

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Доктор технічних наук
професор

Синеглазов В.М.
_____ 2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ
“БАКАЛАВР”

Тема: АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ
СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ З НЕЛІНІЙНИМ
ВИКОНАВЧИМ ПРИВОДОМ

Виконавець:

Завгородній Р.В.

Керівник: ктн, професор

Аблесімов О.К.

Нормоконтролер: к.т.н., професор

Філяшкін М.К.

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
ДТН, професор

Синеглазов В.М.

“ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи студенту

Завгородньому Р.В.

Тема роботи: “ Автоматизація проектування регуляторів систем стабілізації з нелінійним виконавчим приводом”

1. Термін виконання проекту (роботи): з « 01 » 04 2023р по «25» 06 2023р.

2. Вихідні данні до роботи: лінійна система стабілізації; перерегулювання по куту курсу не перевищує 10%; час регулювання становить не більше 100 с; технічні параметри системи - відповідно до аналогів промислових зразків.

3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1. Аналіз робочих процедур розробки систем автоматизованого проектування.
2. Постановка задачі розробки системи автоматизованого проектування оптимальних регуляторів для нелінійних систем стабілізації інерційних об'єктів.
3. Дослідження нелінійної системи стабілізації.
4. Проектування оптимального регулятора нелінійної системи.
5. Алгоритм функціонування системи автоматизованого проектування.
6. Розробка програмно-методичного забезпечення синтезу регулятора.

4. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: 1. Типова функціональна схема системи стабілізації. 2. Структурна схема нелінійної системи стабілізації. 3. Модель досліджуваної системи з промисловим регулятором. 4. Перехідні характеристики системи стабілізації з різними типами регуляторів. 5. Схема ПІД-регулятора з нелінійною корекцією. 6. Схема алгоритму системи автоматизованого проектування. 7. Програмне забезпечення автоматизованого синтезу регулятора.

5. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	ПІДБІР ЛІТЕРАТУРИ	01.04-10.04	
2	ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ	11.04-12.04	
3	ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ	13.04-20.04	
4	МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ	21.04-31.04	
5	МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ	01.05-10.05	
6	ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ	11.05-19.05	
7	РОЗРОБКА ПРЕЗЕНТАЦІЇ	20.05-23.05	
8	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	24.05- 26.05	

6. Дата видачі завдання _____

Керівник: професор _____  _____ Аблесімов О.К.

Завдання прийняв до виконання _____  _____ Завгородній Р.В.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ.....	
2. ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ.....	
3. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ	
4. ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ.....	
ВИСНОВКИ	
ЛІТЕРАТУРА.....	

ВСТУП

Особливе місце у складі автоматизованих комплексів управління інерційними об'єктами займають системи стабілізації. Вони являють собою спеціальні системи автоматичного управління, призначені для наведення та збереження заданого просторового положення об'єкта керування при коливаннях його основи.

У більшості випадків на практиці зустрічаються нелінійні системи стабілізації, динамічні процеси яких описуються нелінійними рівняннями. Задачі аналізу та синтезу таких систем набагато складніші за аналогічні задачі для лінійних систем. В процесі розвитку теорії автоматичного керування було розроблено різні математичні методи аналізу та синтезу нелінійних систем, кожен з яких може бути застосованим лише до певного класу систем та задач. Тому, універсальних аналітичних методів дослідження нелінійних систем не існує. Дослідження нелінійних систем є однією з найбільш актуальних задач техніки та теорії регулювання.

Створення гарантовано конкурентоздатних систем стабілізації руху складних інерційних об'єктів, у тому числі, нестійких, з мінімальними витратами на проектування є однією з головних вимог досягнення успіху на ринку такого класу пристроїв. Разом з тим, якість функціонування проектованої системи СС інерційного об'єкта буде тим краще, чим точніше визначені її параметри.

При одночасній дії на систему сигналу керування, постійних чи змінних збурюючих впливів і перешкод виникає необхідність у вирішенні задачі мінімізації помилки системи стабілізації. Для забезпечення оптимальних показників якості процесу керування широко застосовується корекція систем керування, за допомогою якої можна змінити динамічні властивості системи. Корекція здійснюється зміною параметрів системи керування або її структури. Для цього до складу систем автоматичного керування вводяться коригувальні пристрої, які являють собою динамічні ланки різної фізичної природи зі

спеціально обраними передатними функціями. В даний час на світовому ринку до складу систем керування пропонуються універсальні мікропроцесорні регулятори, які потребують спеціального налаштування.

В ході проектування систем стабілізації з промисловими регуляторами виникає необхідність дослідження впливу їх коефіцієнтів на перехідні процеси або вибору коефіцієнтів за бажаним видом перехідної функції. При цьому важлива наявність автоматизованого механізму підбору коефіцієнтів, який би забезпечував швидкий та достатньо точний синтез.

Пріоритетним шляхом вирішення задачі проектування систем стабілізації інерційних об'єктів є комплексна автоматизація проектних, конструкторських експериментальних, технологічних та інших робіт на базі сучасної обчислювальної техніки, яка стає незамінним засобом підвищення науково-технічного змісту проекту, скорочення термінів і вартості його реалізації за рахунок обробки і перетворення великого обсягу інформації, зниження ступеня технічного ризику при проектуванні, та ін. Забезпечення цього напрямку і є головною передумовою розробки і впровадження систем автоматизованого проектування.

РОЗДІЛ 1

ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ

1.1 Області застосування та функціональний склад нелінійних систем автоматичного керування

Процеси керування, що протікають у природі, техніці й суспільстві, надзвичайно різноманітні як за їх цілями і програмами, так і за фізичною сутністю.

Як показує аналіз літературних джерел, незважаючи на те, що автоматизовані системи керування істотно різняться між собою за конструкцією, описуються вони однотипними функціональними схемами.

Узагальнену схему системи автоматичного керування показано на рис.1.1, де відображено взаємодію всіх зазначених вище елементів.

Основним елементом системи є об'єкт керування й регулятор.

Об'єктом керування називається робочий механізм, агрегат, машина або технологічний процес, режими роботи яких автоматизуються.

Регулятор – це комплекс приладів, механізмів і машин, які здійснюють управління режимом роботи об'єкта керування за певним законом.

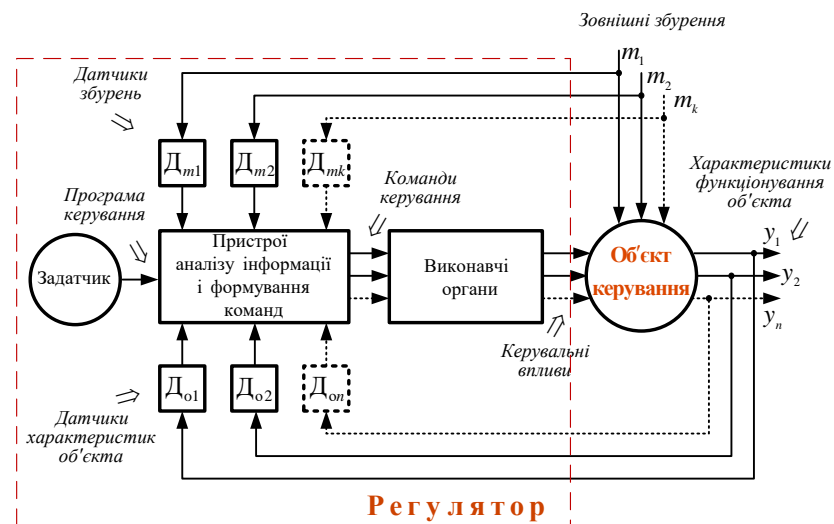


Рис. 1.1 Узагальнена схема системи автоматичного керування

Використання лінійних моделей систем дозволяє проводити достатньо повні дослідження при їх проектуванні, модернізації або аналітичному проектуванні.

Наприклад, об'єкти керування. Лінійна типова модель об'єкту керування має вигляд, наведений на рис.1.2: ліворуч – базова модель, праворуч - після еквівалентних перетворень. Верхня – модель інерційного об'єкту керування ($\tau = 0$), нижня - об'єкту керування з чистим запізненням.

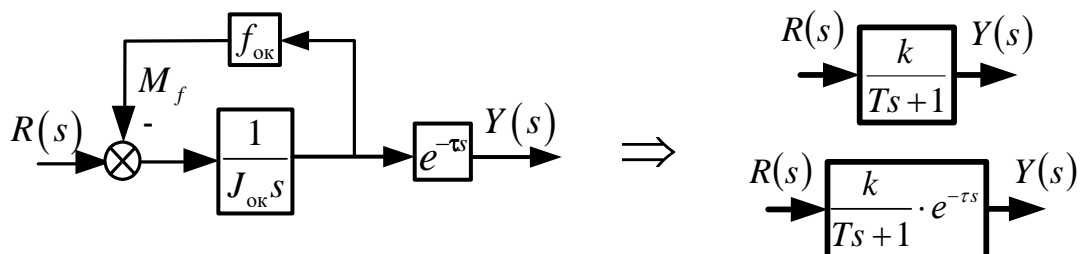


Рис. 1.2 Лінійна модель об'єкту керування:

$J_{ок}$ - момент інерції; $f_{ок}$ - коефіцієнт в'язкого тертя; τ - час запізнення;

M_f - момент тертя; $k = 1/f_{ок}$ - передатний коефіцієнт; $T = J_{ок}/f_{ок}$ - постійна часу

На практиці тертя об'єкту керування про середовище його переміщення або в опорах при поворотах щодо основи сухе. Момент тертя приблизно сталий по амплітуді та завжди перешкоджає руху об'єкту керування.

Розглянемо компоненти регулятора.

Датчики характеристик об'єкту керування та збурень.

Датчики кута і швидкості відхилення об'єкта керування виконують відповідно на базі триступеневого та двоступеневого гіроскопів. Отримані моделі датчиків представлені на рис.1.5, 1.6.

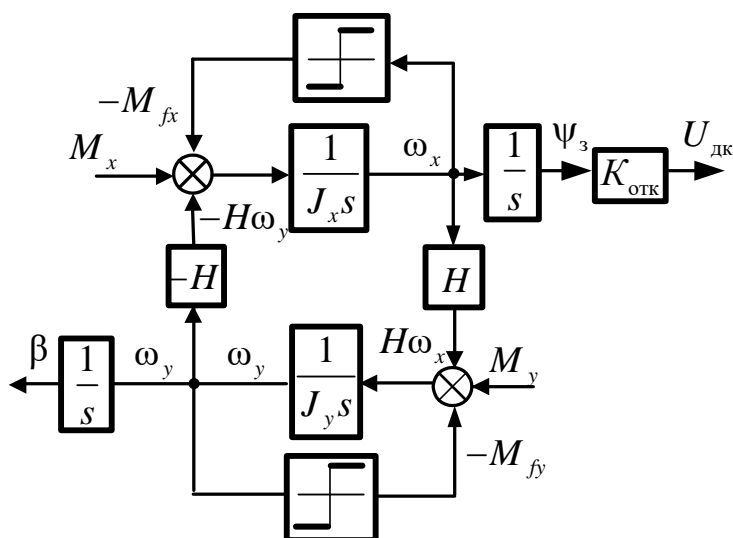


Рис. 1.5 Структурна схема датчика кута

Датчик швидкості (рис.1.6) є інерційною ланкою другого порядку, яка містить місцевий нелінійний зворотний зв'язок, обумовлений сухим тертям в опорах рамки двоступеневого гіроскопа.

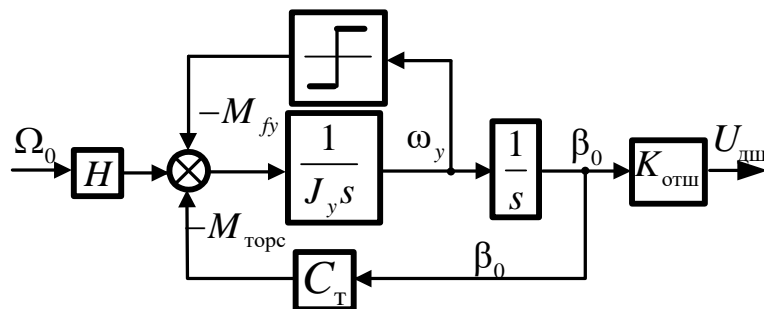


Рис. 1.6 Структурна схема датчика швидкості

Датчик лінійних прискорень також є інерційною ланкою другого порядку, яка містить місцевий нелінійний зворотний зв'язок, обумовлений сухим тертям в опорах підвісу маятника. Модель датчика наведено на рис. 1.7.

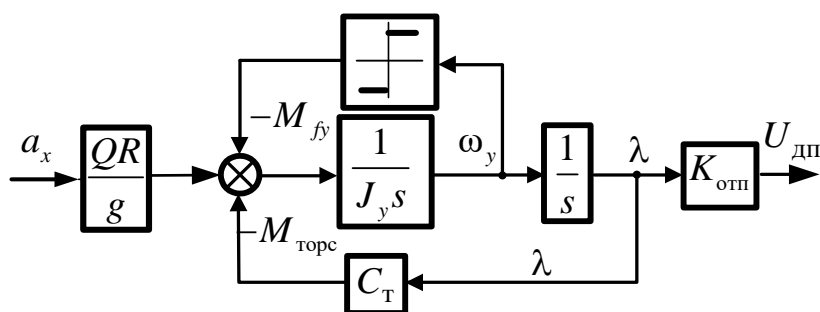


Рис. 1.7 Структурна схема датчика лінійних прискорень

Пристрої аналізу інформації і формування команд.

Контури підсумовування сигналів є функціонально необхідними елементами регулятора.

Структурну схему контуру представлено на рис. 1.8. Тут $0 < c_k < 1$, $0 < c_{ш} < 1$, $0 < c_0 < 1$ - передатні коефіцієнти потенціометрів, що залежать від положення їхніх рухливих контактів; U_k - сигнал, пропорційний, наприклад, кутовому відхиленню об'єкта керування; $U_{ш}$ - сигнал, пропорційний швидкості кутового відхилення об'єкта керування; U_{Σ} - сумарний сигнал.

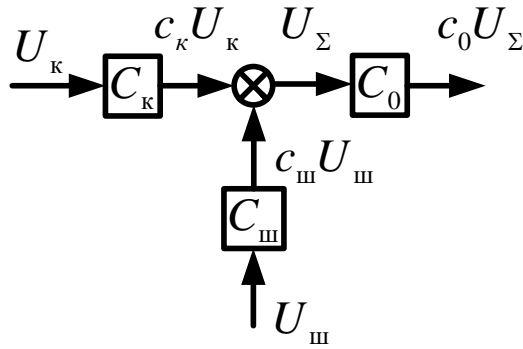


Рис. 1.8 Структурна схема контуру підсумовування

Для формування та посилення сигналів керування в складі регулятора застосовуються електронні підсилювачі. Такі підсилювачі моделюються безінерційними динамічними ланками з передатною функцією $W(s) = k_{еп}$.

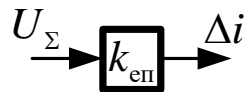


Рис. 1.9 Модель електронного підсилювача

Виконавчі органи.

Виконавчий привід призначений для формування моментів стабілізації або керування. Виконавчі приводи аналогічні по своїх статичних характеристиках і динамічним властивостям і мають схожі структурні схеми

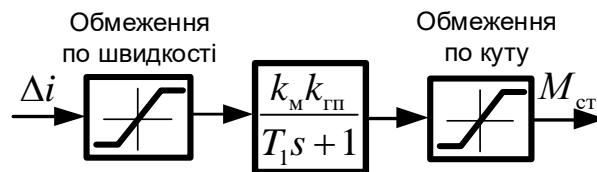


Рис. 1.10 Нелінійний виконавчий привід

Кут відхилення руля виконавчого приводу та швидкість його повороту в реальній системі мають природні обмеження, тобто виконавчий привід є нелінійним.

Об'єднуючи моделі елементів відповідно з функціональною схемою, отримуємо (рис. 1.11) структурну схему системи стабілізації.

Перш за все, параметри систем, які мають нелінійні елементи, залежать від принцип суперпозиції - реакція нелінійної системи не дорівнює сумі реакцій на окремі впливи.

Особливістю нелінійних систем є можливість виникнення в них граничних циклів - незатухаючих коливань. У загальному випадку граничний цикл не є синусоїдальним.

Особливістю нелінійних систем слід вважати і явище стрибкоподібного резонансу. Ілюстрацію останнього надано на рис. 1.13.

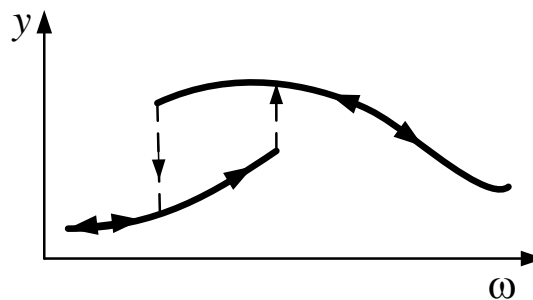


Рис.1.13 Явище стрибкоподібного резонансу

В стійкій нелінійній системі може існувати кілька різних станів рівноваги, до саме - залежить від початкових умов.

Нелінійні диференціальні рівняння таких систем не мають будь-яких загальних методів рішення. Для дослідження нелінійних диференціальних рівнянь

Таким чином, до нелінійних систем не застосовні методи класичної лінійної теорії автоматичних систем та методи розрахунку регуляторів для лінійних систем.

1.2 Завдання автоматизованого проектування

Система автоматизованого проектування (САПР) — автоматизована система, призначена для автоматизації технологічного процесу проектування виробу. Основні складові САПР наведено на рис. 1.14.



Рис. 1.14 Складові САПР

Автоматизоване проектування - Computer-aided design (CAD), є технологією суть якої полягає у використанні комп'ютерних систем для полегшення створення, змін, аналізу і оптимізації проектів.

Перевагами методів автоматизованого проектування є те, що вони дозволяють розробнику систем побачити поведінку кінцевого виробу і виявити виробництва продукту є значною, автоматизація призводить до скорочення термінів і вартості розробки.

Досягнення цих цілей забезпечується шляхом:

- інформаційної підтримки і автоматизації процесу прийняття рішень;
- підвищення якості управління проектуванням;
- застосування методів варіантного проектування і оптимізації.

Відповідно до сучасних уявлень автоматизація проектування дозволить підвищити якість проектування завдяки:

- розширенню кількості розглянутих проектних рішень;
- використанню нових методів і технічних засобів, що розширюють діапазон операцій у творчому процесі синтезу нової конструкції.

Базові компоненти забезпечення автоматизованого проектування наведені на рис. 1.15.



Рис. 1.15 компоненти забезпечення

Математичне забезпечення - це сукупність математичних моделей

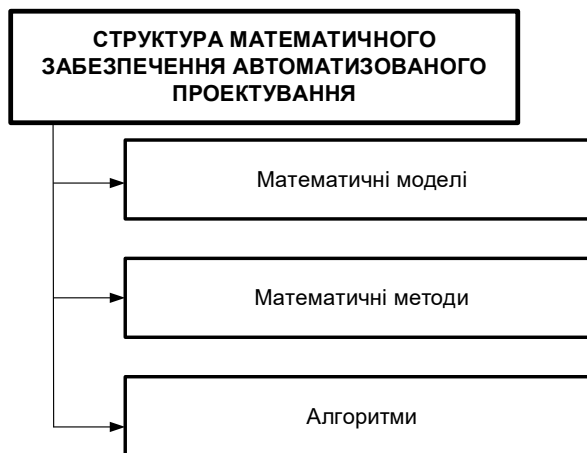


Рис. 1.16. Структура забезпечення

Математична модель - група математичних об'єктів і відносин між ними, що відображає деякі властивості модельованого виробу або процесу.

Дане визначення має на увазі, що математична модель не повинна бути рахунок спрощення його уявлення.

Можна стверджувати, що чим вище ступінь тотожності моделі оригіналу, тим складнішою вона буде для складання та дослідження. Тому при проектуванні дослідженні, об'єктивно має підвищуватись. Таким чином, в ході проектування процесів і технічних систем можуть використовуватися математичні моделі різних рівнів складності.

Вагомими при математичному моделюванні приймаються як правило такі компоненти:

- рівняння руху, що враховують очікувані умови експлуатації об'єкта;
- рівняння напруженого стану елементів виробу;

- рівняння, що описують зв'язки критерію економічної ефективності з фізичними властивостями.

Чисельним виразом властивостей математичної моделі є її параметри, значення яких не можуть виходити за межі, що встановлюються умовами працездатності.

На математичному забезпеченні як на фундаменті будуються основні компоненти автоматизації проектування – пакети прикладних програм (ППП) (рис.1.17).

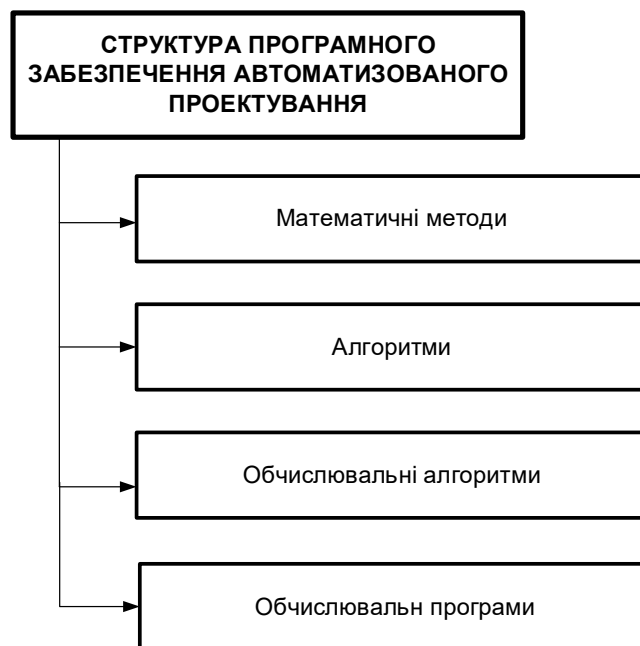


Рис. 1.17 Структура

Представляючи весь обсяг робіт зі створення ППП у виді піраміди, на нижньому її рівні розміщують математичні моделі, методи. На наступному – програмування обчислювального алгоритму. Досить досвідчений програміст сполучає два верхніх ступені програми, розробляючи зручним для нього методом обчислювальний алгоритм, а потім записуючи його алгоритмічною мовою самих програм.

До складу операційної системи входять, як правило, керуюча програма, програма лінгвістичної обробки і обслуговуюча програма.

ляції вихідної прикладної програми в форму, прийнятну для ЕОМ. Обслуговуюча програма забезпечує стандартні процедури обслуговування, такі, як компіляція системи, сортування, об'єднання елементів набору даних, редагування між програмних зав'язків, операції з файлами.

1.3 Мета та завдання роботи

У цей час роботи, пов'язані з дослідженням і проектуванням сучасних систем керування, становлять одну з основних компонентів науково-технічного прогресу. У свою чергу, існуючі концепції проектування систем висувають на перший план автоматизацію процесу проектування.

Враховуючи вищевикладене, стає ясною доцільність створення спеціалізованого математичного та програмного забезпечення, орієнтованого на автоматизоване проектування регуляторів нелінійних систем стабілізації.

У зв'язку з цим метою роботи є

Розробка математичного та програмного забезпечення автоматизованого проектування регуляторів систем стабілізації з нелінійним виконавчим приводом.

При цьому були поставлені завдання:

- визначити основні особливості нелінійних систем стабілізації;
- визначити завдання та основні процедури автоматизованого проектування;
- обґрунтувати критерії оцінки якості нелінійних систем на стадії проектування;
- вибрати математичний апарат опису нелінійних систем;
- розробити математичну модель нелінійної системи стабілізації;
- сформулювати алгоритм проведення теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню можливості виникнення в системі граничних циклів (автоколивань);
- розробити методику синтезу оптимального регулятора, що виключає ймовірність виникнення в системі стабілізації граничних циклів;
- провести експериментальну перевірку дієздатності та достовірності запропонованих рішень;
- розробити структуру й алгоритм автоматизації проектування оптимального регулятора для нелінійних систем стабілізації;
- розробити програмно-методичне забезпечення синтезу оптимального регулятора .

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

У загальному випадку якість роботи будь-якої системи стабілізації визначається її точністю, тобто здатністю системи підтримувати значення підвищення точності, то досягти високої точності системи можна лише за врахування нелінійностей.

Стійкість технічних систем є обов'язковою умовою їх функціонування. Стійкість лінійної стаціонарної системи ми завжди можемо досліджувати з до аналізу даної системи. У більшості випадків стійкість систем високого порядку, що містять нелінійності, піддається досліджуванню тільки шляхом імітаційного моделювання.

Наближеними методами опису нелінійних систем є статистична та гармонічна лінеаризація.

Метод статистичної лінеаризації заснований на заміні нелінійного елемента лінеаризація використовується при дослідженнях випадкових процесів в нелінійних системах.

Більш універсальний, на наш погляд, метод гармонійної лінеаризації (описуючої функції). Метод базується на заміні нелінійного елемента лінійною еквівалентної йому лінійної ланки.

Нехай структурна схема нелінійної системи має вид зображений на рис.2.1.

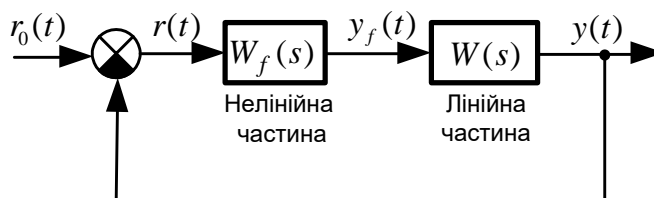


Рис. 2.1 Нелінійна система

Припустимо, що лінійна частина системи володіє властивостями низькочастотного фільтра, тобто не пропускає вищі гармоніки (гіпотеза фільтра). Якщо це припущення підтверджується і на вході нелінійної частини діє

синусоїдальний сигнал, то з достатньою точністю можна вважати, що вихідні коливання гармонійні і розглядати доцільно лише їх першу гармоніку.

$$W_f = \frac{y_f(t)}{r(t)},$$

де $r(t) = a_m \sin \omega t$; $y_f(t) = F(a_m \sin \omega t)$.

Розкладемо функцію $y_f(t)$ в ряд Фур'є

$$y_f(t) = F(a_m \sin \omega t) = a_{m0} + \sum_{i=1}^k N_k \sin k\omega t + \sum_{i=1}^k C_k \cos k\omega t.$$

Розглядаємо лише першу гармоніку розкладу для нелінійної частини із симетричною і непарною характеристикою

$$y_f(t) = F(a_m \sin \omega t) = N_1(a_m, \omega) \sin \omega t + C_1(a_m, \omega) \cos \omega t,$$

де $N_1(a_m, \omega)$ та $C_1(a_m, \omega)$ - коефіцієнти розкладу.

Врахувавши те, що $\cos \omega t = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d \sin \omega t}{dt}$, напишемо

$$W_f = \frac{y_f(t)}{x(t)} = \frac{N_1(a_m, \omega) \sin \omega t + \frac{1}{\omega} C_1(a_m, \omega) \frac{d}{dt} \sin \omega t}{a_m \sin \omega t}.$$

Замінімо $\frac{d}{dt} \equiv s$:

$$W_f = \frac{N_1(a_m, \omega)}{a_m} + \frac{C_1(a_m, \omega)}{a_m} \cdot \frac{s}{\omega}.$$

Знайдемо описуючу функцію або коефіцієнти гармонійної лінеаризації, замінюючи s на $j\omega$

$$W_f(a_m, \omega) = \frac{N_1 + jC_1}{a_m} = \frac{N_1}{a_m} + j \frac{C_1}{a_m} = q + jq'.$$

Беручи до уваги набуває вигляду

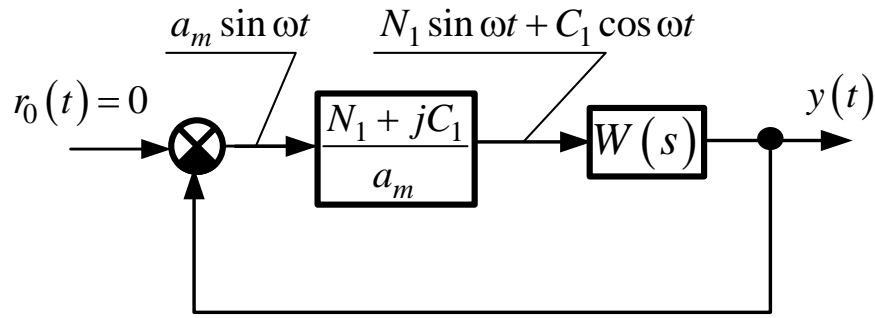


Рис. 2. модель нелінійної системи

Отже, при гармонійній лінеаризації нелінійна характеристика нелінійного елемента. При поданні на вхід сигналів з амплітудами різної величини, нахил прямої відповідно змінюється.

Застосування методу гармонійної лінеаризації дозволяє в подальшому використовувати для нелінійних систем класичні методи досліджень лінійних систем автоматичного керування.

Граничний цикл виникає в системі за умови повного відновлення сигнал $r(t) = a_m \sin \omega t$ має дорівнювати сигналу на виході системи, взятому з протилежним знаком $r(t) = -y(t)$:

$$a_m \sin \omega t = -W(j\omega)W_f(a_m, \omega) \cdot a_m \sin \omega t.$$

З останнього рівняння маємо

$$1 + W(j\omega)W_f(a_m, \omega) = 0. \quad (2.1)$$

Якщо при деяких значеннях амплітуди a_{m0} й частоти ω_0 гармонійного сигналу $r(t)$ рівняння (2.1) задовольняється, то можна передбачити існування в системі граничного циклу.

У стійкому граничному циклі амплітуда коливань повертається до колишнього значення (рис. 2.3) після своєї зміни, викликаній тим або іншим збуренням.

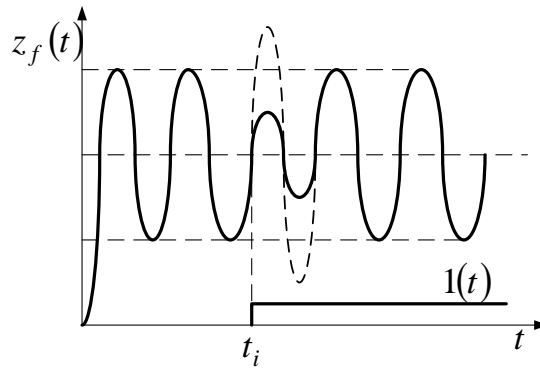


Рис. 2.3 граничний цикл

В іншому випадку граничний цикл називається нестійким. Якщо, наприклад, коливання із часом загаснуть. І навпаки, якщо амплітуда коливань збільшиться (рис. 2.4 б), то вона буде необмежено зростати або в системі виникне новий граничний цикл із іншою амплітудою й/або частотою.

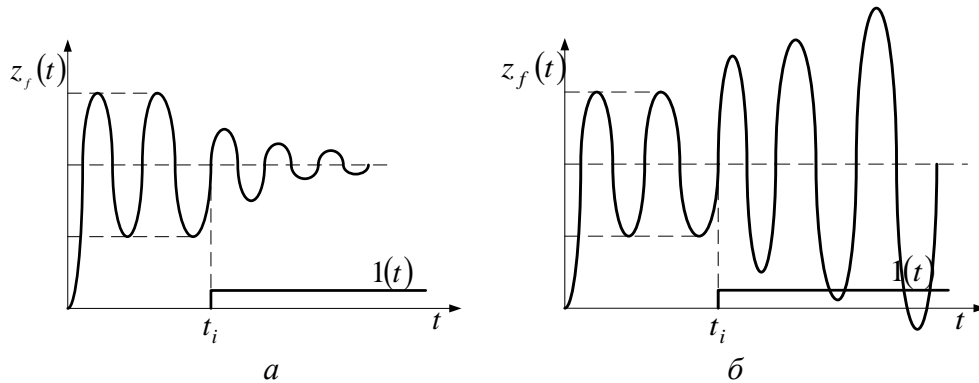


Рис. 2.4 Нестійкий граничний цикл:

a – при зменшенні амплітуди коливань; *б* – при збільшенні амплітуди коливань

У якості критерію оцінки стійкості граничних циклів найбільш часто системи $W(j\omega)$, то точки їх перетину відповідають стійкі автоколивання, а якщо входимо, то - нестійкі.

Графічну інтерпретацію критерію подано на рис.2.5.

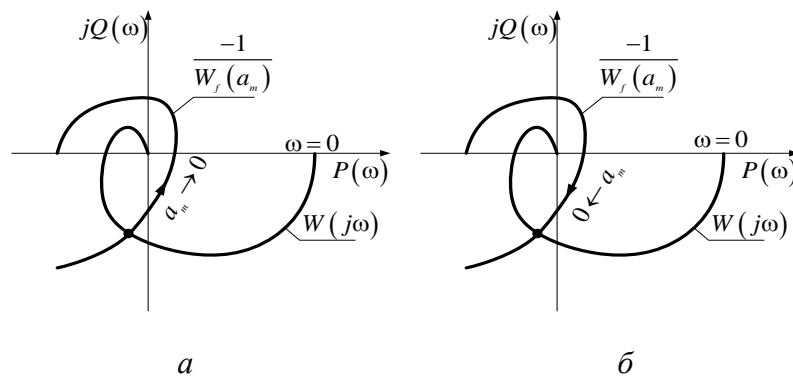


Рис. 2.5 Критерій Гольдфарба:

У системі, представленій частотними характеристиками на рис. 2.5 а, устанавлюються стійкі автоколивання, тобто маємо стійкий граничний цикл.

У системі, наведеної на рис. 2.5 б, - автоколивання нестійкі, і відповідно нестійкий граничний цикл.

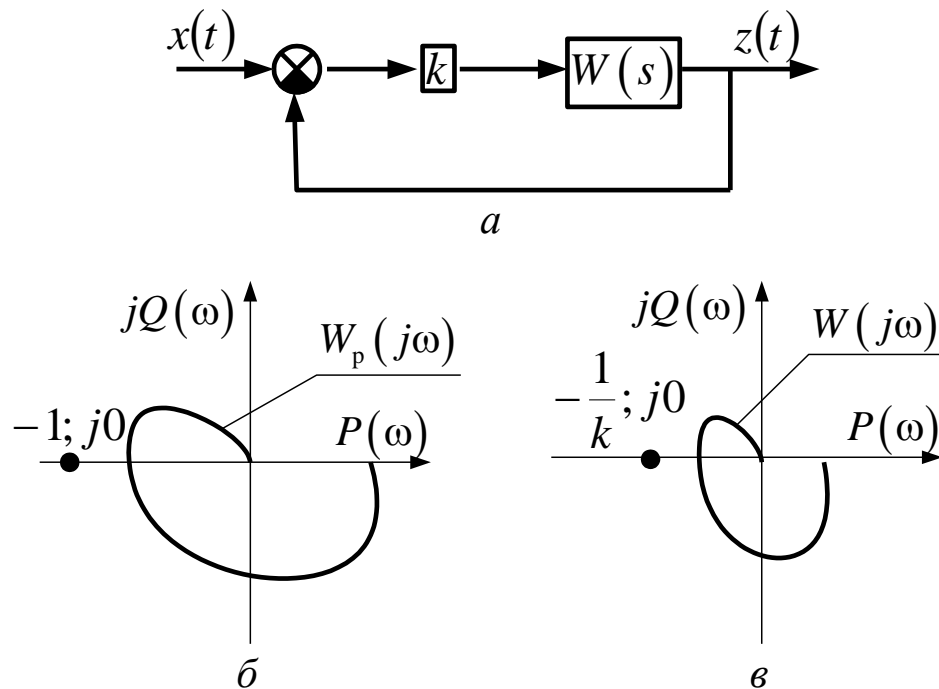


Рис.2.6 Огляд критерію Найквіста:
 а – структурна схема; б – АФЧХ розімкненої системи;
 в – масштабована АФЧХ розімкненої системи.

Знаходимо еквівалентну передатну функцію системи:

$$W_{\text{екв}}(s) = \frac{kW(s)}{1 + kW(s)} = \frac{kW(s)}{1 + W_p(s)}$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$1 + kW(s) = 1 + W_p(s) = 0.$$

На основі останнього, переходячи до частотних характеристик, одержуємо:

$$W_p(s) = kW(s).$$

Якщо в системі можливі автоколивання з деякою частотою ω_0 , то АФЧХ проходить через характеристичну точку $(-1; j0)$. Власна частота автоколивань може бути знайдена з системи рівнянь

$$\begin{cases} P(\omega) = -1 \\ Q(\omega) = 0 \end{cases}$$

Перетворимо вираз $W_p(j\omega) = kW(j\omega) = -1$, розділивши ліву й праву частини рівняння на коефіцієнт підсилення k :

$$W(j\omega) = -\frac{1}{k}.$$

Тоді, відповідно до вищевикладеного, необхідно буде побудувати АФЧХ точки, а ми можемо лінеаризувати систему в малій околиці цієї робочої точки й застосувати методи лінійної теорії.

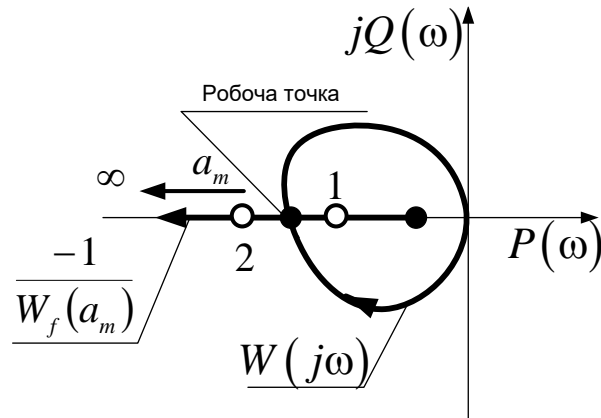


Рис. 2.7 Критерій описуючої функції

Припустимо, що амплітуда a_m граничного циклу трохи зменшилася за критерію Найквіста стане нестійкою. Амплітуда коливань a_m стане зростати, прагнучи до колишнього значення - робочої точки.

Тепер припустимо, що амплітуда a_m трохи збільшилася. Тоді, робоча точка перейде в положення 2, тобто вийде за межі АФЧХ. Система відповідно до зменшуватися й робоча точка повернеться у вихідне положення.

Принцип міркувань для систем з іншими видами АФЧХ лінійної і нелінійної частин залишається незмінним.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ

3.1. Визначення параметрів

Виходячи із завдань, що стоять перед дослідником та керуючись структурною схемою нелінійної системи (рис. 1.11), перейдемо до моделі системи стабілізації з нелінійним виконавчим приводом.

Урахування нелінійностей в датчиках кута та швидкості та їх впливу на лінійних моделях датчика кута і датчика швидкості.

Математична модель системи стабілізації з нелінійним виконавчим приводом приймає вигляд, зображений на рис.3.1. Нижче будуть представлені дослідження системи для однієї нелінійності виконавчого приводу. Методика оцінки впливу другої нелінійності аналогічна.

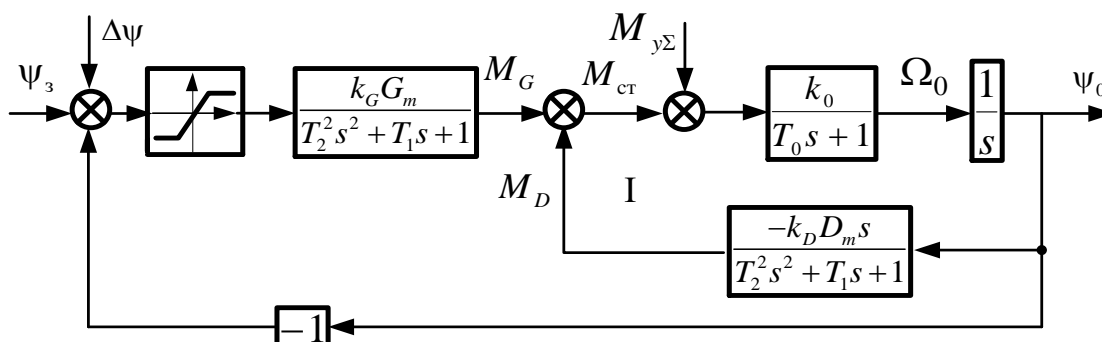


Рис 3.1 Структурна схема нелінійної системи стабілізації

У схемі введено позначення: $G_m = K_{отк} K_{еп} k_M k_{гп}$ - конструктивна жорсткість системи; $D_m = \frac{H}{C_T} K_{впш} K_{еп} k_M k_{гп}$ - конструктивне демпфування системи; $k_G = c_k c_0$, $k_D = c_{ш} c_0$ - коефіцієнти регулювання жорсткості та демпфування відповідно.

Момент стабілізації формується по каналах датчика кутового відхилення і датчика швидкості кутового відхилення об'єкта керування:

$$\overline{M}_c = \overline{M}_G + \overline{M}_D \equiv k_G G_m + k_D D_m.$$

Виконавчий привід має лінійну характеристику із обмеженням:

$$z = \left\{ -x_{\max} \text{ при } x < -a; kx \text{ при } -a \leq x \leq a; x_{\max} \text{ при } x > a \right\}.$$

Головною особливістю нелінійних систем слід вважати можливість від початкових умов. У загальному випадку граничний цикл може бути не синусоїдальним.

У замкнутій системі можна передбачити існування граничного циклу, якщо при деяких значеннях амплітуди a_m і частоти ω_0 гармонійного сигналу на вході нелінійного елемента буде виконуватись рівність:

$$1 + W(j\omega)W_f(a_m, \omega) = 0.$$

Перепишемо рівняння як

$$W(j\omega) = -\frac{1}{W_f(a_m, \omega)}, \quad (3.1)$$

де $W_f^{-1}(a_m, \omega)$ - зворотна описуюча функція нелінійної частини системи; $W(j\omega)$ - частотна передатна функція лінійної частини системи.

і $\frac{-1}{W_f(a_m)}$, то точка їх перетину задовольнить вираз (3.1). Знайдені значення амплітуди a_m і частоти ω_0 визначають параметри закону зміни граничного циклу.

Відповідно до таблиць лінеаризації, знаходимо описуючу функцію нелінійної складової системи для випадку, коли амплітуда вхідної синусоїди перевищує зону лінійного режиму $a_m > b$

$$W_f(a_m) = \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a_m} \right)^2} \right),$$

де b - ширина зони лінійного режиму роботи нелінійності; C - величина обмеження вхідного сигналу; $k = \frac{C}{b} = \operatorname{tg} \alpha$ - коефіцієнт посилення в лінійному режимі.

При побудові графіка зворотної описуючої функції візьмемо до уваги окремі випадки її розрахунку:

- для $a_m = b$, маємо $W_f(a_m = b) = \frac{2k}{\pi}(\arcsin 1) = \frac{2k}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = k$;
- для $a_m \rightarrow \infty$, отримуємо $W_f(a_m \rightarrow \infty) = \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin 0 + \frac{b}{\infty} \right) = 0$.

Графічне зображення $W_f^{-1}(a_m)$ на комплексній площині (рис. 3.2) являє собою пряму, що збігається з негативним напрямом осі абсцис.

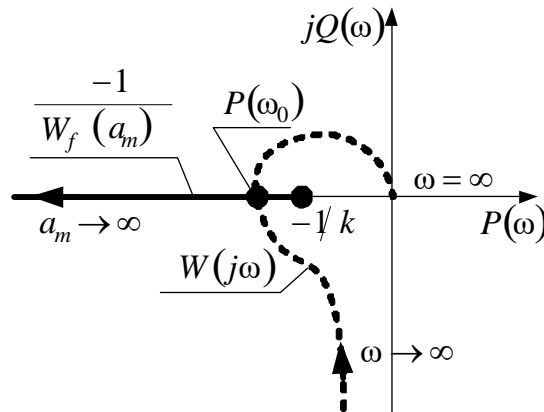


Рис. 3.2 Параметри

Мінімальне значення за модулем зворотної описуючої функції дорівнює $-\frac{1}{k}$.

Максимальне значення за модулем прямує до нескінченності при $a_m \rightarrow \infty$

Знайдемо еквівалентну передатну функцію лінійної складової системи.

$$W(s) = \frac{k_0 k_G G_m}{T_0 T_2^2 s^3 + (T_0 T_1 + T_2^2) s^2 + (T_0 + T_1) s + 1 + k_0 k_D D_m} \cdot \frac{1}{s}$$

Переходимо в частотну область шляхом заміни s на $j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{k_0 k_G G_m}{[T_0 T_2^2 \omega^3 - (T_0 + T_1) \omega] + j[(1 + k_0 k_D D_m) - (T_0 T_1 + T_2^2) \omega^2]} \cdot \frac{1}{\omega}$$

На підставі частотної передатної функції лінійної складової системи, знаходимо алгоритм розрахунку її АФЧХ

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

де
$$P(\omega) = \frac{k_0 k_G G_m [T_0 T_2^2 \omega^2 - (T_0 + T_1)]}{[T_0 T_2^2 \omega^3 - (T_0 + T_1) \omega]^2 + [(1 + k_0 k_D D_m) - (T_0 T_1 + T_2^2) \omega^2]^2}; \quad (3.2)$$

$$Q(\omega) = -\frac{k_0 k_G G_m \left[(1 + k_0 k_D D_m) - (T_0 T_1 + T_2^2) \omega^2 \right]}{\left[T_0 T_2^2 \omega^3 - (T_0 + T_1) \omega \right]^2 + \left[(1 + k_0 k_D D_m) - (T_0 T_1 + T_2^2) \omega^2 \right]^2} \cdot \frac{1}{\omega}. \quad (3.3)$$

Графік АФЧХ на комплексній площині при зміні частоти ω від 0 до ∞ наведено на рис.3.2 пунктирною лінією.

Знайдемо координату точки перетину $W(j\omega)$ і $W_f^{-1}(a_m)$.

$$\omega_0|_{Q(\omega)=0} = \sqrt{\frac{1 + k_0 k_D D_m}{T_0 T_1 + T_2^2}}. \quad (3.4)$$

Підставляючи значення ω_0 в дійсну складову рівняння (3.2), знаходимо

$$P(\omega_0) = -\frac{k_0 k_G G_m (T_0 T_1 + T_2^2)}{1 + k_0 k_D D_m}. \quad (3.5)$$

$$k > \frac{1 + k_0 k_D D_m}{k_0 k_G G_m (T_0 T_1 + T_2^2)}.$$

Амплітуду можливого граничного циклу a_m знайдемо відповідно до рівняння (3.1), після підстановки в нього значень для $W(j\omega)$ і $\frac{-1}{W_f(a_m, \omega)}$

$$-\frac{k_0 k_G G_m (T_0 T_1 + T_2^2)}{1 + k_0 k_D D_m} = \frac{-1}{k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a_m^2}} \right)}.$$

На практиці амплітуда може визначатися на підставі таблиць функції $W_f(a_m, \omega)$ для знайденого значення лівої частини рівняння (3.5) за наявності інформації про параметр b нелінійного елемента.

Відповідно до отриманих даних записується закон зміни можливого граничного циклу

$$\varphi_0(t) = -\varphi(t) = -a_m \sin \omega_0 t.$$

циклу і координату точки перетину зворотної описуючої функції та АФЧХ

$$\omega_0 = 0,168 \text{ рад/с};$$

$$P(\omega_0) = -0,047.$$

Графік зворотної описуючої функції нелінійної складової системи та АФЧХ лінійної частини представлений на рис.3.38.

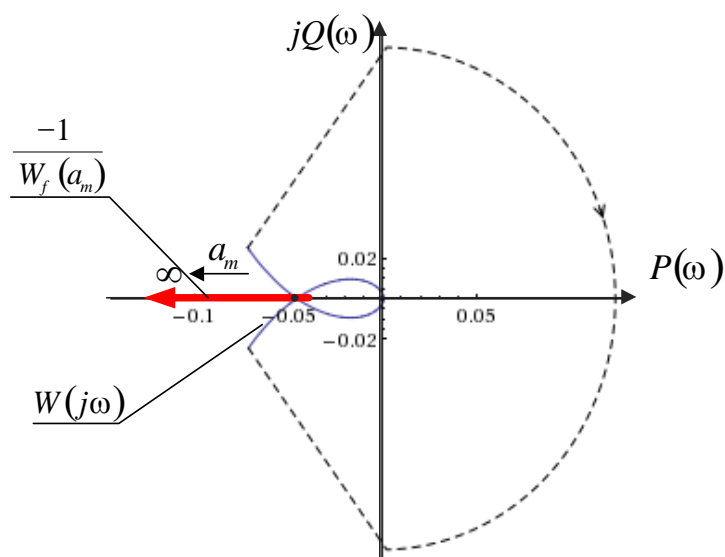


Рис. 3.3 Зворотна описуюча функція та АФЧХ

В результаті аналізу отриманого графіку робимо висновок, що граничний цикл буде можливим, якщо $\left| \frac{1}{k} \right| < P(\omega_0)$, тобто $k > 21,27$.

Амплітуду можливого граничного циклу знайдемо відповідно до рівняння (3.1), після підстановки в нього значень для $W(j\omega_0)$ і $W_f(a_m)$

$$-0,047 = \frac{-1}{k - \frac{2k}{\pi} \left(\arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a_m^2}} \right)}$$

На підставі таблиць функції $W_f(a_m)$ при параметрі $b=1$ маємо $a_m = 1,98$ град.

Відповідно до критерію Гольдфарба маємо висновок - граничний цикл буде стійким.

3.2 Експериментальні дослідження нелінійної системи

На рис.3.4 подана модель системи стабілізації з і нелінійним виконавчим приводом. Модель відповідає структурній схемі (рис.3.1).

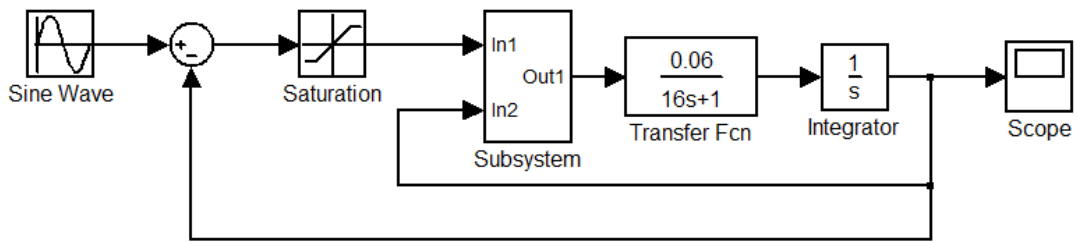


Рис. 3.4 Модель системи нелінійної системи стабілізації

На вхід моделі поданий гармонійний сигнал з параметрами $a_m = 1,98 \text{ град}$, $\omega_0 = 0,168 \text{ рад/с}$. Реакція системи визначалася на моделі осцилографа.

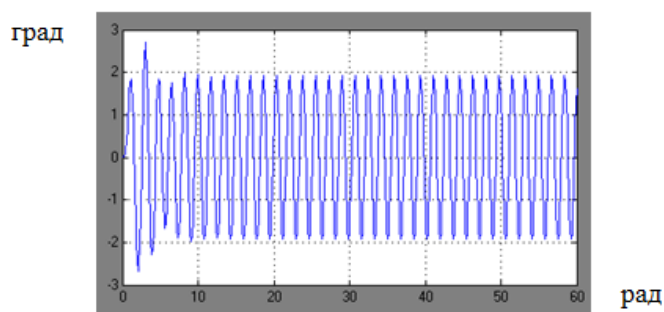


Рис.3.5 Осцилограма граничного циклу
Результат експерименту (рис.3.5)

3.3 Синтез регулятора

На практиці ймовірність виникнення граничного циклу в системі стабілізації схему досліджуваної системи з П-регулятором. Передатний коефіцієнт регулятора позначений як $k_{\text{пер}}$.

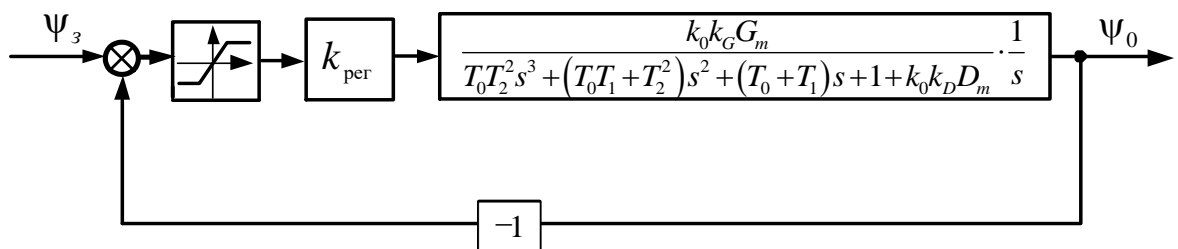


Рис. 3.6 Нелінійна система з П-регулятором

Граничний цикл буде виключений, якщо зворотна $W_f^{-1}(a_m)$ описуюча площині, тобто якщо значення $|k_{\text{пер}} W(j\omega)|_{\omega=0,168}$ буде меншим за мінімальне значення по модулю зворотної описуючої функції

$$|k_{\text{пер}} W(j0,168)| < \left| \frac{1}{k} \right|.$$

Щоб забезпечити необхідний для систем стабілізації запас стійкості за модулем, приймаємо

$$k_{\text{пер}} < \left| \frac{1}{2 \cdot W(j0,168)k} \right|.$$

Вважаючи $k = 22$, знаходимо коефіцієнт передачі П-регулятора, що синтезується $k_{\text{пер}} \approx 0,484$.

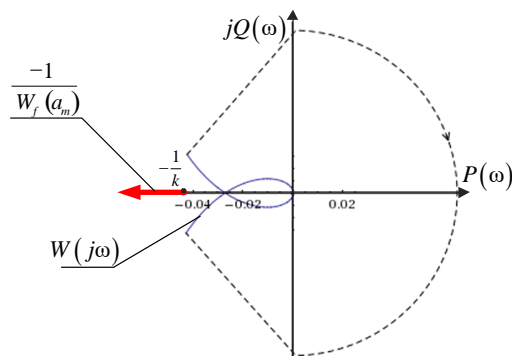


Рис. 3.7 Вплив регулятора на взаємне розташування $W_f^{-1}(a_m, \omega)$ та $W(j\omega)$

Взаємне розташування зворотної передатної функції нелінійного елемента буде вести себе при складних змінах вхідної величини.

На вхід системи з синтезованим регулятором було подано одиничний ступінчатий сигнал, що дозволило отримати перехідну характеристику системи стабілізації (рис 3.8).

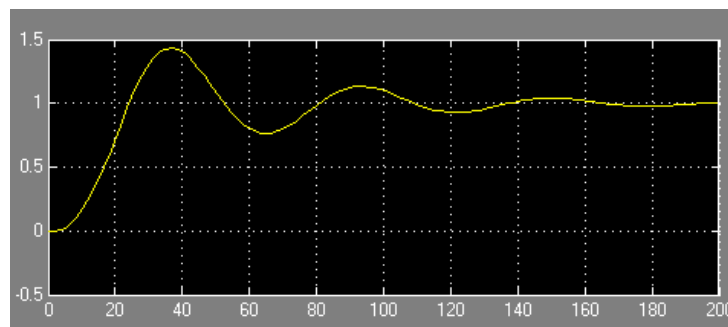


Рис. 3.8 Перехідна характеристика системи з синтезованим регулятором

Очевидно, що коливання затухають і система прямує до сталого значення. Отже, ймовірність виникнення граничного циклу в системі стабілізації з нелінійним виконавчим приводом виключена.

3.4 Проектування регуляторів

Моделі системи з ПД- й ПІ-регуляторами були отримані шляхом накладення обмежень на ПД-модель.

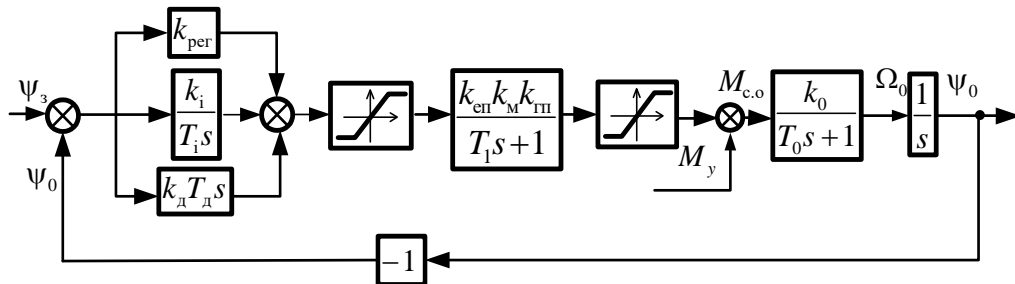


Рис. 3.9 Структурна схема системи із ПД-регулятором

Синтез регуляторів був проведений відповідно до методики, викладеної в [1,2]. Метою синтезу стало забезпечення необхідних запасів стійкості системи та (підсилення) регулятора, коефіцієнти k_i, k_d інтегральної і диференціюючої складових і їх постійні T_i, T_d часу.

Показники якості визначалися по перехідним функціям, тобто по реакції на одиничний східчастий вплив.

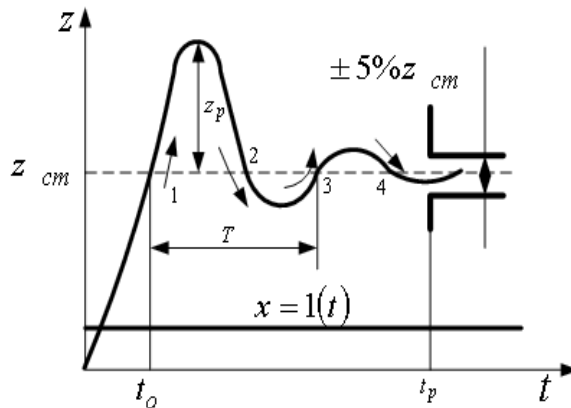


Рис. 3.10 Якість в перехідних режимах

Звичайно за показники якості перехідного процесу приймають: t_p - час регулювання; z_p % - перерегулювання; t_0 - час відпрацювання неузгодженості; n - число переперегонів.

Величина перерегулювання характеризує перевантаження системи, які мають місце під час перехідного процесу.

Число переперегонів n визначає коливальність регульованої величини. Перебігцем вважається перехід регульованою величиною значення, що встановилося. На малюнку перебіжки показані стрілками й пронумеровані.

Через показники коливальності були оцінені запас стійкості по модулю та запас стійкості по фазі.

Подальше моделювання системи стабілізації з різними типами регуляторів дозволяє провести порівняльну оцінку промислових регуляторів і вибрати оптимальний. Схема моделювання подана на рис. 3.11.

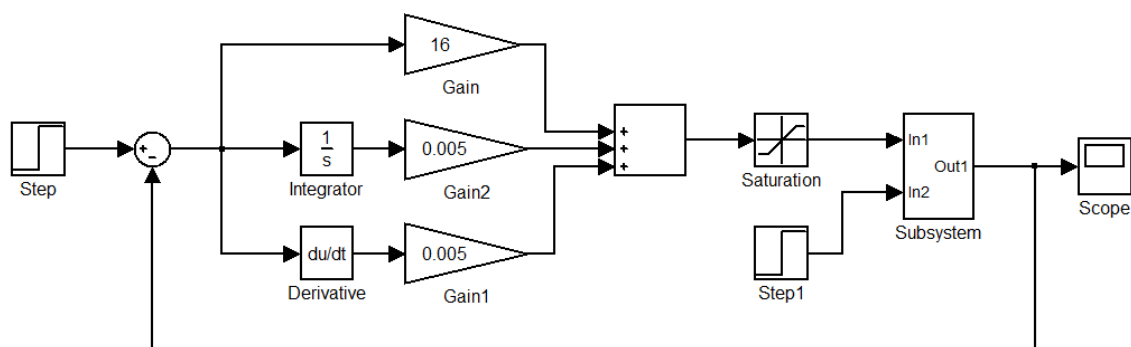


Рис. 3.11 Модель системи з промисловим регулятором

ПД-регулятор складається з паралельно з'єднаних пропорційної та диференціюючої ланок:

$$W_{\text{пд}}(s) = k_{\text{пер}} + k_{\text{д}} T_{\text{д}} s.$$

Перехідну характеристику системи стабілізації з ПД-регулятором наведено на рис. 3.12.

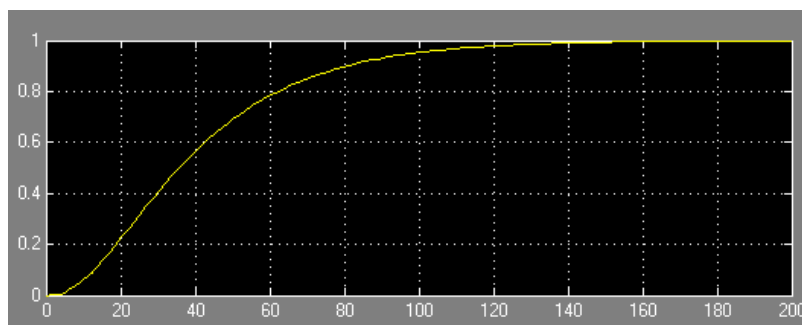


Рис. 3.12 Перехідна характеристика системи з ПД-регулятором

Експеримент показав, що, при вибраних параметрах, керування відбувається за аперіодичному закону. Коливання об'єкту керування відсутні. Швидкодія системи досягає лише 120 с.

Пропорційно-інтегруючий регулятор являє собою пропорційний регулятор з додатковою інтегральною складовою. Остання потрібна, в першу чергу, для усунення статичної помилки системи, яка характерна для пропорційного регулятора.

Передатна функція ПІ-регулятора

$$W_{\text{pi}}(s) = k_{\text{пер}} + \frac{k_i}{T_i s}$$

Перехідну характеристику досліджуваної системи з ПІ-регулятором наведено на рис. 3.13.

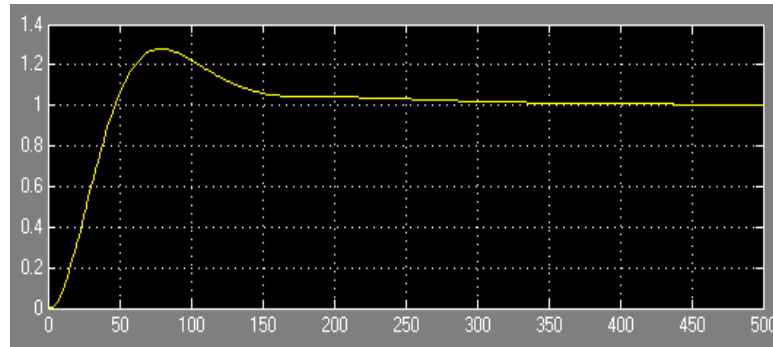


Рис. 3.13 Перехідна функція системи з ПІ-регулятором

Її аналіз дозволяє зробити висновок, що введення у закон керування сигналу коливальність, зменшуючи тим самим запаси стійкості.

ПІД-регулятор містить окрім пропорційної складової диференціюючу та інтегруючу. Будь-який з вище розглянутих регуляторів може бути отриманий точне утримання заданої вихідної величини і швидка реакція на впливи керування.

Передатна функція ПІД-регулятора

$$W_{\text{pid}}(s) = k_{\text{пер}} + \frac{k_i}{T_i s} + k_d T_d s$$

Отримана у результаті проведених досліджень перехідна характеристика системи з ПІД-законом керування наведена на рис. 3.14.

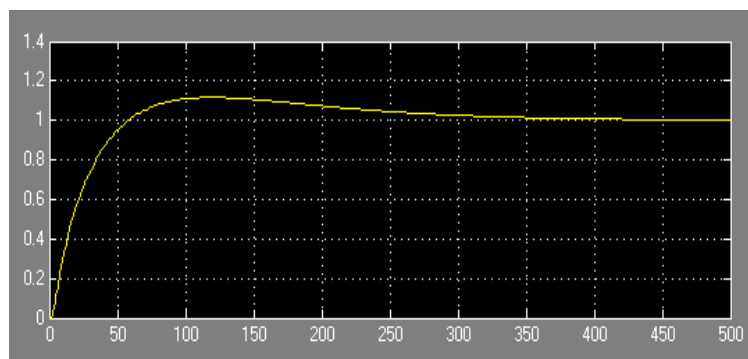


Рис. 3.14 Перехідна функція

В цьому випадку, як і у випадку з ПІ-регулятором, система стабілізації та керування має перерегулювання. Це пов'язано з наявністю в регуляторі перерегулювання і збільшення часу перехідного процесу.

3.5 Проектування регулятора з нелінійною корекцією

У реальних системах завжди є обмеження на максимальну величину

На практиці така поведінка системи може виявитися неприпустимою. Тому необхідна компенсація ефекту насичення.

Для того щоб запобігти «намотуванню» інтегратора, можуть використовуватися спеціальні прийоми нелінійної корекції. Вони зводяться до одного з двох варіантів :

У системі стабілізації, що досліджується, присутні обмеження на максимальну величину керуючого впливу. Тому, з метою підвищення ефективності системи у роботі запропоновано ввести до складу регулятора нелінійну (рис. 3.15) систему корекції.

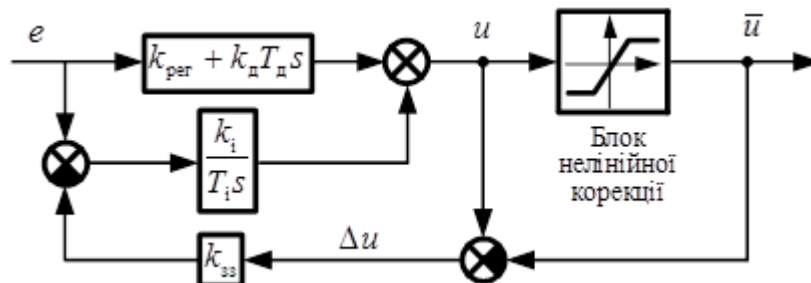


Рис. 3.15 Принцип дії нелінійної корекції

Сигнал u на виході ПІД-регулятора пропорційний бажаному куту сигнал на вході інтегруючої частини послаблюється тим сильніше, чим більше різниця між бажаним і допустимим кутами переключки виконавчого органу.

Метою оптимізації регулятора з нелінійною системою корекції є обрання коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора таким, щоб перехідний процес системи у цілому задовольняв заданим вимогам з показників якості.

Загадаємо, наприклад, щоб перерегулювання по куту курсу об'єкта керування не перевищувало 10%, а час регулювання був не більше 100 с. Для

вибору оптимального значення коефіцієнта k_{33} застосуємо процедуру чисельної оптимізації пакета Simulink Respons Optimization.

Після оптимізації k_{33} за допомогою блоку Signal Constraint (рис.3.16), отримаємо значення оптимального коефіцієнту $k_{33}=7,2477$.

```
Iter  S-count      f(x)      max      Directional  First-
      0         1         0         constraint  Step-size    derivative  optim
      1         3         0         0           0            0
Successful termination.
Found a feasible or optimal solution within the specified tolerances.
K_aw =
      7.2477
```

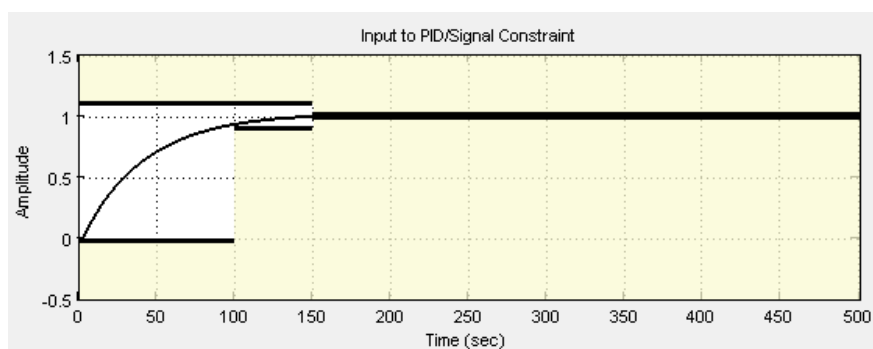


Рис. 3.16 Результати оптимізації

Перехідну характеристику досліджуваної системи з нелінійною корекцією ПД-регулятора наведено на рис. 3.17.

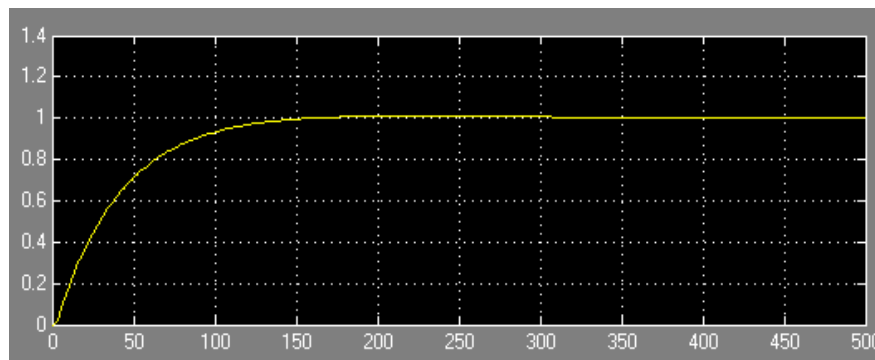


Рис.3.17 Перехідна функція системи з ПД-регулятором після корекції

Порівняльні характеристики (рис.3.14) системи з ПД-регулятором та протікає без перерегулювання та швидкодія системи відповідає встановленим раніше вимогам.

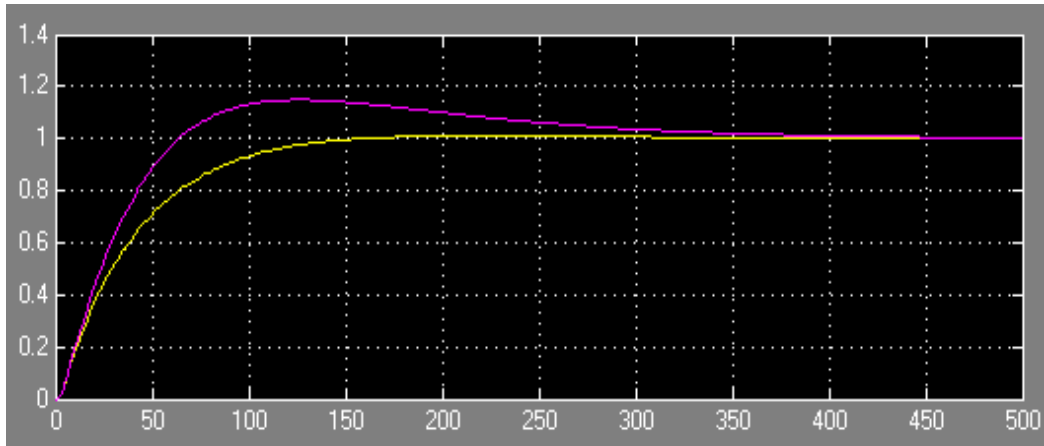


Рис. 3.18 Порівняльні характеристики

Узагальнюючи результати досліджень, зазначимо, що для нелінійної системи імовірності виникнення автоколивань оптимальним є ПД-регулятор з пропонованою системою нелінійної корекції.

РОЗДІЛ 4

ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ

4.1 Алгоритм автоматизації проектування

В попередніх розділах розглянуто питання вибору ефективного алгоритму обробки результатів досліджень та керування науковим експериментом, прийомів їх реалізації з урахуванням можливостей технічних засобів та програмного забезпечення, загальні принципи дослідження.

зосередити зусилля на вирішенні підзадачі, реалізованої у вигляді окремої процедури або функції. Зв'язки скерування між етапами здійснюються за допомогою відповідних звернень до них (умов), потім відбувається передача інформації від одного етапу до іншого.

Повноцінне формування дії вимагає послідовного проходження восьми етапів, чотири з яких є попередніми і чотири - основними. Попередні етапи покликані створити необхідні умови для виконання дії, а основні етапи описують хід виконання самої дії.

Алгоритм проектування

Етап

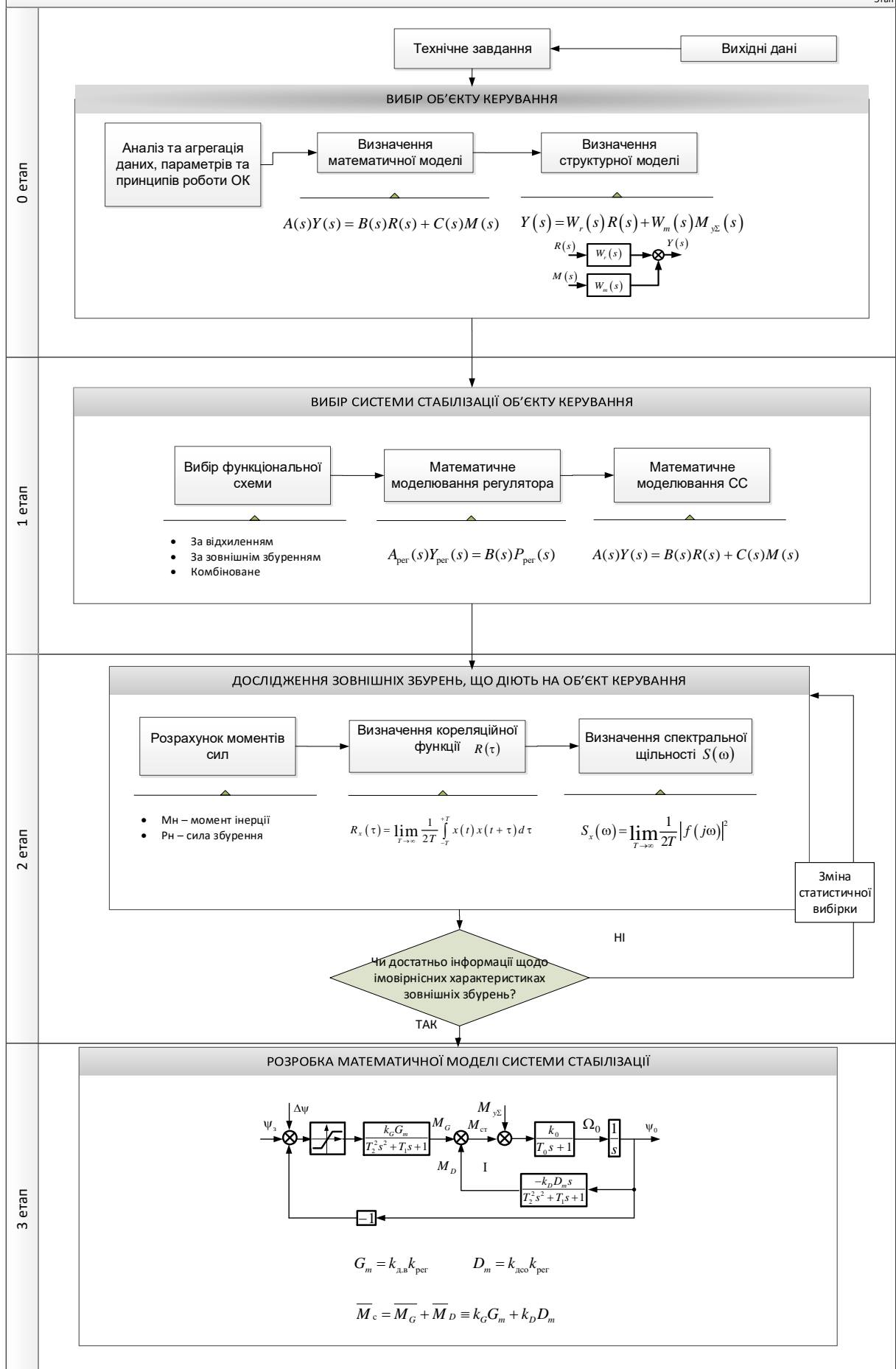
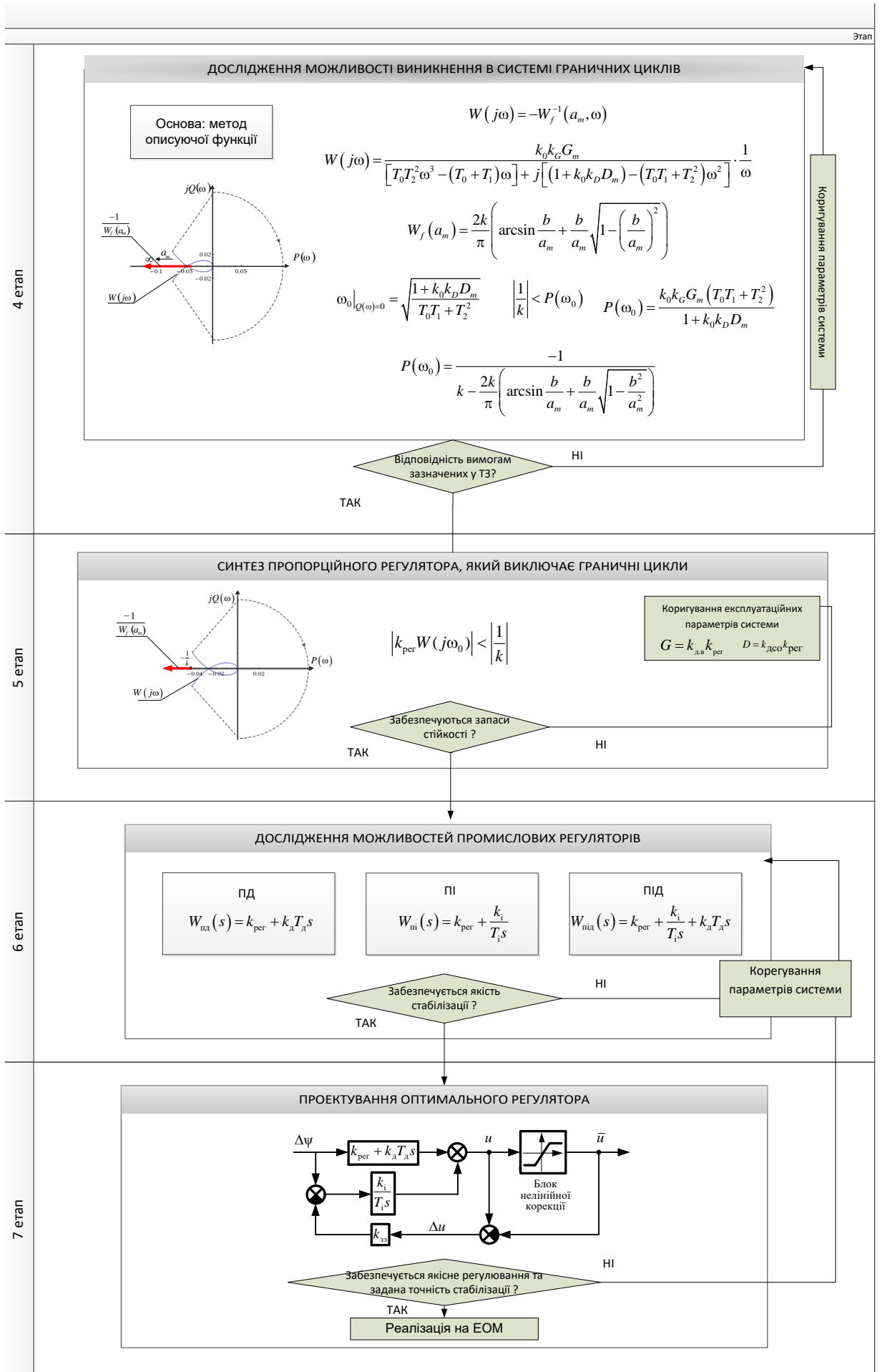


Рис. 4.1 Автоматизація (етап 0 – 3)



До попередніх етапів алгоритму відносимо:

- вибір об'єкту керування;
- на об'єкт керування;
- розробка математичної моделі системи стабілізації.

До основних етапів алгоритму відносимо:

- дослідження можливості виникнення в системі граничних циклів;
- синтез пропорційного регулятора, який виключає граничні цикли;
- дослідження можливостей промислових регуляторів;
- проектування оптимального регулятора.

Початковим етапом системи автоматизованого проектування є побудова моделі, що найкращим чином відображає властивості реального об'єкту. Відобразити у вигляді алгоритму. На кожному кроці ітерації відбувається уточнення відповідної моделі, відповідного процесу.

Кінцевим етапом автоматизованого проектування є, безпосередньо, проектування оптимального регулятора для нелінійної системи стабілізації інерційним об'єктом.

Обов'язковою складовою ефективною автоматизації є її реалізація на ЕОМ, у нашому випадку, програмно-методичне забезпечення синтезу.

4.2 Розробка програмно-методичного забезпечення

Пропорційно-інтегрально-диференціюючі (ПІД) регулятори широко використовуються у різних системах автоматичного керування. Це системи керування рухомими об'єктами - літаки, ракети, кораблі, супутники, складними. В даний час на світовому ринку пропонуються універсальні мікропроцесорні регулятори, які потребують спеціального налаштування в складі систем управління.

ПІД-регулятор вимірює відхилення вихідної величини системи від заданого значення і видає керуючий сигнал, який є сумою трьох складових - пропорційної, інтегральної і диференціальної.

Точне налаштування параметрів ПІД-регулятора суттєво знижує коливання системи. Однак повноцінне використання переваг ПІД-регулятора забезпечується

тільки при правильному розрахунку цих параметрів з урахуванням особливостей характеристик керованих об'єктів.

При проектуванні систем з ПД-регулятором виникає необхідність користувачем. Ці та інші труднощі можна подолати за допомогою графічного інтерфейсу користувача (GUI - Graphical User Interface), який входить до складу MATLAB для створення графічних додатків.

Робота в цьому середовищі досить проста - елементи управління (кнопки, списки, що розкриваються і т.д.) розміщуються за допомогою миші, а потім програми відкриваються і доповнюються тільки в М-файлі, а не набираються в командному вікні MATLAB.

Додаток GUI може складатися як з одного основного вікна, так і декількох вікон і здійснювати виведення графічної і текстової інформації в основне вікно програми і в окремі вікна.

розробити універсальний додаток для дослідження систем стабілізації та керування, що забезпечить швидкий та зручний вибір оптимальних коефіцієнтів ПД-регулятора.

Середовище візуального програмування GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) передбачає, в першу чергу, проектування графічного інтерфейсу користувача, а вже потім безпосереднє програмування.

- три слайдера для встановлення числових значень коефіцієнтів регулятора K_1 (П – складова), K_2 – (І – складова) та K_3 (Д – складова);

експериментально. В роботі вони обрані з урахуванням отриманих значень в попередніх розділах.

Заготовка додатку з елементами інтерфейсу, що добавлені з панелі інструментів має вигляд, зображений на рис. 5.1.

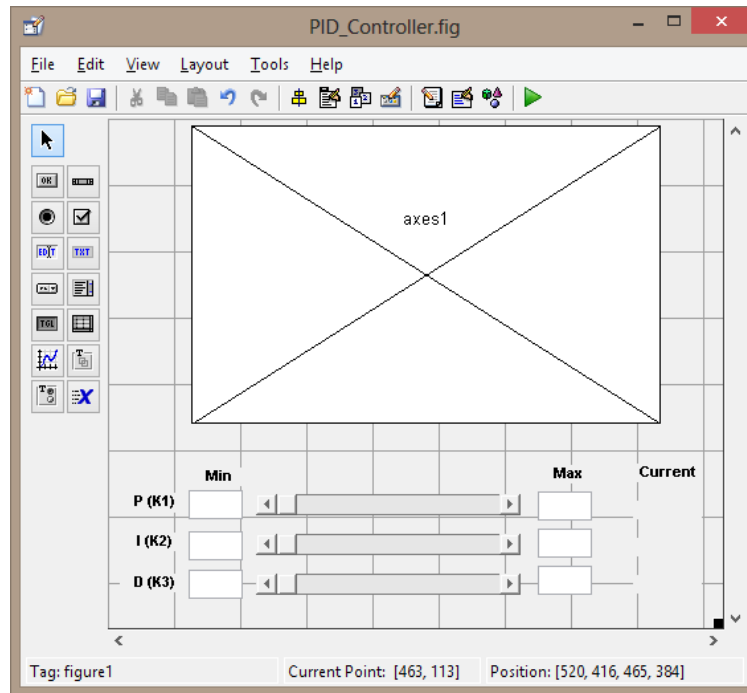


Рис. 4.3 Вікно GUI

Розроблений графічний інтерфейс готовий до програмування.

При збереженні графічного інтерфейсу MATLAB автоматично сформував для нього програмний код. Тому, після ініціалізаційного блоку цього коду розміщується основна частина команд розв'язуваної задачі:

```
%отримання max та min складових регулятора
max1=str2double(get(handles.edit1, 'String'));
max2=str2double(get(handles.edit2, 'String'));

%визначення поточних значень коефіцієнтів складових регулятора
cur1=min1+(max1-min1)*c1;
cur2=min2+(max2-min2)*c2;
cur3=min3+(max3-min3)*c3;

%виведення поточних значень коефіцієнтів
set(handles.text7, 'String', cur1);
set(handles.text8, 'String', cur2);
set(handles.text9, 'String', cur3);

K1=cur1;
K2=cur2;
K3=cur3;

%параметри системи
Wob=tf([30],[0.01 0.2 1 0]);%об'єкт
Wg=tf([0.09],[0.01 1]);%підсилювач
N=100;
Wp=tf([K1/N+K3 K1+K2/N K2],[1/N 1 0]);%регулятор

W1=series(Wg, Wob);
W=series(Wp,W1);%передатна функція розімкнутої системи
```

```

sys=feedback(W,1);%передатна функція замкнутої системи

t=5;
step(sys,t)
grid on
xlabel('t');
ylabel('h');

function slider3_Callback(hObject, eventdata, handles)
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);

```

Незалежно від кількості слайдерів і їх тегів, згадана вище функція має один і той же вигляд для кожного слайдера.

В результаті запуску описаного вище програмного коду відкривається діалогове вікно, що зображене на рис. 4.4.

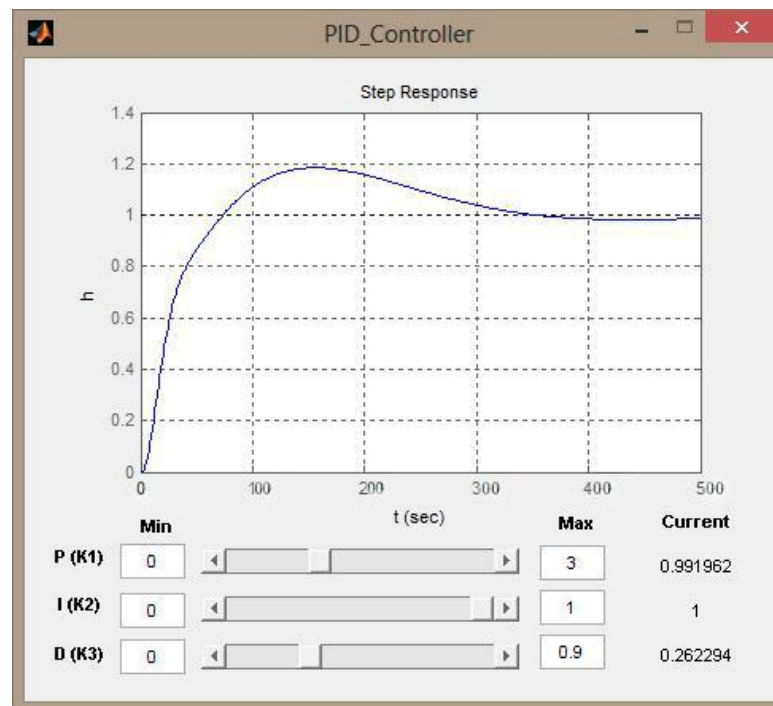


Рис. 4.4 Діалогове вікно

Розроблений інтерфейс дозволяє переміщенням в діалоговому вікні движків

На рис. 4.4 в якості прикладу приведена перехідна функція із встановленням слайдерів в положення, що відповідає оптимальним коефіцієнтам ПІД-регулятора, отриманим в попередніх розділах. Як бачимо, перехідна характеристика на рис.3.14 (оптимізована) та на рис. 4.4 ідентичні.

Видаливши в М-файлі програми команду очистки поточного графіку «cla», можна отримати сімейство перехідних характеристик для будь-якої множини

параметрів регулятора, що може бути зручним при виборі характеристики з бажаними показниками якості (рис. 4.5).

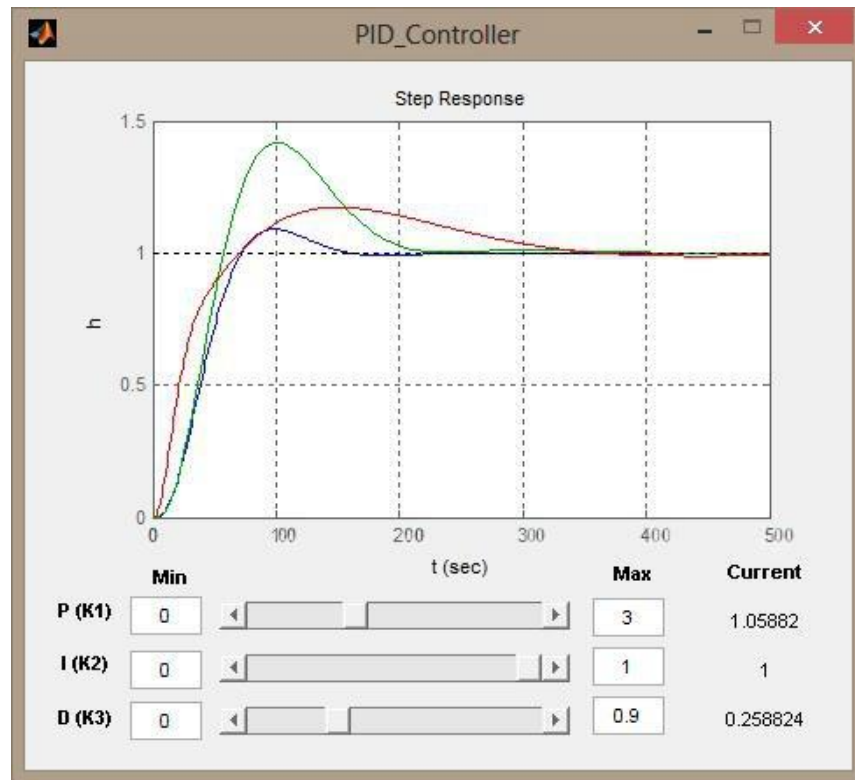


Рис. 4.5 Приклад сімейства характеристик

Графіки в діалоговому вікні можна відредагувати, викликавши редактор коефіцієнти для будь-якого об'єкту та будь-якого типу регулятора, видаляючи та комбінуючи необхідні канали в ПД-регуляторі.

ВИСНОВКИ

Особливістю нелінійних систем є можливість виникнення в них граничних циклів - незатухаючих коливань,

Як метод досліджень в роботі застосований метод описуючої функції.

Розроблена математична модель нелінійної системи стабілізації дозволила встановити параметри граничного циклу системи та синтезувати регулятор для виключення імовірності виникнення таких циклів. Теоретичні та експериментальні дослідження показали хорошу збіжність результатів.

Синтез промислових регуляторів дозволив вибрати оптимальний.

Складовою алгоритму проектування регулятора для нелінійних систем є оперативно розраховувати оптимальні коефіцієнти для будь-якого об'єкту та будь-якого типу регулятора, видаляючи та комбінуючи необхідні канали в ПД-регуляторі.