧХ, ФЧХ та АФЧХ
clear frequest
w=0; N=fix(w_k)/dw+1; %Завдання кількості точок в масивах
for i=1:1:N; %Формування масиву частот
    frequest(i)=w;
    w=w+dw;
end;
Omega=frequest';
W=freqs(n1,n2,Omega); %Обчислення передатної функції W(jw)
A=abs(W); %Обчислення АЧХ
fi=angle(W)*180/pi; %Обчислення ФЧХ в градусах
U=real(W); %Обчислення дійсної частини W(jw)
V=imag(W); %Обчислення мнімої частини W(jw)
%Повернення вихідних параметрів
y1=A; y2=fi; y3=U; y4=V; y5=Omega;
```

Функція для обчислення ЛАЧХ, ЛФЧХ:

```
function[y1,y2,y3]=lg_AFCH(n1,n2,w_k,dw);
%Логарифмічні частотні характеристики ланки ЛАЧХ, ЛФЧХ
clear frequest
w=0;
N=fix(w_k)/dw; %Завдання кількості точок в масивах
for i=1:1:N+1; %Формування масиву частот
    frequest(i)=w;
    w=w+dw;
end;
Omega=frequest';
W=freqs(n1,n2,Omega); %Обчислення передатної функції W(jw)
Lm=20*log10(abs(W)); %Обчислення АЛЧХ
fi=angle(W)*180/pi; %Обчислення ФЛЧХ в градусах
y1=Lm; y2=fi; y3=Omega; %Повернення вихідних параметрів
```

В обох функціях використовуються наступні позначки:

$n1, n2$ – вектори-рядки коефіцієнтів чисельника та знаменника передатної функції ланки, w_k – кінцеве значення частоти, dw – крок зміни частоти, $y1, y2, y3, y4$ – вектори-рядки обчислених значень частотних характеристик ланки, $y5$ – масив точок частот.

2.2 Побудова динамічних характеристик САК

Послідовність дій при дослідженні часових та частотних характеристик розглянемо на прикладі аперіодичних ланок з

передатними функціями $W_1(s) = \frac{20}{0.5s+1}$ та $W_2(s) = \frac{40}{0.5s+1}$.

Для дослідження часових характеристик в системі **MATLAB** використовуємо приведену вище *М-файл-функцію* для передатних функцій $W_1(s), W_2(s)$. Час моделювання T_k обирається рівним $6T$, а крок моделювання h_int – не більш 30... 50% мінімальної постійної часу. (в нашому прикладі $T = 0.5$, тому $T_k = 3$ с, $h_int = 0.01$). Для дослідження частотних характеристик частоти змінюються від 0 до 20 з кроком 0.05, а логарифмічних частотних характеристик – від 0 до 100 з кроком 0.01.

%Дослідження часових та частотних характеристик ланок;

clc;

%Дослідження часових характеристик ланок;

Tk=3.0; %кінцеве час моделювання;

h_int=0.01; %крок моделювання;

f11=[0 20]; %Чисельник 1-ої передатної функції ланки

f12=[0.5 1]; %Знаменник 1-ої передатної функції ланки

```

H1=tf(f11,f12) %Формування 1-ої передатної функції ланки
f21=[0 40]; %Чисельник 2-ої передатної функції ланки
f22=[0.5 1]; %Знаменник 2-ої передатної функції ланки
H2=tf(f21,f22) %Формування 2-ої передатної функції ланки
%Обчислення перехідних та імпульсних функцій
[s11,s12,T]=St_im(f11,f12,Tk,h_int);
[s21,s22,T]=St_im(f21,f22,Tk,h_int);
%Dослідження частотних характеристик ланок;
w_k=20; % кінцеве значення частоти;
dw=0.05; % крок зміни частоти;
%Обчислення частотних характеристик
[A1,fi1,U1,V1,Omeg1]=AFCH(f11,f12,w_k,dw);
[A2,fi2,U2,V2,Omeg2]=AFCH(f21,f22,w_k,dw);
%Обчислення логарифмічних частотних характеристик
w_k1=100; % кінцеве значення частоти;
dw1=0.01; % крок зміни частоти;
[Lm1,lfi1,lg_Omeg1]=lg_AFCH(f11,f12,w_k1,dw1);
[Lm2,lfi2,lg_Omeg2]=lg_AFCH(f21,f22,w_k1,dw1);
%Побудова перехідних та імпульсних функцій
figure(1); subplot(3,1,1);
set(plot(T,s11,'-b',T,s21,'-.r'),'LineWidth',1.5);
grid on; zoom on; legend('h_1(t)','h_2(t)',-1);
subplot(3,1,2);
set(plot(T,s12,'-b',T,s22,'-.r'),'LineWidth',1.5);
grid on; zoom on; legend('g_1(t)','g_2(t)',-1);
%Побудова АФЧХ ланок
subplot(3,1,3);
set(plot(U1,V1,'-b',U2,V2,'-.r'),'LineWidth',1.5);
grid on; zoom on; legend('W_1','W_2',-1);
%Побудова частотних характеристик
figure(2); subplot(2,2,1);
set(plot(Omeg1,A1,'-b',Omeg2,A2,'-.r'),'LineWidth',1.5);
axis tight; grid on; zoom on; title('A1(w), A2(w)');
subplot(2,2,3);
set(plot(Omeg1,fi1,'-b',Omeg2,fi2,'-.r'),'LineWidth',1.5);
axis tight; grid on; zoom on; title('fi1(w), fi2(w)');
%Побудова логарифмічних частотних характеристик
subplot(2,2,2);
set(semilogx(lg_Omeg1,Lm1,'-b',lg_Omeg2,Lm2,'-.r'),'LineWidth',1.5); axis tight;
grid on; zoom on; title('Lm1(lg w), Lm2(lg w)');
subplot(2,2,4);

```

```
set(semilogx(lg_Omeg1,lfi1,'-b',lg_Omeg2,lfi2,'-.r'),
'LineWidth',1.5); axis tight;
grid on; zoom on; title('fi1(lg w), fi2(lg w)');
```

Функція **semilogx(...)** виводить графік по осі абсцис в логарифмічному масштабі. Команда **axis tight** встановлює діапазони координат по осям в відповідності з діапазонами зміни параметрів. Команда **zoom on** дозволяє автоматично змінювати масштаб виділеної ділянки графіка. Команда **title('назва')** виводить назву графіку. Команда **legend('назва1','назва2',-1)** додає до поточного графіку пояснення в вигляді відрізків ліній з довідковими надписами.

В результаті отримаємо такі графіки:

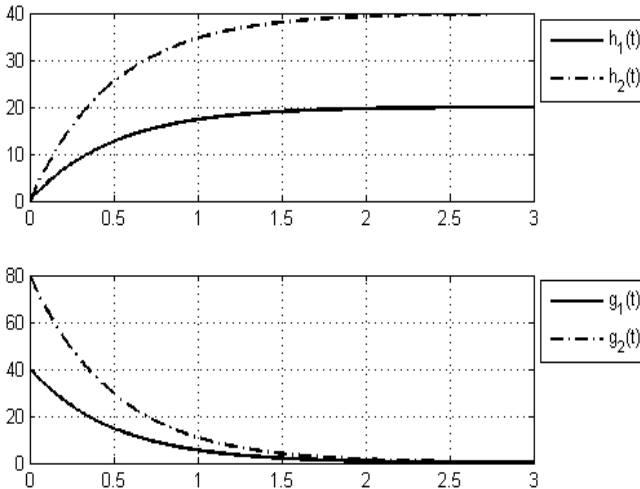


Рисунок 2.1 – Перехідні та імпульсні перехідні функції ланок

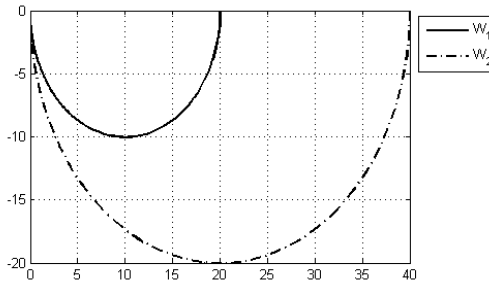


Рисунок 2.2 – АФЧХ ланок

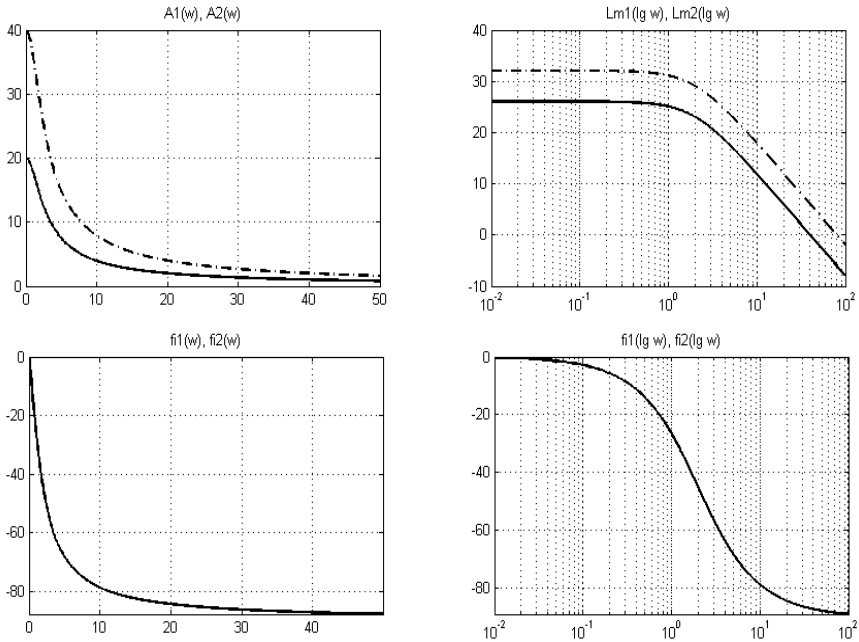


Рисунок 2.3 – АЧХ і ЛАЧХ, ФЧХ і ЛФЧХ ланок

2.3 Порядок виконання роботи

1 Розробіть **m-файл-сценарій** для дослідження часових та частотних характеристик аперіодичної ланки 1-го порядку (інерційної) з передатною функцією $W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$.

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$

2 Отримайте часові та частотні характеристики для таких значень а) k, T ; б) $2k, T$; в) $k, 0.5T$. Коефіцієнти k, T оберіть відповідно варіанту з таблиці 2.1. Час моделювання задайте рівним приблизно $6T$, а крок моделювання не більш $0.1T$. Отримайте та приведіть у звіті перехідні, імпульсні функції, АФЧХ, АЧХ, ЛАЧХ, ФЧХ та ЛФЧХ для всіх трьох передатних функцій (кожен вид характеристики повинен бути на окремому графіку).

3 За передатними функціями $W(s) = \frac{k}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}$ (коефіцієнти k, a_0, a_1 оберіть відповідно варіанту з таблиць 2.2 та 2.3, а коефіцієнт $a_2 = 1$).

Обчисліть значення постійних часу T_2 , T_1 та визначить тип ланки 2-го порядку (аперіодична ланка 2-го порядку або коливальна). Обчисліть відповідні коефіцієнти: T_3 , T_4 – для аперіодичної ланки 2-го порядку або T , d – для коливальної ланки.

4 Розробіть **m-файл-сценарій** для дослідження часових та частотних характеристик цих ланок. Отримайте та приведіть у звіті окремо перехідні, імпульсні функції, АФЧХ, АЧХ, ЛАЧХ, ФЧХ та ЛФЧХ для двох заданих передатних функцій ланки 2-го порядку (кожен вид характеристики повинен бути на окремому графіку).

Таблиця 2.1

№ в.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	25	30	35	45	40	70	20	50	60	100
T	0.3	0.4	0.5	1.0	0.8	0.7	0.2	0.25	0.15	2.0

Таблиця 2.2

№ в.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	60	30	25	40	30	50	40	80	30	20
a_0	2	1	2	0.25	1	0.09	0.25	0.36	3	0.25
a_1	3	0.3	4	0.2	2.5	0.7	0.15	0.3	0.8	2.0
$T_{k,c}$	30	20	20	10	15	6	10	8	30	10

Таблиця 2.3

№ в.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	60	30	25	40	30	50	40	80	30	20
a_0	2	1	2	0.25	1	0.09	0.25	0.36	3	0.25
a_1	0.6	3	1	1.5	0.4	0.08	1.5	1.5	3.5	0.2
$T_{k,c}$	30	20	20	10	15	6	10	8	30	10

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Моделювання диференційного рівняння n -ого порядку

Мета роботи – освоїти технологію моделювання диференційних рівнянь n -ого порядку засобами пакету **SIMULINK** системи **MATLAB** та навчитися визначати стійкість системи, знаходити межі стійкості.

3.1 Побудова структурних схем за допомогою пакету **SIMULINK**

Моделювання розв'язання диференційних рівнянь n -ого порядку розглянемо на прикладі диференційного рівняння третього порядку, яке має вигляд:

$$a_0 y''' + a_1 y'' + a_2 y' + a_3 y = bx,$$

де x , y – вхідний та вихідний сигнали; a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , b – постійні коефіцієнти.

Передатна функція диференціального рівняння 3-го порядку має вигляд:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3},$$

Структурна схема для системи (рис. 3.1), що описується даним диференціальним рівнянням, складається методом пониження порядку старшої похідної:

$$y''' = (bx - a_1 \ddot{y} - a_2 \dot{y} - a_3 y) \cdot \frac{1}{a_0};$$

$$L[y'] = sY; \quad L[y''] = s^2 Y; \quad L[y'''] = s^3 Y;$$

$$L[y'''] = \frac{1}{a_0} (bX - a_1 s^2 Y - a_2 s Y - a_3 Y);$$

$$Y = \frac{1}{a_0} (bX - a_1 s^2 Y - a_2 s Y - a_3 Y) \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s},$$

де X , Y – вхідний та вихідний сигнали x , y , перетворені за Лапласом.

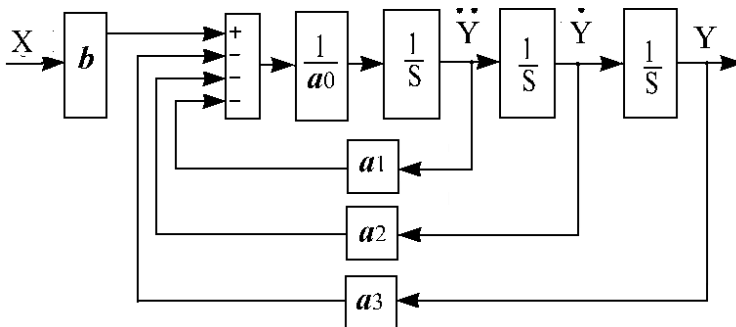


Рисунок 3.1 – Структурна схема для диференціального рівняння 3-го порядку

Таким же чином можна розв'язувати рівняння четвертого та більших порядків.

Структурну схему розв'язання диференційного рівняння n -ого порядку можна побудувати за допомогою підсистеми **SIMULINK** системи **MATLAB**. Запустити **SIMULINK** можна, натиснувши кнопку  на панелі інструментів, або введенням команди `simulink` у командному рядку робочого вікна **MATLAB**.

Після запуску **SIMULINK** з'являється вікно **Simulink Library Browser** (рис. 3.2) , що містить блоки для моделювання.

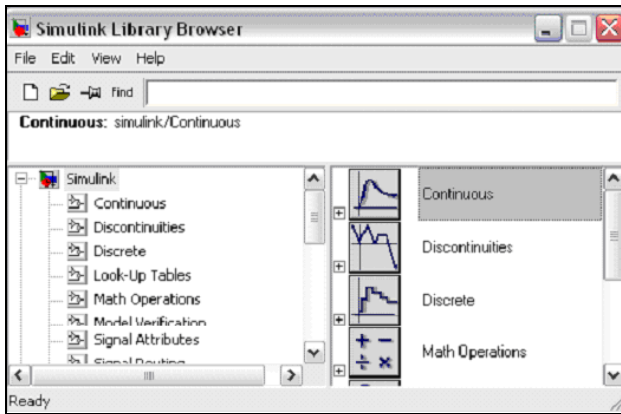


Рисунок 3.2 – Робоче вікно бібліотек **SIMULINK**

Для створення нової моделі необхідно вибрати команди меню **File | New | Model**, після чого з'явиться робоче вікно **untitled** (рис.3.3), у якому відбувається створення схем моделювання.

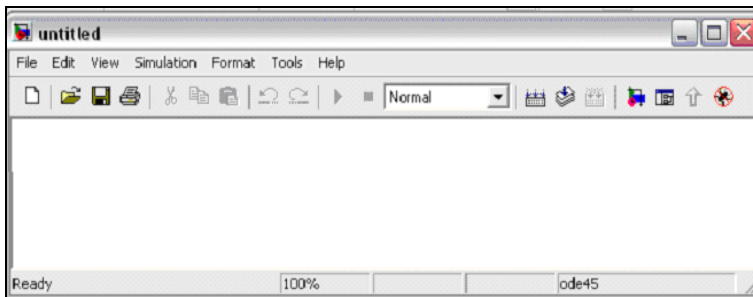


Рисунок 3.3 – Робоче вікно **SIMULINK**

Для побудови структурних схеми при рішенні різних задач будемо використовувати наступні блоки з бібліотеки **Simulink**:

- блок одиничного сигналу **Step** (розділ **Sources**);
- суматор **Sum** (розділ **Math**);
- множник на константу **Gain** (розділ **Math**);
- блок інтегрування **Integrator** (розділ **Continuous**);
- осцилограф **Scope** (розділ **Sinks**);
- мультиплексор **Mux** (розділ **Signal&Systems**).

Блок *одиничного сигналу* **Step** призначено для завдання одиничного вхідного сигналу. У вікні **Step time** треба задати час виникнення перепаду – 0.

Суматор **Sum** призначено для підсумування вхідних сигналів різних знаків. Блок має два параметри. У вікні **List of signs** можна задати послідовність знаків + та – , причому кількість знаків визначає кількість входів, а знаки – полярність вхідних сигналів. У вікні **Icon shape** можна задати форму блока: **round** або **rectangular**.

Множник на константу **Gain** призначено для множення вхідного сигналу на постійний коефіцієнт, значення якого задається у вікні.

Блок *інтегрування* **Integrator** призначено для інтегрування безперервного вхідного сигналу. У вікні **Initial condition** можна задати початкове значення вхідного сигналу.

Осцилограф **Scope** призначено для відображення часових залежностей. У вікні **Number of axis** можна задати кількість осей (каналів) осцилографа; у вікні **Time range** – межі часового інтервалу; у вікні **Tick labels** – виведення/приховання позначок на осях.

Мультиплексор **Mux** має кілька входів та один вихід. У вікні параметрів можна встановити кількість входів та вигляд блоку.

Для переносу блоків у модель їх необхідно скопіювати з бібліотеки. Для цього установите курсор на значок ліворуч від блоку, потім кнопкою миші перетягніть блок у вікно моделі. У такий спосіб скопіюйте всі блоки у вікно для побудови моделі. Перемістити блоки усередині вікна можна, виділивши блок і перемістивши його мишею. Для повороту блоку на **180°** треба виконати команди меню **Format|Flip block**, а для повороту блоку на **90°** – команди **Format|Rotate block**. Після того, як усі потрібні блоки скопійовані у вікно моделі, для кожного блоку необхідно встановити значення параметрів.

Для моделювання приклада спочатку необхідно відкрити блоки осцилографів **Scope3**, **Scope2**, **Scope1**, **Scope**, двічі клацнувши на них. Потім необхідно задати параметри моделювання, виконавши команду меню **Simulation|Configuration Parameters**. Для моделювання в меню **Diagnostics** в вікні **Automatic solver parameter selection** треба установити **none**. Для моделювання зі фіксованим кроком треба в меню **Simulation|Configuration Parameters|Solver** ввести: в полі **Stop time** – кінцевий час моделювання (8.0 для нашого прикладу); в полі **Type** (тип) – **Fixed-step** (фіксований крок); в полі **Solver** (метод) – **ode4(Runge-Kutta)**; в полі **Fixed step size** (величина кроку) – крок (0.01).

Потім запускається моделювання за допомогою команд **Simulation|Start**, або за допомогою кнопки меню ►. Результати моделювання виводяться у вікна **Scope3**, **Scope2**, **Scope1**, **Scope** (рис. 3.5). Для автомасштабування графіків треба натиснути праву кнопку миші і в контекстному меню задати параметр **Autoscale**.

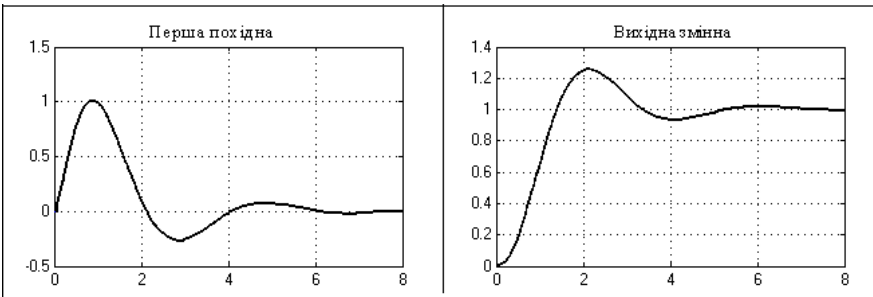


Рисунок 3.5 – Результати розв’язання диференційного рівняння

Моделювання закінчиться, коли досягнутий зазначений час, або якщо обрано пункт меню **Stop|Simulation**.

Для запису набраної моделі виберіть пункт меню **Save|File**, введіть ім'я файлу і виберіть каталог, у якому збережіть файл з розширенням **.mdl**.

Примітка: ім'я **mdl-файлу** зі схемою не повинно співпадати з ім'ям будь-якого **m-файлу**.

3.2 Дослідження характеристик системи

Для дослідження характеристик системи можна використовувати раніш розроблені *М-файл-функції* для побудови перехідних, імпульсних та частотних характеристик, або скористатися різними функціями системи **MATLAB**.

Функція **tf(f1,f2)** обчислює передатну функцію, де **f1**, **f2** – вектора-рядки з коефіцієнтами чисельника та знаменника відповідно.

Функція **esort(pole(W))** обчислює полюси передатної функції **W** та сортує їх за зростанням. Функція **pzmap(W)** виводить полюси та нулі передатної функції на комплексній площині. Функція **margin(W)** обчислює запаси стійкості по амплітуді та по фазі.

Для обчислення значень для побудови кривої Михайлова в системі **MATLAB** можна використовувати приведену *М-файл-функцію*:

```
function [X,Y]=Mihajl(den,N,dw);
%Визначення точок для кривої Михайлова
w=0;      %початкове значення частоти;
clear frequest;
for i=1:1:N;
    frequest(i)=w;  w=w+dw;
end;
omega=frequest';
n1=length(den);    %визначення розміру знаменника
for k1=1:1:N;
    D=0;
    s=j*omega(k1); %обчислення значень масиву частот
    for k2=1:1:n1; %обчислення значень для кривої Михайлова
        D=D+den(k2)*s^(n1-k2);
    end
    %обчислення дійсних та мнимих частин для кривої Михайлова
    U(k1)=real(D);    V(k1)=imag(D);
end
X=U;  Y=V; %Повернення вихідних параметрів
```

Визначимо стійкість системи, що описана таким рівнянням:
 $0.25y''' + 2y'' + 3y' + 5y = 10x$.

Для визначення стійкості побудуємо перехідну та імпульсну перехідну характеристики, які повинні приходити до якогось одного визначеного усталеного значення.

Час моделювання обираємо рівним 8 с, а крок моделювання – 0.01 с. Для побудови кривої Михайлова кількість точок для розрахунку частотних характеристик задаємо 50, а крок зміни частоти – 0.1.

```
%Дослідження заданого рівняння;
clc;
f1=[0    0  0  10]; %чисельник передатної функції;
f2=[0.25 2  3  5]; %знаменник передатної функції;
%Побудова перехідної та імпульсної функцій;
Tk=8; %кінцевий час моделювання;
h_int=0.01; %крок моделювання;
[s1,s2,T]=St_im(f1,f2,Tk,h_int);
figure(1); subplot(2,1,1);
set(plot(T,s1,'-b'),'LineWidth',1.5);
grid on; zoom on; title('h(t)');
subplot(2,1,2);
set(plot(T,s2,'-b'),'LineWidth',1.5);
grid on; zoom on; title('g(t)');
W=[tf(f1,f2)]; %Формування передатної функції
%Обчислення запасів за амплітудою, за фазою, частоти зрізу
[Am,Pm,Wca,Wcp]=margin(W);
Am, Pm, Wca, Wcp %Виведення результатів на екран
%Обчислення та побудова полюсів передатної функції;
p=esort(pole(W))
figure(2); subplot(1,2,1);
pzmap(W); title('pole');
%Розрахунок та побудова кривої Михайлова;
N=50; %кількість точок для розрахунку кривої Михайлова
dw=0.1; %крок зміни частоти;
[X,Y]=Mihajl(f2,N,dw); %Розрахунок кривої Михайлова;
subplot(1,2,2);
set(plot(X,Y,'-b'),'LineWidth',1.5);
title('Y(X)'); grid on; zoom on;
```

Після моделювання отримаємо такі результати: запас стійкості по амплітуді 1.9 дБ на частоті 18.684 рад/с, запас стійкості по фазі 3.46° на частоті зрізу 2.69 рад/с.

В результаті отримаємо такі графіки.

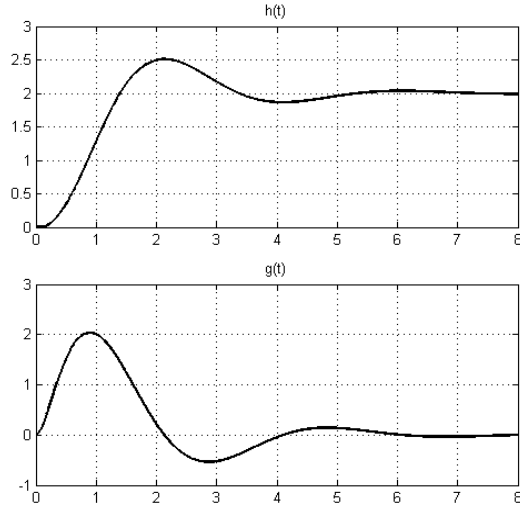


Рисунок 3.6 – Перехідна та імпульсна характеристики системи

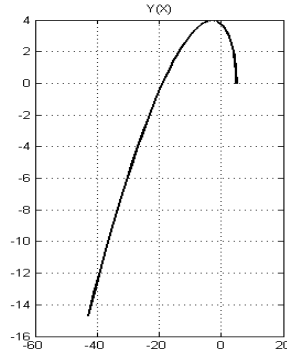
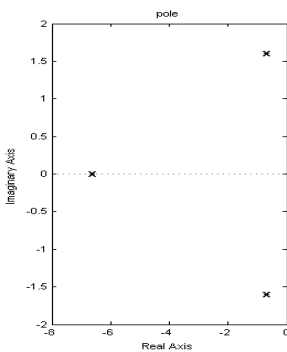


Рисунок 3.7 – Полюси системи Рисунок 3.8 – Крива Михайлова

Перехідна характеристика має усталене значення **2.0**, а імпульсна характеристика – усталене значення **0.0** (рис.3.6). Усі полюси передатної функції **$(-6.6474, -0.6763 \pm 1.5973i)$** , мають від'ємну дійсну частину (рис.3.7). Крива Михайлова проходить послідовно через **три** квадранти проти часової стрілки, весь час оточуючи початок координат (рис.3.8).

3.3 Порядок виконання роботи

1 Розробіть структурну схему системи 4-го порядку, що описується рівнянням $a_0 y'''' + a_1 y''' + a_2 y'' + a_3 y' + a_4 y = bx$, методом пониження порядку старшої похідної: Коефіцієнти для рівняння оберіть відповідно варіанту з таблиці 3.1.

2 Запустіть пакет **SIMULINK** системи **MATLAB**, у якому створіть нову модель з структурною схемою, що розроблена. Збережіть створену модель. Проведіть моделювання.

3 Розробіть **m**-файл-сценарій, в якому дослідіть характеристики системи, що описується заданим рівнянням. Отримайте графіки перехідної та імпульсної функцій, порівняйте з результатами моделювання в пакету **SIMULINK**.

4 Обчисліть запаси стійкості по амплітуді та по фазі. Визначить та побудуйте полюси передатної функції. Обчисліть та побудуйте криву Михайлова, для якої виберіть крок зміни частоти $d\omega$ з таблиці 3.1.

5 Для заданого коефіцієнта $a_{зад}$ визначить межу стійкості, використовуючи критерій стійкості Гурвіца. Знову побудуйте графіки перехідної та імпульсної функцій графіки на межі стійкості $a_{зад}$.

Таблиця 3.1

№ вар.	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	b	T_k, c	$d\omega$	$a_{зад}$
1	2.5	0.2	0.15	0.009	0.001	2.0	400	0.0052	a_0
2	2.0	0.2	0.16	0.01	0.002	4.0	300	0.006	a_1
3	0.8	0.6	0.12	0.02	0.0015	1.5	100	0.008	a_3
4	0.1	0.05	1.0	0.4	0.5	5.0	30	0.07	a_4
5	2.0	0.6	1.2	0.08	0.04	4.0	120	0.016	a_3
6	0.5	0.15	0.4	0.05	0.06	2.0	100	0.021	a_2
7	0.002	0.015	0.16	0.8	0.8	4.0	10	0.17	a_0
8	0.02	0.05	1.4	0.8	6.0	12.0	15	0.175	a_1
9	4.0	1.6	0.6	0.05	0.01	2.0	200	0.008	a_4
10	2.0	0.4	0.6	0.05	0.03	3.0	120	0.011	a_2

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження САК з корегуючими пристроями

Мета роботи: засвоїти різні засоби аналізу САК, вивчити вплив гнучкого інерційного зворотного зв'язку та складових ПІД-регулятора на якісні показники системи автоматичного керування.

4.1 Визначення якості перехідного процесу в системі MATLAB

В системі **MATLAB** для аналізу характеристик систем керування можна скористатися пакетом **LTI Viewer**, який дозволяє за передатними функціями САК дослідити усі характеристики окремих ланок та всієї замкненої системи.

Для отримання *спільної передатної функції* в системі **MATLAB** є спеціальні функції. Для отримання передатної функції двох послідовно з'єднаних ланок можна використовувати функцію **W=series(W1,W2)** або перемножити передатні функції **W=W1*W2**. Для отримання передатної функції двох паралельно з'єднаних ланок можна використовувати функцію **W=parallel(W1,W2)** або скласти передатні функції **W=W1+W2**. Для отримання спільної передатної функції ланки з зворотним зв'язком можна використовувати функцію **W=feedback(W1,Wss)**, де **W1** – передатна функція ланки в прямому ланцюзі, **Wss** – передатна функція від'ємного зворотного зв'язку.

Для запуску пакету **LTI Viewer** треба набрати у командному рядку або в *m-файлі* команду **ltiview**. На екрану з'явиться вікно, в якому вибираються команди **File|Import**. Після чого з'явиться вікно з іменами передатних функцій, які можуть бути обрані для аналізу. Можна обрати кілька передатних функцій. Для оновлення вікна перегляду імен передатних функцій необхідно обрати команду **Edit|Refresh Systems**.

В меню **Edit|Viewer Preferences** можна змінити деякі параметри для аналізу. Так, для завдання параметрів моделювання треба в цьому меню у вікні **Time vector|Define vector** задати початковий час, крок та кінцевий час моделювання часових характеристик, а у вікні **Frequency vector|Define vector** – початкову частоту, крок та кінцеву частоту моделювання частотних характеристик.

Для завдання кількості графіків та видів характеристик треба обрати команди **Edit|Plot Configurations**.

Якщо натиснути праву кнопку миші на графіку, то відкривається підменю, в якому задаються характеристики та характерні точки графіків (час регулювання, максимальне та усталене значення перехідного процесу). Якщо на характерній точці натиснути ліву кнопку миші, то буде виведено фактичне значення цієї точки. В цьому підменю можна задати вивід сітки графіка, якщо обрати команду **Grin**.

4.2 Дослідження впливу гнучкого зворотного зв'язку

Нехай передаточна функція об'єкту керування має вигляд:

$$W_{ок}(s) = \frac{k_{ок}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (4.1)$$

де $k_{ок} = 20$ – коефіцієнт передачі, $T_1 = 0.6$, $T_2 = 0.5$ – постійні часу.

Для покращення якості перехідного процесу введемо інерційний гнучкий зворотний зв'язок (ззз) з передатною функцією, що має вигляд:

$$W_{ззз}(s) = \frac{k_z s}{\tau_k s + 1},$$

де k_z – коефіцієнт передачі ззз, τ_k – постійна часу ззз ($\tau_k = 0.015$).

Якщо отримати передатну функцію замкненої системи без ззз, то можна обчислити значення коефіцієнту k_z , при якому коливальний процес має коефіцієнт згасання $d = 0.5 \dots 0.8$:

$$k_{zmin} = (\sqrt{a_{s0} a_{s2}} - a_{s1}) / k_{ок}, \quad k_{zmax} = (1.6 \sqrt{a_{s0} a_{s2}} - a_{s1}) / k_{ок}.$$

де a_{s0} – вільний член, a_{s1} – коефіцієнт при s , a_{s2} – коефіцієнт при s^2 характеристичного рівняння замкненої системи.

Коефіцієнт k_z можна обрати за формулою: $k_z = 0.65 \cdot (k_{zmax} - k_{zmin}) + k_{zmin}$.

Обчислюємо значення k_z для замкненої системи з заданої передатною функцією (4.1): $a_{s0} = a_2 = 1 + k_{ок} = 21$, $a_{s1} = a_1 = T_1 + T_2 = 1.1$, $a_{s2} = a_0 = T_1 T_2 = 0.3$.

Коефіцієнт $k_z = 0.07 \dots 0.11$. Обираємо $k_z = 0.096$.

Заданий об'єкт керування можна моделювати двома послідовно з'єднаними інерційними ланками.

Можна проаналізувати вплив гнучкого зворотного зв'язку, якщо отримати спільну передатну функцію системи за допомогою *m*-файл-сценарію, в якому запустити пакет **LTI Viewer**.

%Дослідження впливу гнучкого зворотного зв'язку на САК;

clc;

K1=20; T1=0.6; K2=1; T2=0.5; kz=0.096; tau_k=0.015;

f11=[0 K1]; %чисельник 1-ої передатної функції;

f12=[T1 1]; %знаменник 1-ої передатної функції;

```

W1=tf(f11,f12); %Формування 1-ої передатної функції;
f21=[0 K2];    %чисельник 2-ої передатної функції;
f22=[T2 1];    %знаменник 2-ої передатної функції;
W2=tf(f21,f22); %Формування 2-ої передатної функції;
W12=W1*W2;     %передатна функція розімкнутої системи
Wo=feedback(W12,1) %передатна функція замкнутої системи
fz1=[kz 0];    %чисельник передатної функції гзз;
fz2=[tau_k 1]; %знаменник передатної функції гзз;
Wk=tf(fz1,fz2); %Формування передатної функції гзз;
W12z=feedback(W12,Wk); %перед.ф-ція розімкн.системи з гзз;
Woz=feedback(W12z,1) %перед.ф-ція замкнутої системи з гзз;
ltiview        %Виклик функції LTI Viewer;

```

Після запуску *m*-файл-сценарію отримаємо такі передатні функції:

- передатна функція замкнутої системи без гнучкого зворотного зв'язку

$$\Phi(s) = \frac{20}{0.3s^2 + 1.1s + 21};$$

- передатна функція замкнутої системи з гнучким зворотним зв'язком

$$\Phi_z(s) = \frac{0.3s + 20}{0.0045s^3 + 0.3165s^2 + 3.335s + 21}.$$

Результати моделювання в **LTI Viewer** системи керування без гнучкого зворотного зв'язку **wo** ($k_{zz}=0$) та з гнучким зворотним зв'язком **woz** ($k_{zz}=0.08$) наведені на рис.4.1.

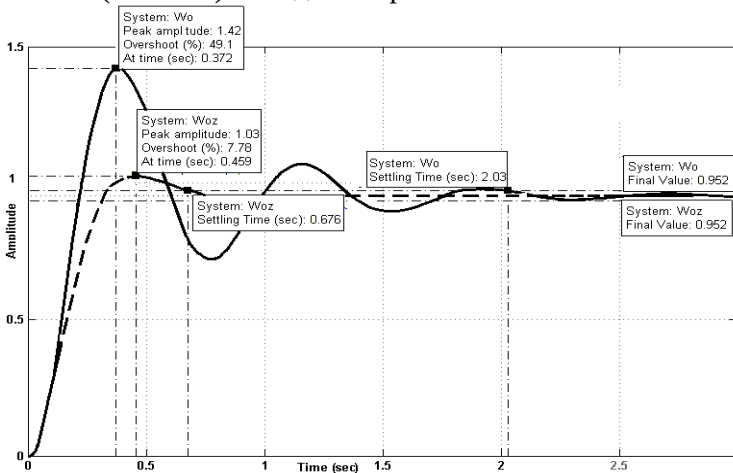


Рисунок 4.1 – Результати моделювання в **LTI Viewer** системи без гнучкого зворотного зв'язку та з гнучким зворотним зв'язком

З результатів моделювання бачимо, що введення гнучкого зворотного зв'язку значно покращило якість перехідного процесу замкненої системи: зменшились відносно перегулювання, час регулювання та наростання, але усталене значення помилки системи не змінилося. На графіках приведені значення характерних точок для систем без гнучкого зворотного зв'язку **Wo** та зі гнучким зворотним зв'язком **Woz**: максимальне значення амплітуди дорівнює **1.42** та **1.03**, відносно перегулювання – **49.1%** та **12.1%**, час регулювання – **2.03 с** та **0.676 с**. устане значення в обох випадках дорівнює **–0.952**.

4.3 Дослідження впливу ПІД-регулятора

Нехай передаточна функція об'єкту керування має вигляд:

$$W_{ок}(s) = \frac{k_{ок}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

Для покращення якості перехідного процесу використовуємо ПІД-регулятор з передатною функцією, що має вигляд:

$$W_{pec}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{\tau_k s + 1},$$

де k_p , k_i , k_d – коефіцієнти передачі пропорційної, інтегруючої та диференційної складових, τ_k – постійна часу диференційної складової ПІД-регулятора (дорівнює **0.1...0.3 k_d/k_p**).

Коефіцієнти можна обирати за такою методикою: коефіцієнти k_i , k_d прирівнюються нулю, а коефіцієнт k_p з прирівнюється k_u . При $k_p = k_u$ для системи $W_{ок}(s)$ обчислюється період автоколивань – P_u . Потім коефіцієнти обчислюються за формулами: $k_p = 0.6 k_u$, $k_i = 0.6 k_u / P_u$, $k_d = 0.15 k_u P_u$.

Система 2-го порядку завжди стійка при додатних коефіцієнтах, тому k_u прирівняємо 2, при цьому $P_u = 0.55$ с, $k_p = 1.2$, $k_i = 2.18$, $k_d = 0.165$.

Для система більшого порядку коефіцієнти k_u обчислюється за критеріями Гурвица, Михайлова та ін.

Можна проаналізувати вплив ПІД-регулятора, якщо отримати спільну передатну функцію системи та запустити пакет **LTI Viewer**.

%Дослідження впливу ПІД-регулятора на САК;

K1=20; T1=0.6; K2=1; T2=0.5;

kp=1.2; ki=2.18; kd=0.165; tau_k=0.015;

f11=[0 K1]; %чисельник 1-ої передатної функції;

f12=[T1 1]; %знаменник 1-ої передатної функції;

```

W1=tf(f11,f12); %Формування 1-ої передатної функції;
f21=[0 K2];    %чисельник 2-ої передатної функції;
f22=[T2 1];    %знаменник 2-ої передатної функції;
W2=tf(f21,f22); %Формування 2-ої передатної функції;
W12=W1*W2;     %передатна функція розімкнутої системи
Wo=feedback(W12,1); %передатна функція замкненої системи;
Wi=tf([0 ki],[1 0]); %передатна функція інтегр.складової;
Wd=tf([kd 0],[tau_k 1]); %передатна ф-ція дифер.складової;
Wpid=kp+Wi+Wd;   %передатна функція ПІД-регулятора;
W12pid=W12*Wpid; %перед. ф-ція розімк. системи з ПІД-регул.;
Wopid=feedback(W12pid,1)
ltiview %Виклик функції LTI Viewer;

```

Після запуску *m*-файл-сценарію отримаємо передатну функцію системи з ПІД-регулятором:

$$\Phi_{pid}(s) = \frac{33.66 s^2 + 24.65 s + 43.6}{0.0045 s^4 + 0.3165 s^3 + 4.775 s^2 + 25.65 s + 43.6}.$$

Результати моделювання в **LTI Viewer** системи керування без ПІД-регулятора **wo** та з ПІД-регулятором **wopid** ($k_p=1.2$, $k_i=2.18$, $k_d=0.165$, $\tau_k=0.015$) наведені на рис.4.2.

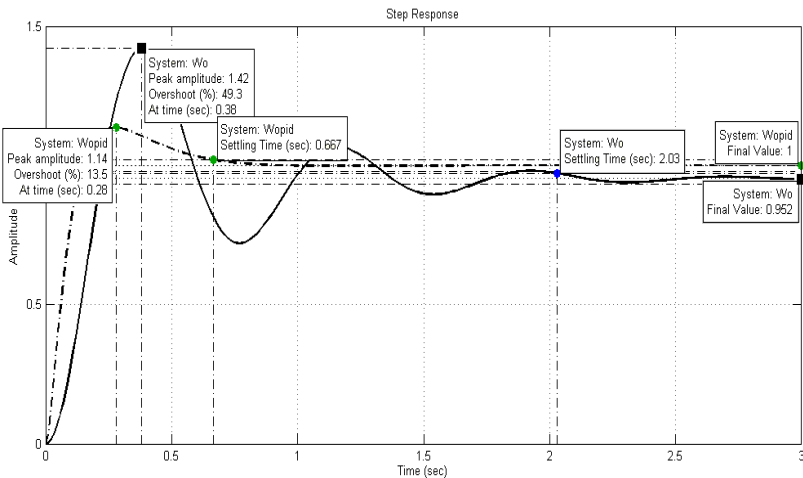


Рисунок 4.2 – Результати моделювання в **LTI Viewer** системи без ПІД-регулятора та з ПІД-регулятором

З результатів моделювання помітно, що введення ПІД-регулятора значно покращило якість перехідного процесу замкненої системи: зменшилися відносне перерегулювання, час регулювання та наростання, усталене значення помилки системи стало рівним нулю. На графіках приведені значення характерних точок для систем без ПІД-регулятора W_0 та з ПІД-регулятором W_{pid} : максимальне значення амплітуди дорівнює 1.42 та 1.14, відносне перерегулювання – 49.4% та 13.5%, час регулювання – 2.03 та 0.667 с, усталене значення – 0.952 та 1.0.

4.4 Порядок виконання роботи

1. Визначте передатні функції замкненої системи для системи з передатною функцією: $W_{ок}(s) = \frac{k_{ок}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}$ без введення та з введенням гнучкого інерційного зворотного зв'язка.

Коефіцієнти оберіть відповідно варіанту з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

№ вар.	$k_{ок}$	T_1, c	T_2, c	T_3, c	τ_k, c	$T_{кін}, c$
1	10	0.5	0.15	0.1	0.01	8
2	5	1.0	0.5	0.3	0.05	10
3	40	5.0	0.5	0.1	0.04	12
4	15	8.0	1.0	0.5	0.1	30
5	10	6.0	2.0	0.8	0.25	50
6	20	10.0	4.0	0.6	0.3	80
7	12	4.0	1.5	0.3	0.15	25
8	8	2.0	1.2	0.25	0.12	15
9	10	3.0	0.9	0.4	0.1	20
10	15	2.5	0.45	0.2	0.06	15

2. Обчисліть значення коефіцієнта гнучкого зворотного зв'язку та оберіть такий k_z , щоб система вважалась доброю (відносне перерегулювання $\sigma_{відн} < 0.25$, перехідний процес має не більш одного коливання).

Примітка. Для заданої системи 3-ого порядку отримаємо характеристичне рівняння: $T_1 T_2 T_3 s^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) s^2 + (T_1 + T_2 + T_3) s + (1 + k_{ок})$;

коефіцієнти характеристичного рівняння дорівнюють: $a_{s0} = a_3 = 1 + k_{ок}$, $a_{s1} = a_2 = T_1 + T_2 + T_3$, $a_{s2} = a_1 = (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3)$, $a_{s3} = a_0 = T_1 T_2 T_3$.

$$k_{zmin} = (\sqrt{a_{s0} a_{s2}} - a_{s1}) / k_{ок}, \quad k_{zmax} = (1.6 \sqrt{a_{s0} a_{s2}} - a_{s1}) / k_{ок}.$$

Коефіцієнт k_z можна обирати за формулою: $k_z = 0.65 k_{zmax} + 0.35 k_{zmin}$

3 Розробіть *m*-файл-сценарій для заданої замкненої системи без гнучкого зворотного зв'язку та з гнучким зворотним зв'язком. Проведіть моделювання системи з обраним значенням k_z в пакеті **LTI Viewer**. Виведіть характерні точки на графіках. Результати моделювання збережіть.

4 Визначте передатні функції замкненої системи для заданої системи без введення ПІД-регулятора та з введенням ПІД-регулятора.

5 Визначить граничне значення k_u та період автоколивань P_u .

Примітка. Для системи 3-го порядку k_u можна обчислити за допомогою критерію Гурвіца $k_u = (a_{s2} a_{s1} / a_{s3} - 1) / k_{ок}$.

6 Обчисліть значення коефіцієнти k_p , k_i , k_d згідно приведеної методики за формулами: $k_p = 0.6 k_u$, $k_i = 0.6 k_u / P_u$, $k_d = 0.15 k_u P_u$.

7 Розробіть *m*-файл-сценарій для замкненої системи без введення ПІД-регулятора та з введенням ПІД-регулятора. Проведіть моделювання системи з обчисленими значеннями коефіцієнтів ПІД-регулятора в пакеті **LTI Viewer**. Виведіть характерні точки на графіках. Результати моделювання збережіть.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ

1. Що таке система автоматичного керування (САК)? З яких компонентів вона складається?
2. Дайте визначення та приведіть приклади систем стабілізації, слідування, термінальної.
3. Дайте визначення передатної функції ланки.
4. Що таке характеристичне рівняння, полюса та нулі передатної функції?
5. Які ланки є позиційними, диференційними, інтегруючими? Приведіть рівняння та передаточні функції таких ланок.
6. Що таке перехідна та імпульсна перехідна функції?
7. Що таке частотні характеристики? Які частотні характеристики Ви знаєте?
8. Що таке стійкість САК?
9. Як визначити стійкість ланки?
10. Яка умова є необхідною для стійкості системи?
11. Які критерії стійкості Ви знаєте?
12. Які показники якості перехідного процесу Ви знаєте?
13. Приведіть визначення різних зворотних зв'язків (головні, місцеві, одиничні, додатні, від'ємні, гнучкі, жорсткі,).
14. Які послідовні корегуючі пристрої Ви знаєте?
15. Яка роль пропорційної, диференційної та інтегруючої складових ПІД-регулятора?
16. Які системи є статичними, а які астатичними?
17. Які системи є дискретними?
18. З яких обов'язкових складових складається цифрова САК?
19. Які засоби для аналізу дискретних систем Ви знаєте?
20. Які властивості у Z -перетворення?
21. Як перетворити безперервну систему в дискретну?
22. Як визначити період дискретизації дискретної системи?

ЗМІСТ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Титульний лист з номером варіанту.
2. Результати лабораторної роботи № 2.
 - 2.1. Передатні функції та графіки часових і частотних характеристик аперіодичних ланок 1-го порядку.
 - 2.2. Передатні функції та визначання типів ланок 2-го порядку з розрахунком відповідних коефіцієнтів.
 - 2.3. Графіки часових і частотних характеристик ланок 2-го порядку.
3. Результати лабораторної роботи № 3.
 - 3.1. Структурна схема розв'язання заданого рівняння.
 - 3.2. Результати моделювання заданого рівняння в пакеті **SIMULINK** та за допомогою *m*-файлу.
 - 3.3. Розрахунок межі стійкості для заданого коефіцієнта, що обчислена за допомогою критерію Гурвіца та графіки перехідної і імпульсної функцій на межі стійкості.
4. Результати лабораторної роботи № 4.
 - 4.1. Розрахунок коефіцієнту зворотного зв'язку $k_z \text{ обч}$ ($k_{z \text{ min}}$, $k_{z \text{ max}}$) для заданої системи.
 - 4.2. Передатні функції систем без гнучкого зворотного зв'язку та зі гнучким зворотним зв'язком.
 - 4.3. Результати моделювання систем без гнучкого зворотного зв'язку та зі гнучким зворотним зв'язком в пакеті **LTI Viewer** з характерними точками на графіках.
 - 4.4. Розрахунок коефіцієнтів ПІД-регулятора для заданої системи: k_u , P_u , $k_{p\text{-обч}}$, $k_{i\text{-обч}}$, $k_{d\text{-обч}}$.
 - 4.5. Передатні функції систем без ПІД-регулятора та з ПІД-регулятором.
 - 4.6. Результати моделювання систем без ПІД-регулятора та з ПІД-регулятором в пакеті **LTI Viewer** з характерними точками на графіках.
5. Стислі відповіді на контрольні питання.
6. Електронний носій з розробленими програмами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
2. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с
3. Гостев В.И., Худолий Д.А., Баранов А.А. Синтез цифровых регуляторов систем автоматического управления. – К.: Радіоаматор, 2000. – 400с.
4. Борис Лурье, Пол Джекоб Энрайт. Классические методы автоматического управления: Учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 628с.
5. Шишмарев В. Основы автоматического управления. –М.: Изд-во Академия, 2008. – 352с.
6. Коновалов Б., Лебедев Ю. Теория автоматического управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во Лань, 2010. – 224с.
7. Теория автоматического управления. / С.Душин С., Н.Зотов, Д.Имаев и др.: Под ред. В.Яковлева. – М.: Изд-во Высшая школа, 2009. – 568с.
8. Герасимьяк Р.П. Теорія автоматичного керування. Збірник задач: Навчальний посібник. – О.: Наука і техніка, 2003. – 108с.
9. Корнеев Н., Кустарев Ю., Морговский Ю. Теория автоматического управления с практикумом. – М.: Изд-во Академия, 2008. – 224с.
10. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.
11. Никулин Е. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: Учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 640с.
12. Юревич Е. Теория автоматического управления, 4-е изд. Серия, Учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560с.