

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Сумський державний університет****Класичний фаховий коледж**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТАна здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка,

(код та назва)

освітньо-професійної програми Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: Розробка технічних рішень для запобігання динамічних
перевантажень складної системи в аварійних режимах роботи

Здобувача групи

ЕІск2-01б

(шифр групи)

Безносенка Владислава Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело.

Владислав БЕЗНОСЕНКО

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник ст. викладач, к.т.н. Володимир Васильєв

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант¹⁾

(посада, науковий ступінь, вчене звання ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є аналіз відомих методів підвищення стійкості і якості керування складними за динамікою технічними системами.

Мета роботи полягає у дослідженнях сучасних технологій, методів і засобів оптимізації якості керування для забезпечення бажаної швидкодії і високої точності складних технічних систем.

При виконанні роботи використовувалися методи технічної кібернетики, синтезу сучасних систем керування, метод змінних станів, математичне і комп'ютерне моделювання.

У результаті проведених досліджень встановлено, що сучасний розвиток технічної кібернетики, математичних, цифрових і комп'ютерних методів аналізу і синтезу систем дає проектувальникам широкі можливості оптимізації параметрів якості керування системами, практично, будь якої складності. Крім відомих класичних методів параметричної і структурної оптимізації для демпфірування складних за динамікою систем керування зручними і ефективним є метод оптимізації за допомогою багатокординатного впливу.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 18 рисунків, список цитованої літератури із 22 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДИНАМІЧНІ КООРДИНАТИ, ДЕМПФІРУВАННЯ, ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ, ОБМЕЖЕННЯ КООРДИНАТ, НЕЛІНІЙНИЙ ФІЛЬТР.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ СИСТЕМ ІЗ СКЛАДНОЮ ДИНАМІКОЮ	5
1.1 Дослідження моделей складної електромеханічної системи	5
1.2 Основи побудови систем з якісною динамікою. ПІД-регулятори.....	6
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ СИСТЕМ...	8
2.1 Методи підвищення запасу стійкості. Вплив коефіцієнту передачі	8
2.2 Демпфірування з придушенням високих частот	11
2.3 Демпфірування з підняттям високих частот.	12
2.4 Демпфірування з введенням негативних фазових зсувів	13
РОЗДІЛ 3 СУЧАСНІ СПОСОБИ ДЕМПФИРУВАННЯ КОЛИВАНЬ....	14
3.1 Синтез оптимального керування	14
3.2 Метод багатокординатного впливу.....	16
3.3 Комп'ютерне моделювання багатокординатного впливу	19
ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28

ВСТУП

Системи з заданими ресурсами, оптимальні за швидкодією, які підвищують продуктивність процесів, енергетичну ефективність, довговічність устаткування і тому завжди були об'єктом досліджень проєктувальників.

В процесі роботи ряду технічних систем відбуваються складні енергетичні взаємодії пружних елементів з рухомими масами (моментами інерції), що погіршує динаміку, безпеку і ресурс роботи. При цьому маси і пружності окремих ділянок можуть бути зосередженими (орган навивки або шків тертя, підіймальні посудини: скіпи, кліті, вагонетки, противаги) і розподіленими (конвеєрна стрічка, сталеві тягові і гумовотросові врівноважують канати, штанги бурових установок глибокого буріння та ін.). Таки системи, як правило, складаються з стійких елементів і відносяться до статичних систем.

Проблеми стійкості у них виникають в основному при застосуванні зворотних зв'язків. Іншу групу складних систем, де виникають проблеми стійкості і якості, складають системи які мають астатичні властивості. Астатичні властивості надає їм присутність інтегруючих елементів. Передавальна функція таких систем має полюси і це відповідно ускладнює динаміку системи, обмежує область застосування, тому що вони вимагають спеціальних корегуючих систем і не можуть бути застосовані для деяких критичних режимів роботи, вимагають точного контролю частотних параметрів системи. Також, ці параметри не завжди відповідають вимогам безпеки системи по швидкодії в аварійних режимах роботи. [1]

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ СИСТЕМ ІЗ СКЛАДНОЮ ДИНАМІКОЮ

1.1 Суть проблеми і постановка завдань на дослідження

Процес керування прийнято вважати оптимальним за динамічними властивостями, якщо при ступінчастому керуючому дії системою забезпечується монотонний перехід в заданий стан за мінімальний час [1, 2, 3].

Високоточні і високоманеврені системи вимагають якості керування, відповідного їх динамічних характеристик. Ця проблема особливо актуальна для систем стабілізації і керування сучасними над- і гіперзвуковими безпілотними літальними апаратами [4, 5, 6].

Відомо, що точність систем забезпечується астатическим регулюванням, при цьому порядок астатизма регулятора визначає ступінь точності системи. Але підвищення порядку астатизма системи погіршує якісні показники керування системою. Це пояснюється тим, що фазова характеристика вихідної розімкнутої системи з астатизмом другого порядку в області низьких частот починається зі значення $-\pi$, а апериодические і коливальні елементи іншої частини системи тільки збільшують фазові відставання в області середніх і високих частот.

Тобто у таких систем фазовий відставання на будь-якій частоті завжди буде більше $-\pi$ і підвищення порядку астатизма тільки погіршить їх якість. За критерієм Найквіста це структурно нестійкі системи, які можуть стати керованими при раціональному перерозподілі полюсів і нулів системи. Такі способи відомі, наприклад, введення відповідних фазових зрушень в амплітудно-фазову характеристику системи або інші методи корекції [1, 2, 3]. Через зазначених складнощів, системи з астатизмом 2-го порядку і вище на практиці використовують рідко. Але наш час лазерних технологій,

надзвукових і гиперзвукових швидкостей вимагає нових рішень проблеми керування складними системами як по точності, так і по динамічності.

1.2 Основи побудови систем з якісною динамікою. ПІД-регулятори

Пропорційно-інтегрально-похідна (PID) керування є найпоширенішим алгоритмом керування, який використовується в промисловості та був загальноприйнятим у промисловому регулюванні. Популярність ПІД-регуляторів частково пояснюється їх надійною роботою в широкому діапазоні робочих умов і частково їх функціональною простотою, що дозволяє інженерам керувати ними простим і зрозумілим способом.

Як випливає з назви, PID-алгоритм складається з трьох основних коефіцієнтів; пропорційні, інтегральні та похідні, які змінюються для отримання оптимальної реакції. У цій роботі обговорюються системи із замкнутим контуром, теорія класичного ПІД та ефекти налаштування системи керування із замкнутим контуром. Також обговорюється набір інструментів PID у LabVIEW і простота використання цих VI.

Система контролю. Основна ідея ПІД-регулятора полягає в тому, щоб зчитувати дані датчика, а потім обчислити бажаний вихід приводу шляхом обчислення пропорційної, інтегральної та похідної відповідей і підсумовування цих трьох компонентів для обчислення вихідного сигналу. Перш ніж ми почнемо визначати параметри ПІД-регулятора, ми побачимо, що таке замкнута система, і деякі термінології, пов'язані з нею. [7]

Система замкнутого циклу. У типовій системі керування змінна процесу — це параметр системи, який потрібно контролювати, наприклад температура ($^{\circ}\text{C}$), тиск (psi) або швидкість потоку (літри/хвилину). Датчик використовується для вимірювання змінної процесу та забезпечення зворотного зв'язку з системою керування. Задане значення — це бажане або командне значення для змінної процесу, наприклад 100 градусів Цельсія у випадку системи контролю температури. У будь-який момент різниця між

змінною процесу та заданим значенням використовується алгоритм системи керування (компенсатором) для визначення бажаного вихідного сигналу приводу для керування системою (установкою). Наприклад, якщо виміряна температурна змінна процесу становить 100 °С, а бажана задана температура становить 120 °С, тоді вихідний сигнал приводу, визначений алгоритмом керування, може керувати нагрівачем. Увімкнення приводу нагрівача призводить до нагрівання системи та збільшення змінної температури процесу. Це називається системою керування з замкнутим циклом, оскільки процес зчитування датчиків для забезпечення постійного зворотного зв'язку та обчислення бажаного вихідного сигналу приводу повторюється безперервно та з фіксованою швидкістю циклу, як показано на рис. 1.1

У багатьох випадках вихідний сигнал приводу не є відповідним. єдиний сигнал, який впливає на систему. Наприклад, у температурній камері може бути джерело прохолодного повітря, яке іноді вдує в камеру та порушує температуру. Такий термін називається порушенням. Зазвичай ми намагаємося розробити систему керування таким чином, щоб мінімізувати вплив збурень на змінну процесу.

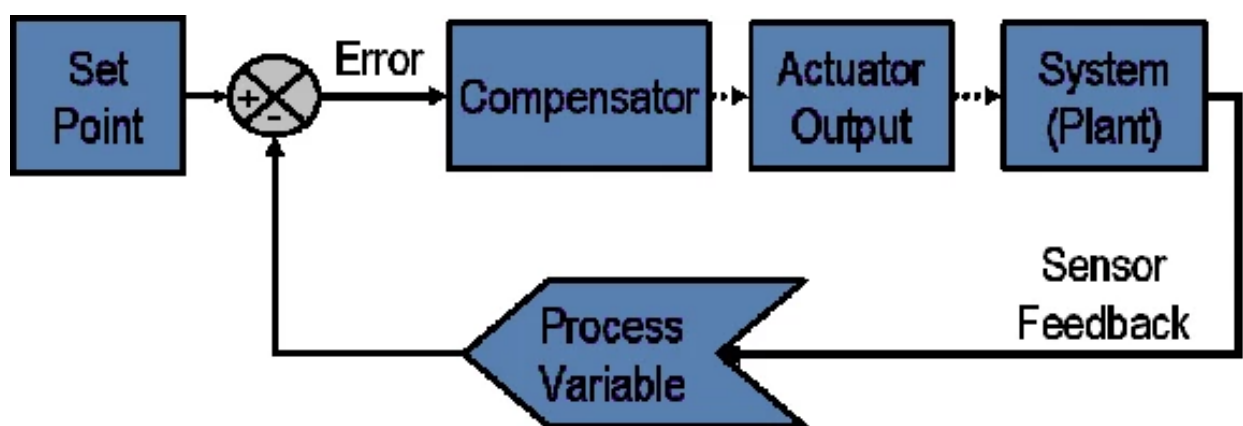


Рис. 1.1 Блок-схема типової замкнутої системи [8]

Процес проектування керування починається з визначення вимог до продуктивності. Продуктивність системи керування часто вимірюється шляхом застосування ступінчастої функції як командної змінної заданого значення, а потім вимірювання відгуку змінної процесу. Зазвичай відповідь визначається кількісно шляхом вимірювання певних характеристик сигналу. Час наростання — це час, який потрібен системі, щоб перейти від 10% до 90% від стабільного або кінцевого значення.

Відсоткове перевищення — це величина, на яку змінна процесу перевищує кінцеве значення, виражене у відсотках від кінцевого значення. Час встановлення — це час, необхідний для того, щоб змінна процесу встановилася в межах певного відсотка (зазвичай 5%) від кінцевого значення. Стаціонарна похибка — це остаточна різниця між змінною процесу та заданим значенням. Зауважте, що точне визначення цих величин буде різним у промисловості та академічних колах. На рис. 1.2 зображено осцилограму реакції типової замкнутої системи ПД.

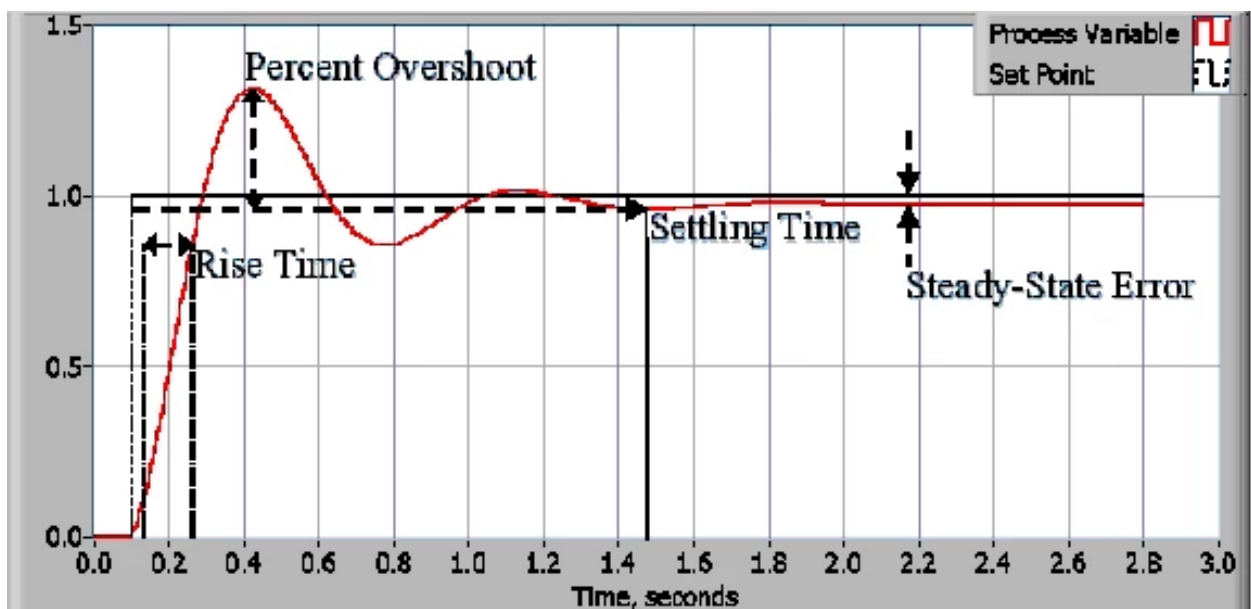


Рис. 1.2 Реакція типової замкнутої системи ПД. [9]

Після використання однієї або всіх цих величин для визначення вимог до ефективності системи керування корисно визначити найгірші умови, за

яких система керування, як очікується, відповідатиме цим вимогам до проекту. Часто в системі виникають збої, які впливають на змінну процесу або вимірювання змінної процесу. Важливо розробити систему керування, яка задовільно працює в найгірших умовах. Міра того, наскільки добре система керування здатна подолати вплив збурень, називається відхиленням збурень системи керування.

У деяких випадках реакція системи на даний контрольний вихід може змінюватися з часом або залежно від певної змінної. Нелінійна система — це система, в якій параметри керування, які дають бажану реакцію в одній робочій точці, можуть не давати задовільної реакції в іншій робочій точці. Наприклад, камера, частково заповнена рідиною, демонструватиме набагато більш швидку реакцію на потужність нагрівача, коли вона майже порожня, ніж коли вона майже заповнена рідиною. Міра того, наскільки добре система керування буде переносити збурення та нелінійності, називається надійністю системи керування.

Деякі системи демонструють небажану поведінку, яка називається мертвим часом . *Deadtime* — це затримка між зміною змінної процесу та моментом, коли цю зміну можна спостерігати. Наприклад, якщо датчик температури розміщено далеко від впускного клапана рідини холодної води, він не вимірює зміну температури відразу після відкриття або закриття клапана. Час простою також може бути спричинений системою або вихідним приводом, який повільно реагує на команду керування, наприклад, клапан, який повільно відкривається або закривається. Загальним джерелом простою на хімічних підприємствах є затримка, викликана потоком рідини через труби.

Цикл циклу також є важливим параметром замкнутої системи. Інтервал часу між викликами алгоритму керування є часом циклу циклу. Системи, які швидко змінюються або мають складну поведінку, вимагають швидшої швидкості циклу керування. На рис. 1.3 наведено реакцію замкнутої системи з мертвим часом.

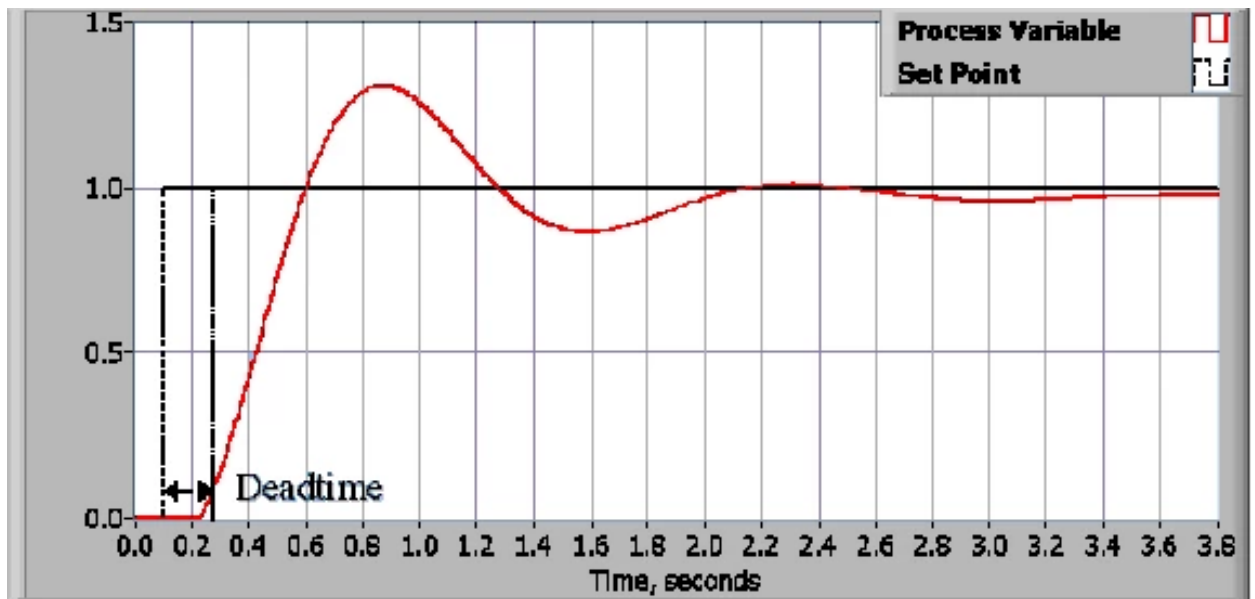


Рис. 1.3 Реакція замкнутої системи з мертвим часом [9]

Коли вимоги до продуктивності визначено, настав час вивчити систему та вибрати відповідну схему керування. У переважній більшості застосувань ПД-регулювання забезпечить необхідні результати

Пропорційна складова залежить лише від різниці між заданим значенням і змінною процесу. Ця різниця називається терміном помилки. Пропорційне посилення (K_c) визначає відношення вихідного відгуку до сигналу помилки.

Наприклад, якщо величина помилки дорівнює 10, пропорційне посилення 5 дасть пропорційну відповідь 50. Загалом збільшення пропорційного посилення збільшить швидкість реакції системи керування. Однак, якщо пропорційне посилення занадто велике, змінна процесу почне коливатися.

Якщо K_c буде збільшено далі, коливання стануть більшими, і система стане нестабільною і може навіть вийти з-під контролю. На рис. 1.4 наведено блок-схему базового алгоритму ПД-регулювання.

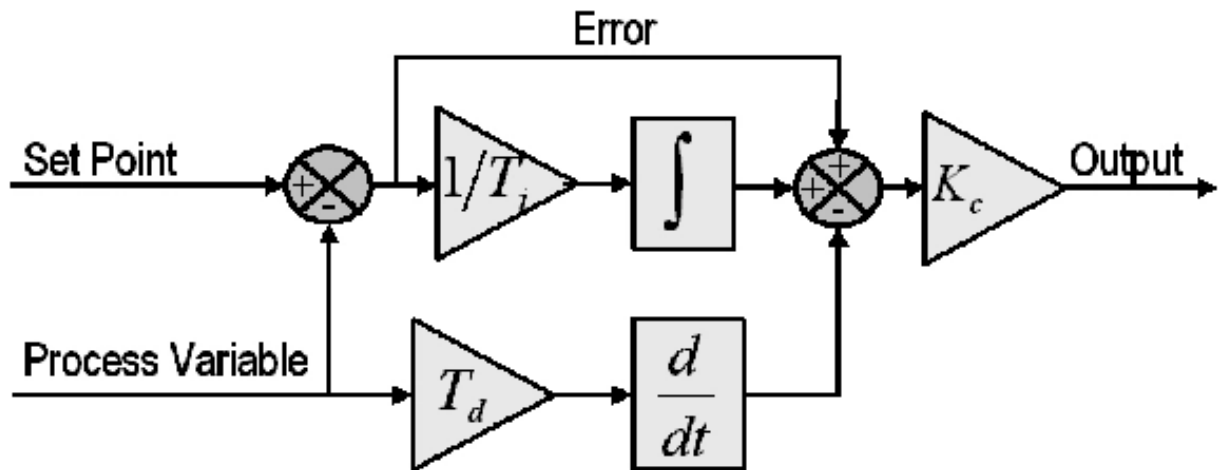


Рис. 1.4 Блок-схема базового алгоритму ПІД-регулювання [10]

Набір інструментів LabVIEW PID містить широкий спектр VI, які значно допомагають у розробці системи керування на основі PID. Обмеження діапазону вихідного сигналу керування, захист від перемотування інтегратора та плавний вихід контролера для змін посилення ПІД-регулятора є одними з основних особливостей ПІД-регулятора VI. PID Advanced VI включає в себе всі функції PID VI разом з нелінійною інтегральною дією, керуванням двома ступенями свободи та керуванням квадратом помилки. НА рис. 1.5 наведено ВП з палітри ПІД-контролю LabVIEW

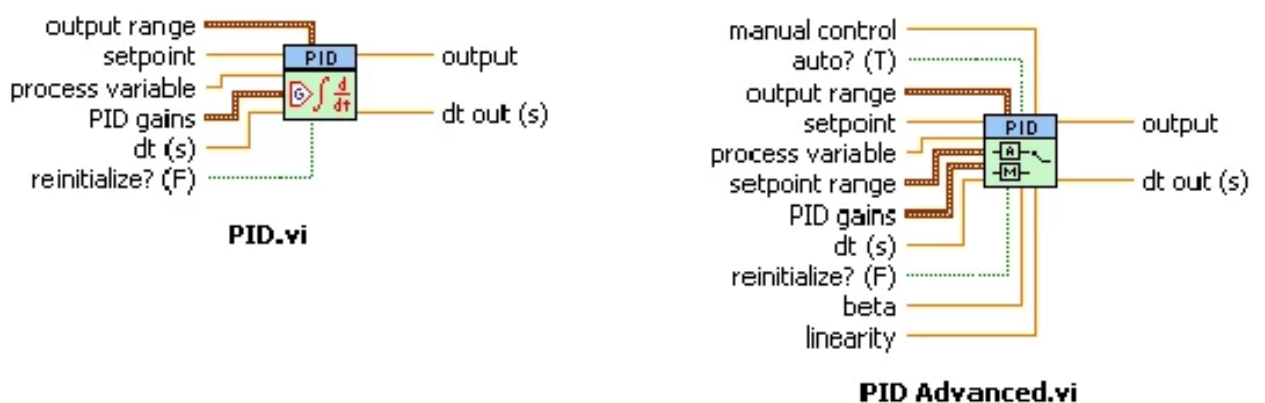


Рис. 1.5 ВП з палітри ПІД-контролю LabVIEW [10]

Палітра PID також містить деякі розширені VI, такі як VI Autotuning PID та VI Gain Schedule PID. VI Autotuning PID допомагає уточнювати параметри PID системи керування. Після того, як зроблено обґрунтоване

припущення щодо значень P, I та D, ВП автонастроювання PID допомагає уточнювати параметри PID для отримання кращого відгуку від системи керування. На рис. 1.6 наведено розширені ВП з палітри ПІД-контролю LabVIEW

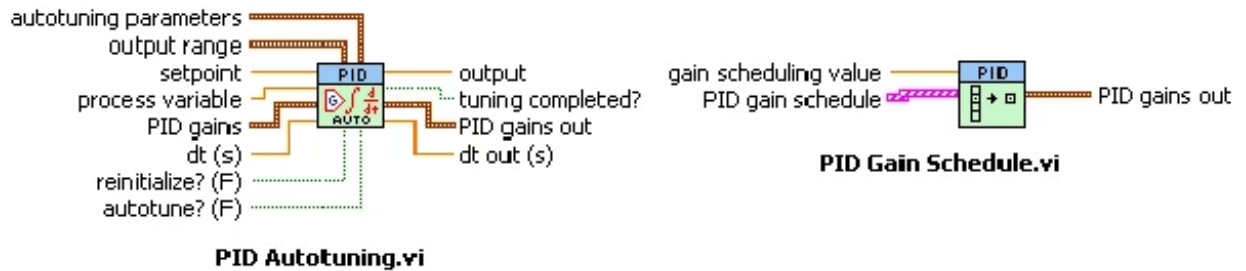


Рис. 1.6 Розширені ВП з палітри ПІД-контролю LabVIEW [10]

Надійність системи керування значно покращується завдяки використанню модуля LabVIEW Real Time, що працює на цілі реального часу. NI надає пристрої збору даних, які забезпечують вищу точність і кращу продуктивність, ніж звичайна система керування

Тісна інтеграція цих пристроїв збору даних із LabVIEW мінімізує час розробки та значно підвищує продуктивність будь-якого інженера.

Алгоритм ПІД-регулювання є надійним і простим алгоритмом, який широко використовується в промисловості. Алгоритм має достатню гнучкість, щоб дати відмінні результати в широкому спектрі застосувань, і є однією з головних причин для подальшого використання протягом багатьох років. NI LabVIEW і NI plug-in пристрої збору даних пропонують вищу точність і кращу продуктивність, щоб створити чудову систему ПІД-регулювання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ СИСТЕМ

2.1 Методи підвищення запасу стійкості. Вплив коефіцієнту передачі

Підвищення запасу стійкості або демпфірування системи керування зводиться в кінцевому рахунку до раціонального перерозподілу полюсів і нулів передавальної функції замкнутої системи для задає або збурює впливу. Передавальна функція замкнутої системи пов'язана з функцією передачі розімкнутої системи жорстким співвідношенням. Тому під демпфуванням можна розуміти також раціональний перерозподіл полюсів і нулів передавальної функції розімкнутої системи [3, 11, 12, 13].

Питання перерозподілу полюсів і нулів передавальної функції замкнутої або розімкнутої системи, вирішуються на підставі застосування критеріїв стійкості і критеріїв якості. Найбільш повно це питання вирішується за допомогою синтезу коригувальних засобів. Також значення загального коефіцієнту передачі на стійкість і якість системи також впливає.

Для оцінки за критеріями параметрів стійкості і якості користуються методом Найквіста з використанням амплітудно-фазової характеристики (АФХ), побудованій на комплексній площині в координатах дійсних і уявних значень координат вектора амплітуди. АФХ – це геометричне місце точок, що описує вектор амплітуди, якій при зміні частоти від нуля до нескінченності змінює не тільки модуль (амплітуда), але і кут по відношенню до дійсної осі.

На рис. 2.1 зображена амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи з астатизмом першого порядку. Будемо припускати, що в розімкнутому стані система стійка (не має полюсів в правій півплощині). Тоді по виду амплітудно-фазової характеристики можна встановити, що в замкнутому стані система буде нестійкою. Це впливає з того, що

характеристика охоплює точку $(-1, j0)$. Завданням демпфірування є така деформація амплітуднофазової характеристики, в результаті якої характеристика не тільки не буде охоплювати точку $(-1, j0)$, але буде досить віддалена від цієї точки. Величину необхідного видалення характеристики від точки $(-1, j0)$ можна встановити, скориставшись тими чи критерієм якості. Тут найбільш просто використовувати показник зниження коефіцієнтів передачі. Тоді амплітудно-фазова характеристика не повинна перетинати коло, відповідне заданому значенню показника коливальності $M = \text{const}$.

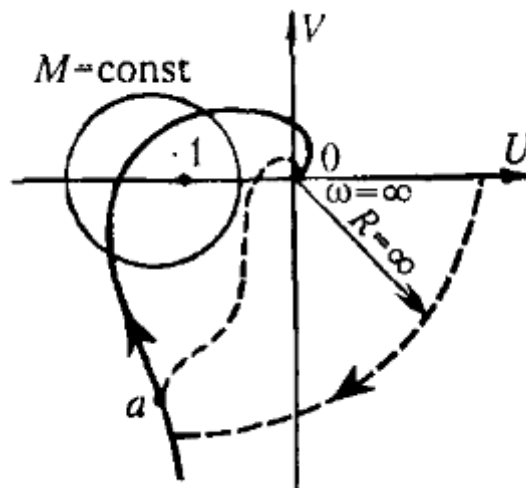


Рис. 2.1 АФХ розімкнутої системи з астатизмом 1-го порядку [3, 4]

Деформація амплітудно-фазової характеристики з метою отримання стійкості, а також запасу стійкості може здійснюватись за допомогою використання коригувальних ланок різного твань: послідовних, паралельних і зворотних зв'язків. Так як в лінійній системі для кожної ланки будь-якого типу можете бути знайдено еквівалентну ланка іншого типу, то досить розглянути дію ланок одного певного типу.

Деформація амплітудно-фазової характеристики може бути проведена декількома основними способами. Самий простий спосіб деформації – параметричний, за допомогою зменшення загального коефіцієнта підсилення

системи. Але недоліком його є зниження швидкодії системи і збільшення її статичної помилки.

Для наочності розглянемо статичну систему 3 порядку інерційності представлену на рис. 2.2. Система складається з трьох аперіодичних ланок охоплених від'ємним зворотним зв'язком: підсилювача, перетворювача, двигуна з датчиком швидкості (тахогенератором). На рис. 2.3 показані змодельовані за допомогою пакету МСAD діаграми перехідних процесів системи при параметрах коефіцієнта $K_y = 15$ і $K_y = 4$.

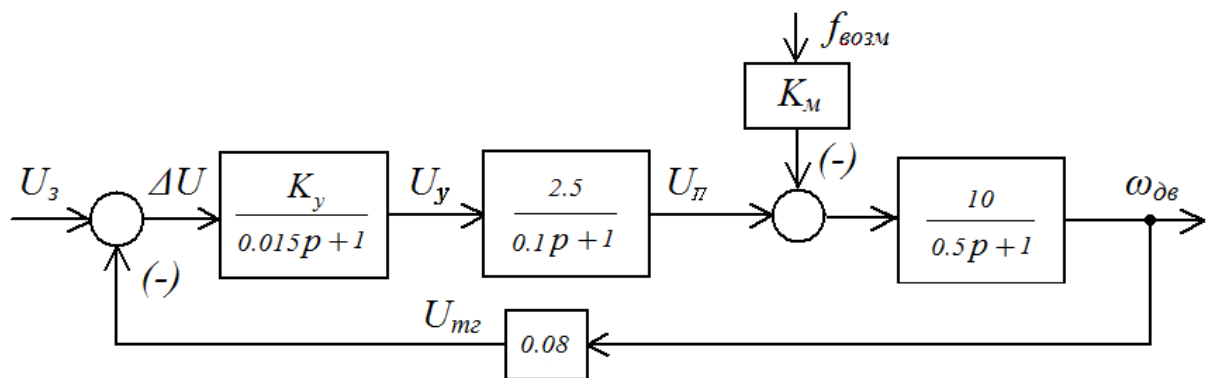


Рис. 2.2 Структурна схема для моделювання замкнутої статичної системи [11]

З отриманих діаграм видно, що при коефіцієнті $K_y = 15$ динаміка процесу і швидкодія незадовільні, при відносно невеликій статичній помилці $\Delta 1$. При $K_y = 4$ динаміка процесу і швидкодія задовільні, але значно збільшилась помилка $\Delta 2$.

Розглянемо декілька способів більш ефективної структурної корекції, метою якої є перерозподіл полюсів і нулів системи і як воно відображається на АФХ. Найбільш наочно може бути простежено дію послідовних коригувальних ланок, і для них найбільш просто можуть бути обчислені необхідні параметри. Тому в подальшому в основному будуть розглядатися послідовні коригувальні ланки і пристрої.

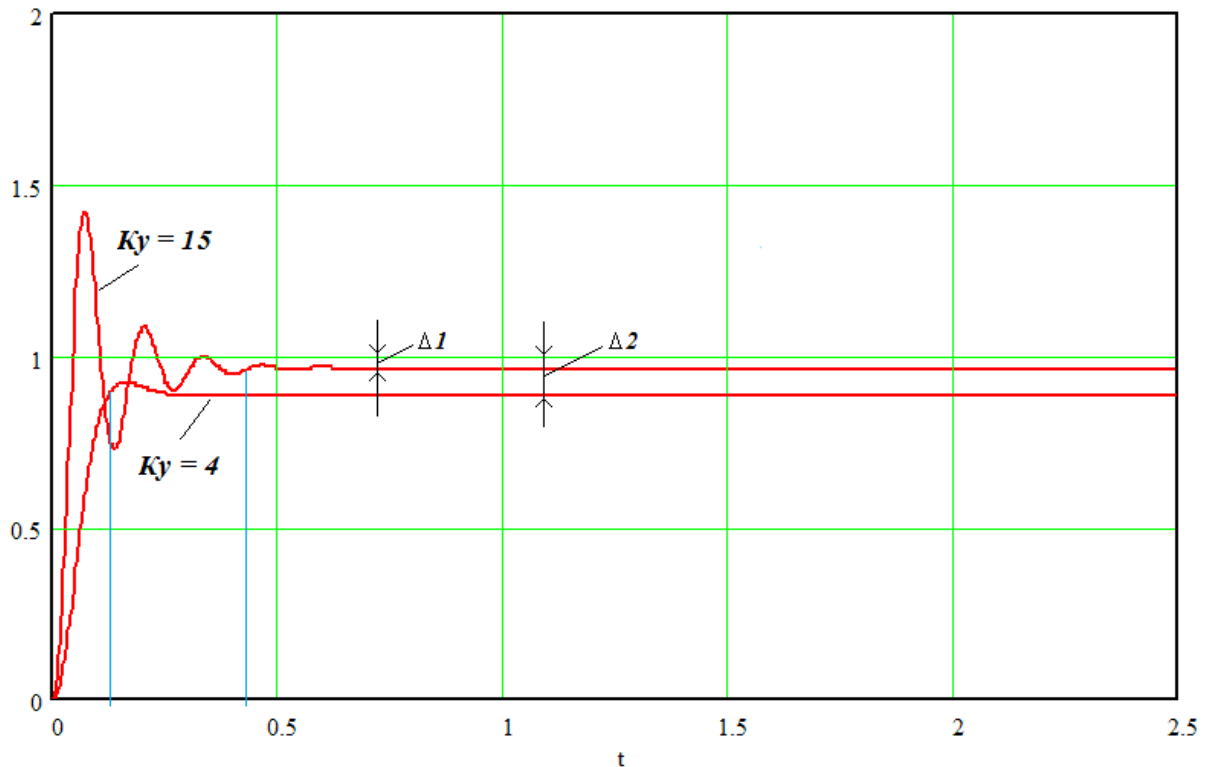


Рис. 2.3 Діаграми перехідних процесів замкнутої системи 3-го порядку.

Параметри моделювання: $K_y = 15$ і $K_y = 4$. Позначені:

$\Delta 1$ і $\Delta 2$ – статичні похибки регулювання [12]

2.2 Демпфірування з придушенням високих частот

Виведення амплітудно-фазової характеристики з забороненої зони (рис. 2.3) може бути здійснене за допомогою придушення пропускання розімкнутої системою всіх частот, які перевищують частоту ω_a , відповідну певній точці a на характеристиці. Тоді амплітудно-фазова характеристика набуде вигляду, зображений на рис. 2.3 пунктиром. Як видно з цього графіку, деформованої характеристики буде відповідати замкнута система, яка є не тільки стійкою, а й має необхідний запас стійкості.

Придушення підсилення на високих частотах завжди супроводжується появою негативних фазових зрушень. Тому цей метод демпфірування може також називатися демпфуванням з внесенням негативних фазових зрушень.

Придушення високих частот може здійснюватися різними способами. Найпростіше це виходить при введенні послідовно в ланцюг керування аперіодичної ланки першого порядку з відносно великою постійною часу і коефіцієнтом передачі $k = 1$. Передавальна функція такої ланки

$$W_k(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}. \quad (2.1)$$

Подібна ланка може завжди привести до отримання бажаного запасу стійкості в статичних системах з мінімально-фазовими ланками.

2.3 Демпфірування з підняттям високих частот.

Виведення амплітудно-фазової характеристики з забороненої зони може бути створено поворотом її високочастотної частини в позитивному напрямку, тобто проти годинникової стрілки. Це показано пунктиром на рис. 2.4.

Позитивний фазовий зсув (фазовий випередження) може бути отриманий за допомогою включення ланок що диференціюють. Якщо паралельно частини основного каналу керування включити ідеальну ланку що диференціює, то результуюча передавальна функція матиме вигляд

$$W_k(s) = T_0 s + 1 \quad (2.2)$$

При введенні такої ланки буде отримано додатковий позитивний фазовий зсув.

$$\Psi = \arctg \omega T_1 \quad (2.3)$$

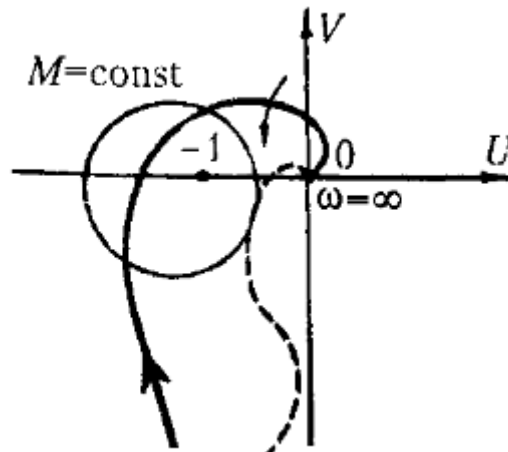


Рис. 2.4 АФХ з підняттям високих частот [3]

В області високих частот фазовий зсув близький до 90° . Це і викликає "закручування" амплітудно-фазової характеристики в високочастотній області (рис. 2.4).

Одночасно з позитивним фазовим зрушенням ланка збільшує пропускання високих частот, так як модуль його частотної передавальної функції

$$A(\omega) = \sqrt{1 + \omega^2 T_1^2} \quad (2.4)$$

буде тим більше, чим вище частота.

2.4 Демпфірування з введенням негативних фазових зсувів.

Сутність цього методу можна з'ясувати, наприклад, з розгляду рис. 2.5. На рис. 2.5б зображений випадок, коли через наявність в каналі розімкнутої системи консервативної ланки, що має чисто уявні полюси, замкнута система буде нестійкою. Додавання негативного фазового зсуву викличе «закручування» а.ф.х. за годинниковою стрілкою. В результаті система в замкнутому стані може бути зроблена стійкою (рис. 2.5а). Величину запізнювання τ в ланці можна визначити експериментально шляхом зняття

часової характеристики. Наприклад, якщо при подачі на вхід ланки стрибком деякої величини, прийнятої за одиницю, на виході виходить експериментальна крива для x_2 , що показана на рис. 2.5б, то можна наближено описати цю ланку як апериодическое ланка першого порядку з запізненням), взявши величини τ , T , k з експериментальної кривої (рис, 2.5б).

Зауважимо також, що така ж експериментальна крива згідно з графіком рис. 2.5 в може трактуватися і як тимчасова характеристика звичайного апериодичної ланки другого порядку з рівнянням

РОЗДІЛ 3

ДЕМПФИРУВАННЯ БАГАТОКООРДИНАТНИМ ВПЛИВОМ

3.1 Синтез оптимального керування

У складних системах оптимізацію керування здійснюють по основній частоті власних коливань і при лінійних керуючих впливах в часі, кратному періоду коливань системи перехідні процеси матимуть монотонний характер [1]. Наприклад, на пружну систему, представлену на рисунку 1 діє зовнішня сила F , яка викликає переміщення x маси m . Згідно з другим законом Ньютона з урахуванням динамічних властивостей рівняння руху механічної системи:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(t) - c_{df} \frac{dx}{dt} - c_k x, \quad (3.1)$$

де m, c_k, c_{df}, s – маса, коефіцієнти жорсткості і опору, оператор диференціювання, $F, x, x1, T, t$ – зусилля впливу, переміщення, реакція системи на короткий імпульс зусилля, період, час. Нормалізоване диференціальне рівняння системи:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_{df} \frac{dx}{dt} + c_k x = F(t) \quad (3.2)$$

Застосувавши перетворення Лапласа-Карсона, скориставшись відповідністю операції диференціювання, $s \rightarrow \frac{d}{dt}$ перейдемо до операторної форми:

$$[ms^2 + c_{df}s + c_k]X(s) = F(s) \quad (3.3)$$

Отримане рівняння представимо у вигляді передавальної функції системи, співвідношенням операційних зображень вихідної змінної до вхідних при нульових початкових умовах і представимо передатну функцію в зручному для моделювання вигляді:

$$W(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{c_k^{-1}}{mc_k^{-1}s^2 + c_{df}c_k^{-1}s + 1} = \frac{c_k^{-1}}{T_1T_2s^2 + T_2s + 1}, \quad (3.4)$$

$$\text{де } T_1T_2 = mc_k^{-1}, T_2 = c_{df}c_k^{-1}, T_1 = mc_{df}^{-1}$$

При керуванні системою за лінійним законом в часі, кратному періоду власних коливань, перехідний процес буде мати монотонний характер, як це представлено на рисунку 3.1. Недоліком такого способу є те що область застосування, обмежена системами з швидкодією, порівнянним періоду власних коливань і необхідністю постійного контролю часу періоду, в тому числі, для критичних за часом режимів [10,14, 15,18].

Ефективніше демпфірування забезпечують стандартні методи із застосуванням ПІ і ПІД-регуляторів для корекції амплітудно-частотних властивостей і смуги пропускання системи. Це дозволяє раціонально перерозподіляти нулі і полюси передавальної функції системи і тим самим компенсувати інерційність системи [2,3,4].

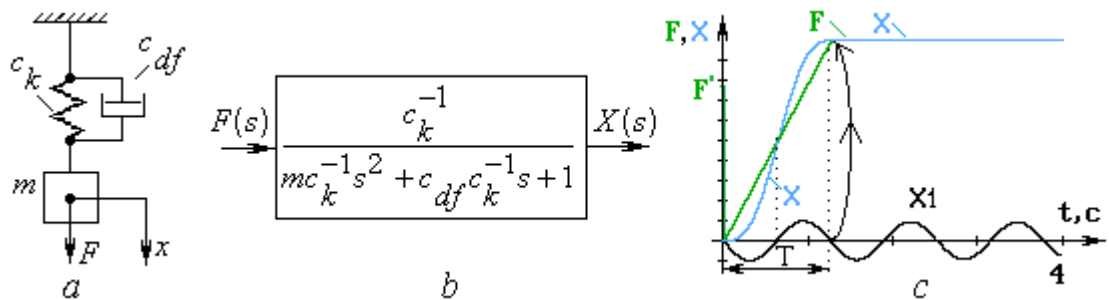


Рис. 3.1 Система з пружними властивостями (а), її математична модель – передавальна функція (b) і перехідні функції: x_1 – при дельта подібному, x – лінійно наростаючому керуючому впливі протягом періоду власних коливань системи (с). [16]

Недоліком цих способів є обмежена область застосування, тому що вони не можуть бути застосовувані для робочих режимів роботи, складні в реалізації, тому що вимагають точного контролю частотних параметрів

системи. Також, ці параметри не завжди відповідають вимогам безпеки системи по швидкодії в аварійних режимах роботи.

3.2 Метод багатокординатного впливу

Для усунення зазначених недоліків був розроблений спосіб керування системою у функції її частотних властивостей [8, 9, 17, 18]. Технічний результат способу полягає в підвищенні енергетичної ефективності, швидкодії, зменшенні динамічних перевантажень. Область його застосування – системи з пружними властивостями. Зокрема, робоче, запобіжне гальмування, керування ліфтами, підймальними машинами, у т.ч. для глибоких шахт, буровими установками і конвеєрами.

Суть способу ілюструється блок-схемою алгоритму роботи, що представлена на рис. 3.2. Схема містить блоки: завдання функції керування, констант і коефіцієнтів; обчислення різниці між функцією керування і сумою координат зміни керуючого впливу і його першої похідної в часі з коефіцієнтом пропорційності, що враховує частотні параметри системи підйому і динамічні параметри привода; формувача функції-координати другої похідної від функції зміни впливу на систему, амплітуда якої обмежена динамічними властивостями привода; формувача координати першої похідної функції зміни впливу; формувача координати функції зміни впливу; формувача закону впливу.

Оптимальний за динамічними властивостями перехідний процес забезпечується послідовними змінами впливів на динамічні координати системи до досягнення ними обмежень. При цьому обмеження необхідні для узгодження динамічних можливостей привода з інерційними властивостями керованої системи. Переходи системи в інші стани будуть забезпечуватися чергуванням впливів на координати до досягнення ними обмежень, починаючи з вищої похідною і закінчуючи керованою координатою. Наприклад, на координати ривка, прискорення, швидкості, переміщення.

Практична реалізація описаного алгоритму здійснюється способом оптимального керування системами зі складною динамікою, технічні рішення якого описано [19, 20].

Спосіб здійснює вплив на керовану координату руху системи (наприклад, швидкість) і через неї на наведені до неї координати її похідних (прискорення, ривок). При цьому функції керуючих впливів визначаються з урахуванням частотних параметрів системи і динамічних властивостей приводу.

У складних системах оптимізацію здійснюють за основною частотою власних коливань. Тому для практичної реалізації істотне значення має апроксимація диференціального рівняння системи, складеного за її динамічним параметрам, математичним описом перехідного процесу системи на основній частоті. Відомо, що затухаючий коливальний процес у часі може бути представлений диференціальним рівнянням другого порядку. Таке наближення дає можливість замінити первинні динамічні параметри диференціального рівняння (маси, коефіцієнти жорсткості і тертя) вторинними, фізична природа яких може бути описана математично. Наприклад, перехідний процес коливального ланки другого порядку, наведеного на рисунку 3.1, може бути представлений описом загасаючої синусоїдальної функції з відомими параметрами частоти, коефіцієнта демпфірування і т.п. Опис його в операторній формі забезпечить, хорошу адекватність моделювання динамічних властивостей системи.

З урахуванням прийнятих обмежень динамічних координат і природних зв'язків між діями технічним результатом способу керування забезпечуються підвищення швидкодії і енергетичної ефективності, мінімізуються динамічні перевантаження. Областю застосування методу є складні динамічні системи вищого порядку інерційності. Наприклад, керування системами з протяжною трансмісією, в тому числі і в критичних режимах, запобіжним гальмуванням ліфтів і підйомників глибоких шахт, буровими установками, конвеєрами. Спосіб також може бути корисний для

інших систем, описуваних детермінованими моделями, наприклад, в медицині, економіці.

Технічні рішення способу можуть бути застосовані для керування і стабілізації швидкодіючими системами високоточного позиціонування, зокрема, автоматичними телевізійними камерами на спортивних змаганнях, гостро спрямованої антеною [13], системою керування автопілотами [5, 6] із статичними і астатичними автоматами регулювання і стабілізації (в т.ч. структурно нестійкими з астатизмом 2-го порядку і вище), керування сучасними безпілотними високо маневреними транс-, над- і гіперзвуковими літальними апаратами.

Реалізація способу [8, 9] представлена блок-схемою алгоритму послідовності дій, наведеної на рисунку 3.2.

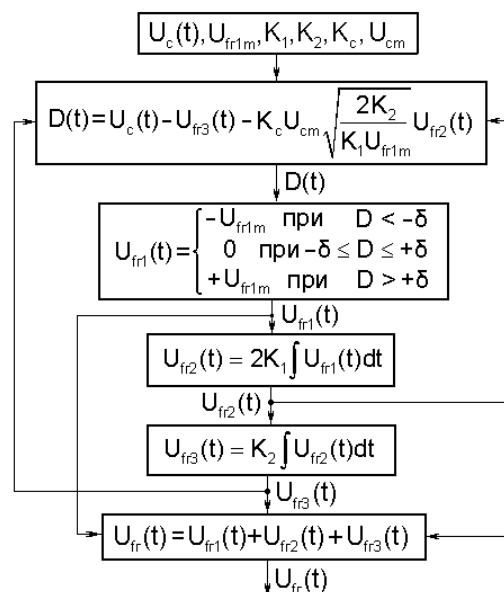


Рис. 3.2 Блок-схема алгоритму роботи способу. $K_1 = f(\alpha)$, $K_2 = f(\omega \alpha)$ – коефіцієнти; F , $U_{fr1m} = \frac{dF}{dt} \max$ – вплив і максимальна швидкість зміни впливу; U_c, U_{cm}, K_c – сигнал керування, його максимальне значення и коефіцієнт пропорційності; $U_{fr1}, U_{fr2}, U_{fr3}$ – вихідний сигнал і його складові змінні [21]

З метою запобігання перехідних процесів, пов'язаних з перерозподілом і розсіюванням механічної енергії закон керування, що формується враховує динамічні параметри привода, и частотні – пружної частини системи і представляє суму трьох функцій-координат: функції зміни гальмового зусилля, його першої і другої похідної, що описують рух системи, включаючи привод і пружну систему. В підсумку формується закон який здатний демпфувати власні коливання системи.

Функції-координати сформовані, обмежені й жорстко зв'язані між собою. Тому вплив на їх основі ефективно запобігає умови перерозподілу енергії між масами, що рухаються і пружними елементами в системі. Це підвищує енергетичну ефективність, швидкодію, зменшує динамічні перевантаження в системі, поліпшує безпеку експлуатації і подовжує ресурс устаткування.

3.3 Комп'ютерне моделювання багатокординатного впливу

Закон багатокординатного впливу на привод може формуватися на основі довільної функції керування в часі. На рис. 3.3 представлена власна перехідна характеристика механічної системи і динаміка процесу з застосуванням способу впливу що відповідає алгоритму на рис. 3.2. і функціях керування: ступінчастої і плавної.

Для оцінки якісних показників способу при відхиленні частотних параметрів від розрахункових проведено комп'ютерне моделювання динамічних характеристик при використанні трьох способів впливу на пружну систему. Результати моделювання представлені на рис. 3.4

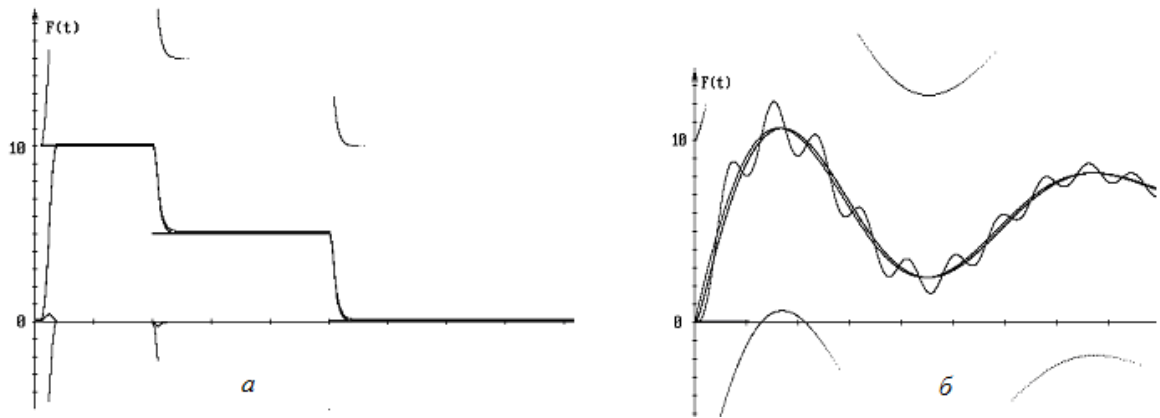


Рис. 3.3 Перехідні характеристики пружних зусиль, при ступінчастій (а) і плавній зміні (б) керуючого впливу. Позначені: ω , α , U_{fr} , U_{fn} , F_n^0 , F_n – частота, ступень демпфірування, закон впливу і його функції-координати, пружні зусилля: без застосування способу і з ним [21]

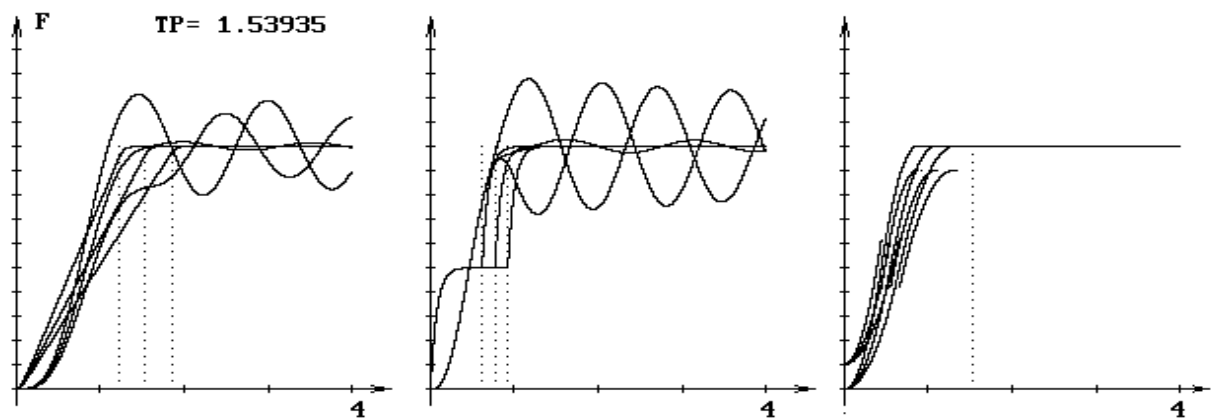


Рис. 3.4. Порівняння якісних показників динаміки процесу при використанні способів впливу: лінійного (а), двоступінчастого (б), багатокординатного (в), при відхиленні частотних параметрів на $\pm 20\%$. Позначені: T , ω , U_{fr} , F_n – період, частота, закон впливу і пружні зусилля в системі [21]

Результати досліджень показали високу ефективність технічних рішень способу демпфірування коливань в пружної системі, що може бути закладено в алгоритмах апаратного і програмного забезпечення при вирішенні відповідних технічних задач і проектів.

Технічна реалізація описаного методу може бути реалізована різними способами, апаратно і програмно. На його основі може бути створена

адаптивна система. Технічно це реалізується визначенням основних параметрів, наприклад, шляхом сканування зусиль в канатах при гальмуванні з малою швидкістю і номінальним навантаженням на обраному ділянці. За результатами визначаються параметри основної частоти і коефіцієнт загасання коливань, значення яких необхідні для розрахунку пристрою, що задає.

Багатокоординатне керування засноване на більш адекватному повному математичному описі і контролі динамічних властивостей системи, зокрема, трьома динамічними координатами, що подібно точному опису позиції точки в тривимірному просторі. Використання в керуючому сигналі похідних з фіксованими фазовими зрушеннями від основної координати дозволяють компенсувати інерційні властивості інтегруючих пристроїв систем з астатизмом. Це особливо важливо для динамічних систем високої точності, які крім швидкодії повинні забезпечити нульову помилку. При цьому порядок астатизма покращує точність системи в динаміці, але в той же час збільшення полюсів передавальної функції погіршує динамічні якості системи. Для демпфірування системи застосовують різні класичні методи, в тому числі і вводять фазові зрушення [22].

Реалізація способу на прикладі керування астатической системою 3-го порядку з 2-м порядком астатизма представлена на рисунках 3.5 і 3.6. Такі системи відповідно до критерію Найквіста структурно нестійкі при будь-якому значенні коефіцієнта передачі.

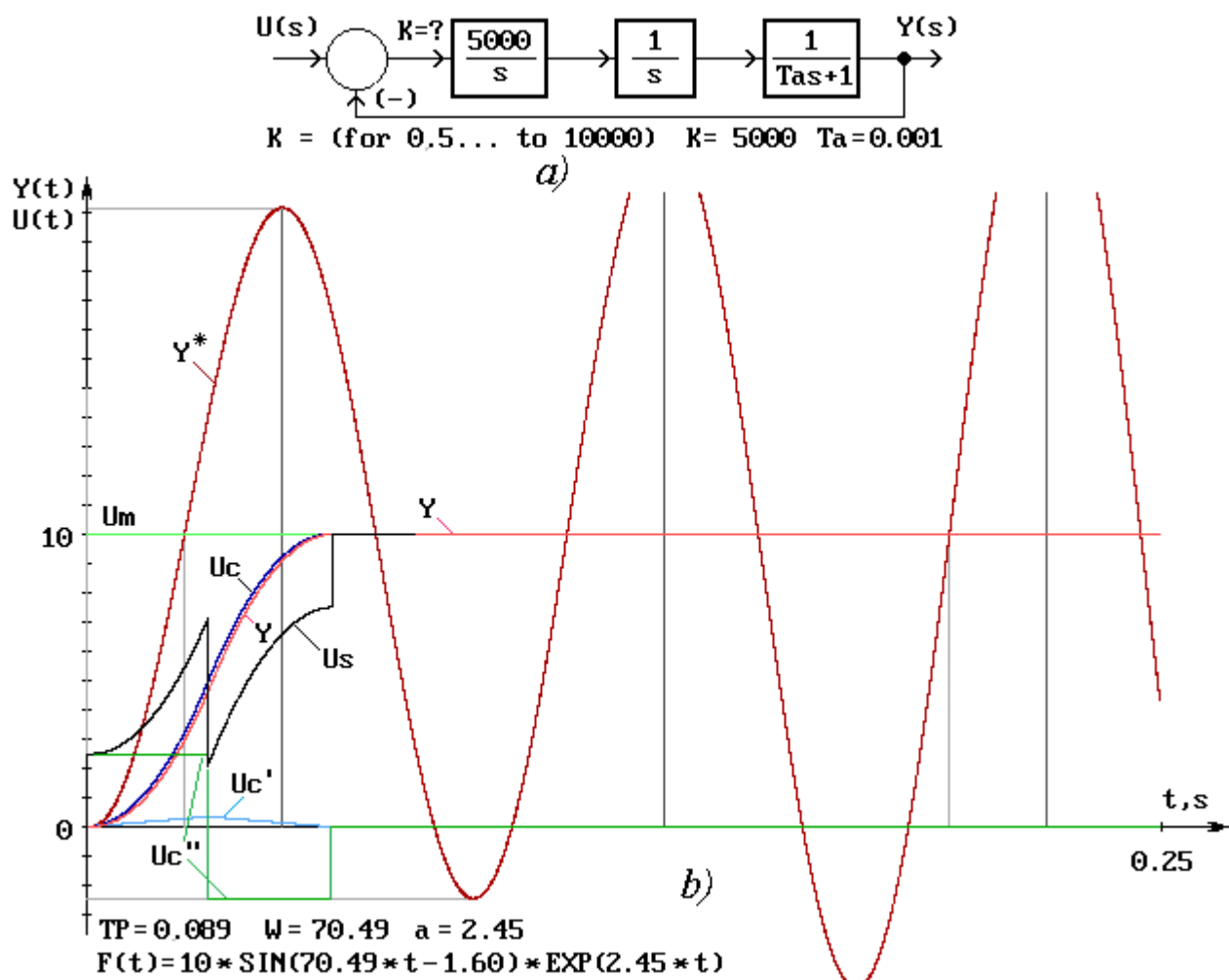


Рис. 3.5 - Система 3-го порядку з астатизмом 2-го порядку: *a)* структурна схема системи; *b)* діаграми перехідних процесів, без застосування Y^* і з застосуванням Y способу багатокординатного керування. [22]

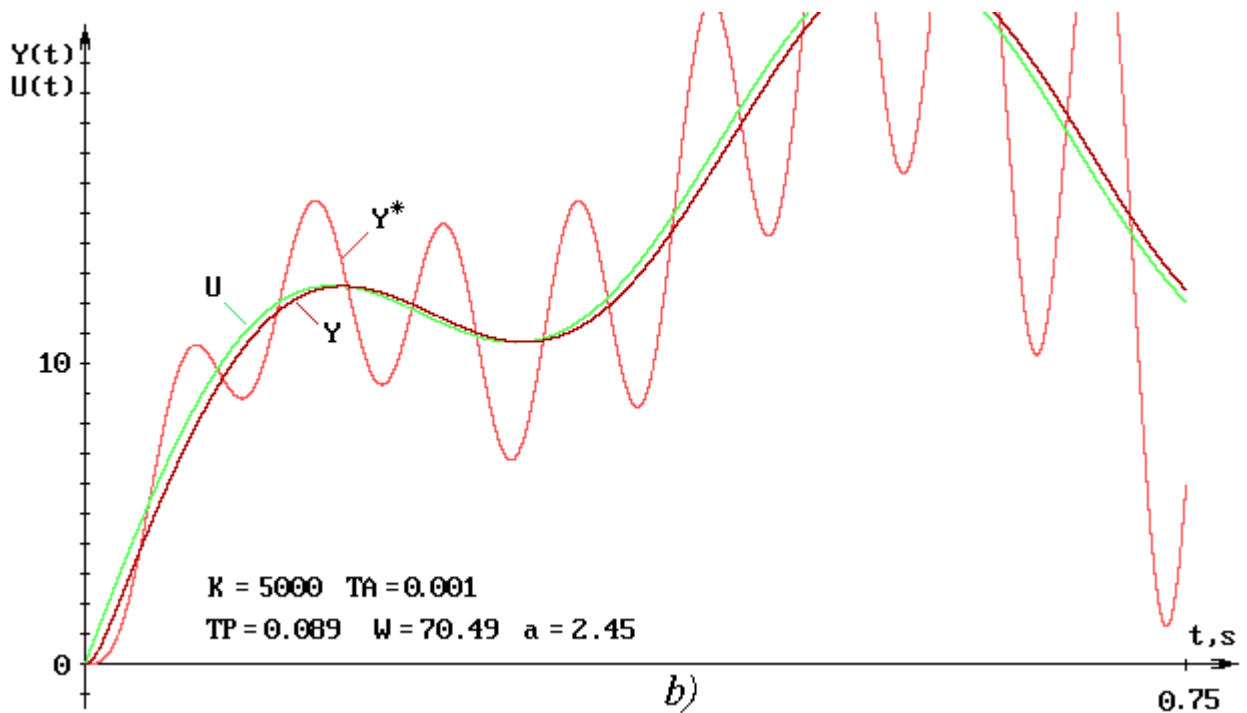


Рис. 3.6 - Діаграми динамічних властивостей системи, представленої на рисунку 3.5а: *a)* при змінних по знаку і величині східчастих керуючих впливах, *b)* при плавно мінливої керуючої дії [22]

У технічних рішеннях способу [8, 9] фазові зрушення автоматично включаються в структуру керуючої функції, що впливає на основну координату руху і через неї на координати першої та другої її похідних. При цьому параметри формованого сигналу визначаються заданою функцією керування, частотними властивостями системи і динамічними - приводу. Таке керування ефективно компенсує інерційність системи.

Моделювання застосування способу для оцінки якості і стійкості системи при керуючих впливах і зовнішніх збурень на замкнуту по основній координаті систему 5-го порядку з 2-м порядком астатизма в умовах відхилень розрахункових частотних параметрів від номінальних в 2 рази представлені на рисунках 3.7 (а-с).

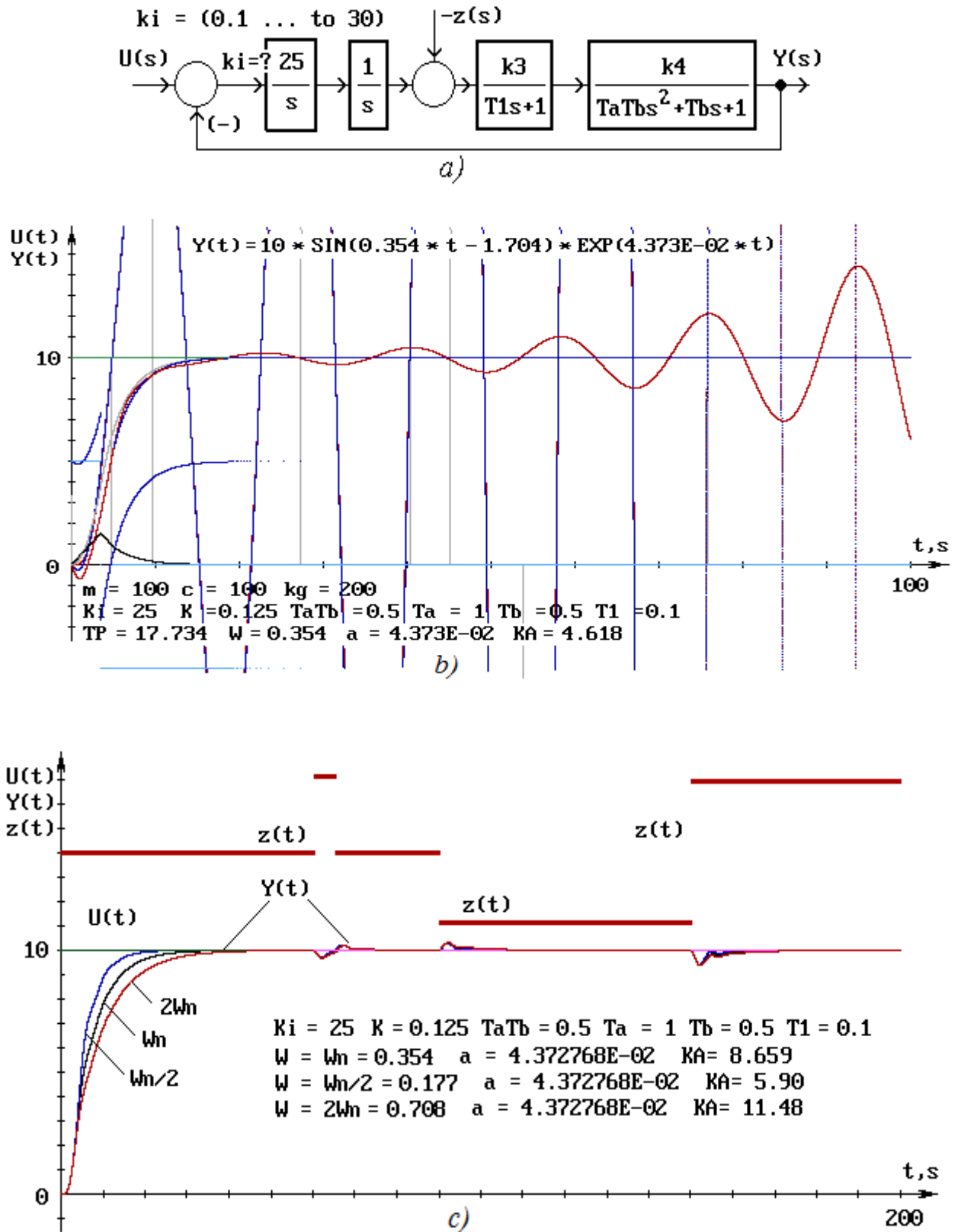


Рис. 3.7 – Моделювання способу керування для оцінки якості і точності системи: a) структурна схема системи, що моделюється (порядок інерційності - 5-й, астатизма - 2-й) з керуючими - $U(t)$ і збурюючими - $z(t)$ впливами; b) - перехідні характеристики системи в розімкнутому стані; c) -

перехідні характеристики в умовах ступеневої зовнішнього впливу z при дворових відхиленнях розрахункової частоти системи від номінальної. [22]

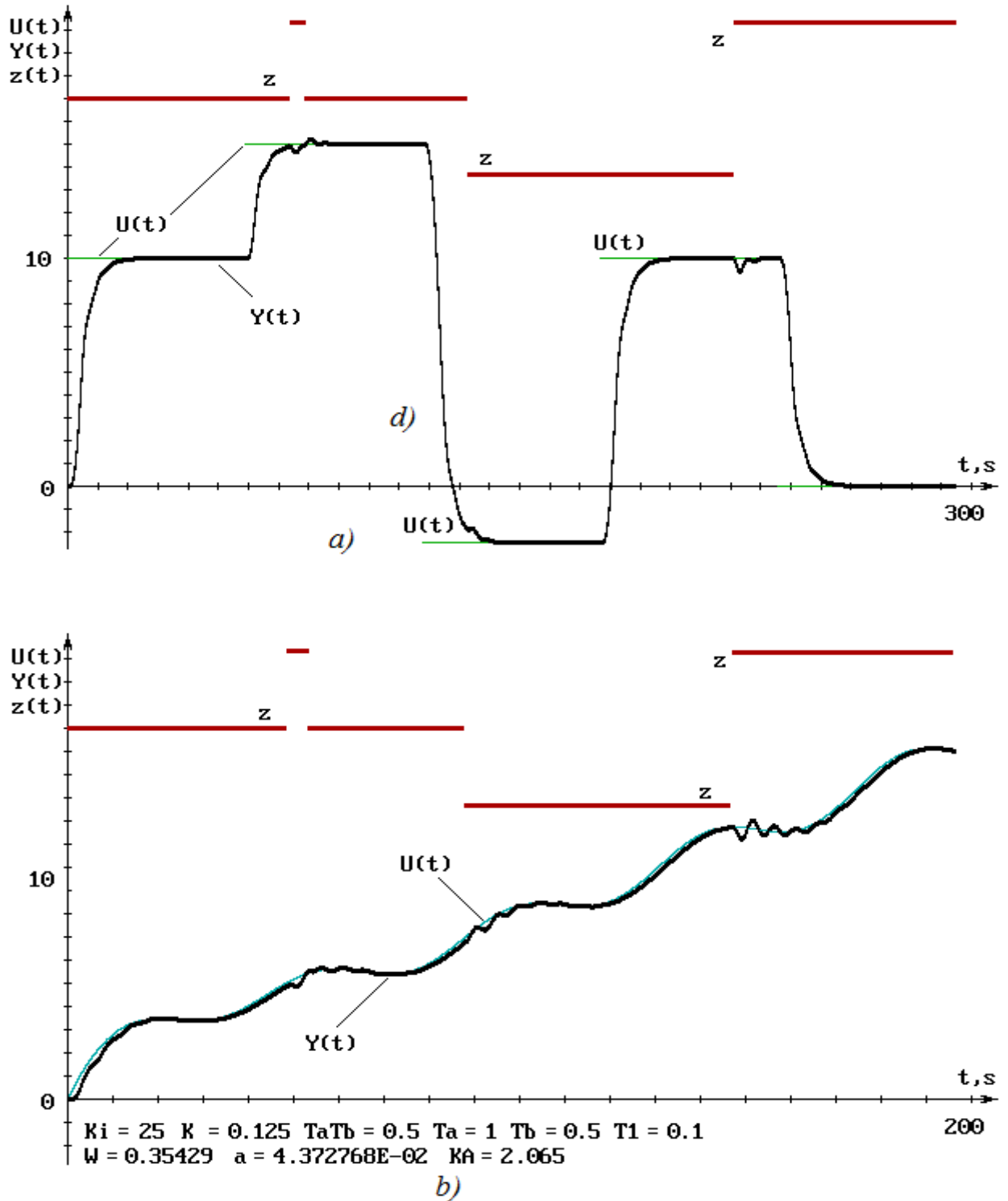


Рис. 3.8 – Перехідні характеристики системи 5-го порядку інерційності з 2-м порядком астатизма при зовнішніх впливах $z(t)$ і довільно змінюється функцією керування $U(t)$: а) - поступово; б) - плавно. [22]

Проведені комп'ютерні моделювання показали що Метод багатокординатного керування ефективно і оптимально демпфірує систему. Це забезпечується за рахунок наступних технічних рішень[12, 13]:

1. Раціональний спектр сигналу керування системою. Функція керування системою в часі відповідно до перетворенням Фур'є може бути представлена спектром елементарних періодичних функцій. Система з астатизмом, на яку спрямована функція керування, характеризується своїми частотними параметрами, і всі інші частоти є перешкодами, які збуджують реактивні процеси в системі і погіршують якість керування. Використання тільки раціональних частотних спектрів функції керування і придушення інших спектрів запобігає умови виникнення реактивних процесів в перехідних режимах, підвищує стійкість системи і її якість.

2. Вибір параметрів системи для оптимального керування. Під час руху системи параметри, що визначають її динамічні властивості змінюються, що необхідно враховувати. При синтезі алгоритмів керування складними системами використовують методи апроксимації, які оптимізують керування за рахунок зменшення кількості важко контрольованих параметрів. У запропонованих технічних рішеннях математичний опис динамічних властивостей системи апроксимується описом на основі частотних параметрів системи першої гармоніки, які визначаються датчиками. Це дозволяє ефективно керувати складною системою навіть при значних відхиленнях розрахункових параметрів від реальних.

3. Швидкодія і енергоефективність. Мінімізація часу і траєкторій перехідних режимів забезпечується циклічно, послідовними перемиканнями управляючих впливів на динамічні координати системи, починаючи з найвищої похідної функції керування і закінчуючи функцією керування. Крім того, координати обмежені фізичними властивостями системи і початок зміни кожної координати відповідає досягненню межі за попередньою

координаті. Це забезпечує сталість знака першої похідної і монотонний перехід основної координати руху в заданий стан (обмеження).

4. Запас стійкості (демпфірування). Структура астатичних систем включає в себе n інтегруючих пристроїв, які вводять негативні зрушення фаз в частотно-фазову характеристику системи. Відповідно, фазова характеристика такої системи на будь-якій частоті починається з $-\pi/2$. Необхідний запас стійкості системи по керуванню і обуренню може бути забезпечений раціональним перерозподілом полюсів і нулів передавальної функції або, наприклад, введенням фазових зрушень у функції керування. Наявність в керуючій функції компонентів похідних функції керування, визначених з урахуванням частотних властивостей системи і динамічних властивостей приводу, забезпечує фіксовані зрушення фаз до $+\pi/2$, які компенсують інерційні властивості системи і створюють необхідний демпфірування.

Таке демпфірування не змінює амплітудно-частотну характеристику системи, оскільки модуль частотної передавальної функції, що вноситься способом, $|W(j\omega)|=1$. Це не впливає на швидкодію системи, її смугу пропускання, компенсує природну для астатичних систем інерційність без зміни їх властивостей.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті методи розробки алгоритму керування складними системами на прикладі систем автоматичного регульованого запобіжного гальмування підіймальних установок глибоких шахт.

2. На підставі аналітичних і експериментальних досліджень з урахуванням інерційності систем канатів розроблені описи і моделі систем підйому, визначені і досліджені методи їх апроксимації для розробки ефективних технічних пристроїв компенсації інерційних властивостей, з метою забезпечення необхідних динамічних режимів роботи обладнання.

3. Дані технічні рішення можуть бути корисними при створенні систем автоматично регульованого запобіжного гальмування шахтних підіймальних установок для шахт глибиною понад 1000 м, де вплив інерційних властивостей пружної частини підйому на процес істотний.

4. Дані технічні рішення можуть бути корисними при створенні систем керування буровими устаноками глибокого буріння, конвеєрними лініями великої протяжності, а також сучасними швидкісними ліфтами багатоповерхових будинків.

5. Для дослідження систем і синтезу законів керування складними системами з інерційними елементами різної фізичної природи зручно користуватися методом структурного моделювання [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чермалых В. М. Исследование сложных электромеханических систем. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
2. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В.Солодовников, В.Н.Плотников, А.В.Яковлев. // – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. В.А. Бесекерский, Е.П. Попов // М., Наука, Гл. ред. ф.-м. литер. / 1975. –768 с.
4. Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. // – 12th ed. – 2011. – 1082 p.
5. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых само-летов. Под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Наука, Физматлит, 1998, с. 555.
6. Кузовков Н.Г. Системы стабилизации летательных аппаратов / Н.Г. Кузовков // М.: Высш. шк., 1976. 304 с.
7. Васильев В.И. Оптимизация управления сложной электромеханической системой с распределенными параметрами [Текст] // Адаптивні системи автоматичного керування. Міжвідомчий науково-технічний збірник – 2013. – 1(22). – С. 95-101 – Режим доступу: <http://asac.kpi.ua/article/view/29085> .
8. Спосіб гальмування шахтної підіймальної установки. Патент України на винахід UA114179 / В.І.Васильєв, Є.В.Васильєв // – Київ.:ДП “УПВ” (Укрпатент), опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.
9. Спосіб оптимального керування астатичними системами. Патент України на винахід UA117229 / В.І.Васильєв, Є.В.Васильєв // – Київ.:ДП “УПВ” (Укрпатент), опубл. 10.07.2018, бюл. № 13.
10. Васильев В.И. Пути снижения динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок системами автоматически регулируемого предохранительного торможения / В.И. Васильев // Стальные канаты: Сб. науч. тр. МАИСК. – Одесса: “Астропринт”, 2010, №8. – С. 18-29.

11. Васильєв, В.І. Дослідження способів оптимального керування динамічними системами. [Текст] / В.І. Васильєв, Є.В. Васильєв // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2014: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 11–16 березня 2014 р.). - Київ: 2014. — С. 51-53.
http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/260/RTPSAS_2014_s2_t2.pdf

12. Васильєв В.И. Оптимальное управление сложными динамическими системами / В.И. Васильєв, Е.В. Васильєв // East European Scientific Journal #5(45), 2019, p.32-44. Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland (Східноєвропейський науковий журнал #5(45), 2019, С.32-44) —
https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_may1.pdf

13. Vasyliiev, V.I. The method for optimal control of high precision quick scanning system. [Текст] / V.I. Vasyliiev, E.V. Vasyliiev // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта) РТПСАС'2019: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 18–24 листопада 2019 р.). - Київ: 2019. — С. 147-149.
http://conf.rtf.kpi.ua/attachments/article/1114/RTPSAS_2019_s5_t04.pdf

14. Васильєв В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок / В.И. Васильєв // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.

15. Чермалых В.М. Параметрическая оптимизация управления электромеханическими системами с идентифицированной передаточной функцией /В.М. Чермалых, И.Я. Майданский, А.В. Босак // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух». – 2011. – Вип. 20. – С. 132-138.

16. Чермалых В.М. Параметрическая оптимизация управления электромеханическими системами с идентифицированной передаточной функцией /В.М. Чермалых, И.Я. Майданский, А.В. Босак // ВІСНИК

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух». – 2011. – Вип. 20. – С. 132-138.

17. А. с. № 1447743 (СССР). Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / Васильев В. И., Дубовик В. Г., Чермалых В. М. Опубл. 30.12.88. Бюл. № 48.

18. Васильев В. І. Обґрунтування раціональних динамічних параметрів запобіжного гальмування шахтних підймальних установок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.09 – “Динаміка та міцність машин” / Васильев Володимир Іванович ; Сумський держ. ун-т. – Суми, 2012. – 20с.: іл. – Бібліогр.: с. 17-18.

19. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

20. Ажогин В. В. Моделирование на цифровых, аналоговых и гибридных ЭВМ / В. В. Ажогин, М. З. Згуровский // – К. : Вища школа., 1982. – 280 с.

21. Подчукаев В.А. Квантово-волновой дуализм описания динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 7. С. 453-457. DOI 10.17587/mau. 17453-457. Режим доступа: <https://mech.novtex.ru/jour/article/view/326/187>

22. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e082.htm>