

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
Розробка демпфірування складної системи високого порядку

студента гр. ЕПз-51

А.А.Бодункова

Науковий керівник,
ст. викладач, к.т.н.

В.І.Васильєв

Нормоконтроль,
ст. викладач, к.т.н.

О.Д. Динник

2020

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 30 сторінках, у тому числі включає 12 рисунків, таблиць, 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 Особливості астатичних регуляторів	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 ДЕМПФІРУВАННЯ БАГАТОКООРДИНАТНИМ ВПЛИВОМ	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 швидкістю, які підвищують продуктивність процесів, енергетичну ефективність, довговічність устаткування і тому завжди були об'єктом досліджень проектувальників.

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 наливки або шків тертя, підймальні 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.

РОЗДІЛ 1

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

1.2 Особливості астатичних регуляторів

Передавальна функція астатичних систем має полюси і відповідно фазочастотна характеристика системи на будь-якій частоті починається з $n\pi/2$, де n – кількість інтеграторів в регуляторі системи. А системи, де $n \geq 2$ згідно критерію Найквіста вважаються структурно не стійкими і тому вимагають спеціальних, часто складних, способів керування. Зокрема, використання лінійного закону впливу на систему з часом кратним періоду власних коливань системи, зниження коефіцієнтів передачі, застосування засобів корегування

Модель адекватно і досить точно описує динамічні властивості системи, при цьому частотами вищих гармонік можна знехтувати, які за амплітудою і по часу демпфірування, надають значно менший вплив.

Очевидно, що вирішення завдань представлених вище пов'язані з проблемою стійкості та поліпшенням якості перехідного процесу системи. Відповідно до [3] якість керування забезпечується запасом стійкості (демпфуванням) системи, поліпшенням її амплітудно-частотних характеристик. Компенсація фазових зрушень, що вносяться інтегруючими пристроями регулятора, є одним із способів, який передбачає введення в функцію керування разом з впливом на основну координату руху, її похідної. Однак на практиці це реалізувати складно, тому що для запобігання реактивних процесів в перехідних режимах повинні контролюватися зміни багатьох параметрів системи в процесі руху.

Синтез ефективних способів керування технічними системами зі складною динамікою здійснюється на основі математичних описів властивостей системи, комп'ютерного моделювання, його аналізу, оцінки результату, пошуку рішень і резервів ефективності.

Найбільш точні описи систем забезпечують детерміновани моделі, тому що описують сувору залежність показників від впливу змін параметрів і факторів. Так, математична формула з відповідними значеннями аргументів і факторів об'єкта забезпечує визначення конкретних значень його стану. Прикладами таких залежностей є формули законів фундаментальних і спеціальних наук. Якісно

розроблені моделі з максимально можливим урахуванням параметрів можуть стати основою для досліджень і оптимізації технічних систем.

Другим цікавим фактором на якому можна задуматись є філософська проблема між складним і спрощеним. Проблема апроксимації складних описів спрощеними. У 20-му сторіччі виникла теорія карпусулярно-хвильового дуалізму в мікро світі. Теорія виникла на тлі того, що з її допомогою зрозуміліше стали деякі явища. Останнім часом з'явилися публікації, що пропонують подібні методи для математичного опису руху систем макро рівня на основі елементів квантово-хвильового дуалізму [10, 12, 21]. Розвиток методів комп'ютерного моделювання систем і їх властивостей, надали можливість оцінки адекватності і ефективності методів апроксимації з елементами квантово-хвильового дуалізму при синтезі оптимальних керувань складними системами.

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, 4, 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), побудованої 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 $M = \text{const}$.

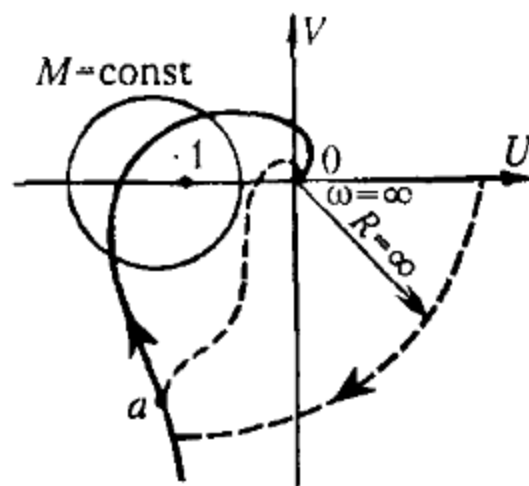


Рис. 2.1 АФХ розімкнутої системи з астатизмом 1-го порядку

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 $K_y = 4$.

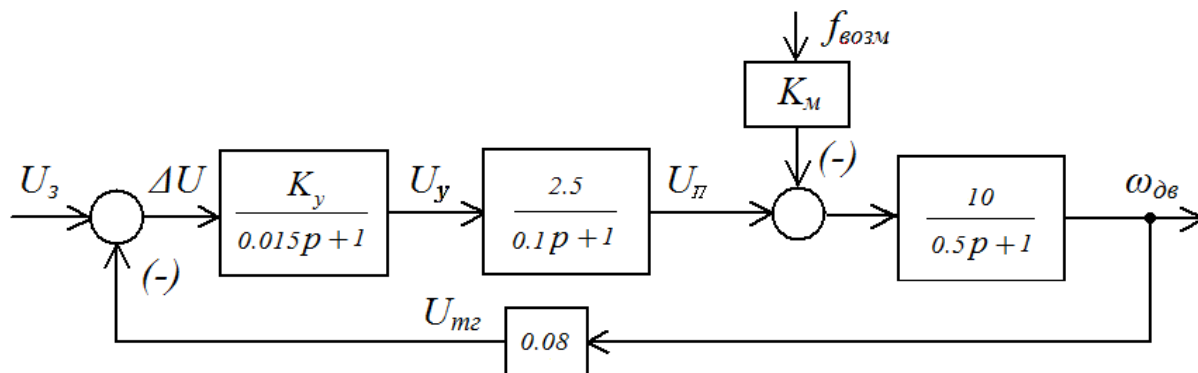


Рис. 2.2 Структурна схема для моделювання замкнутої статичної системи

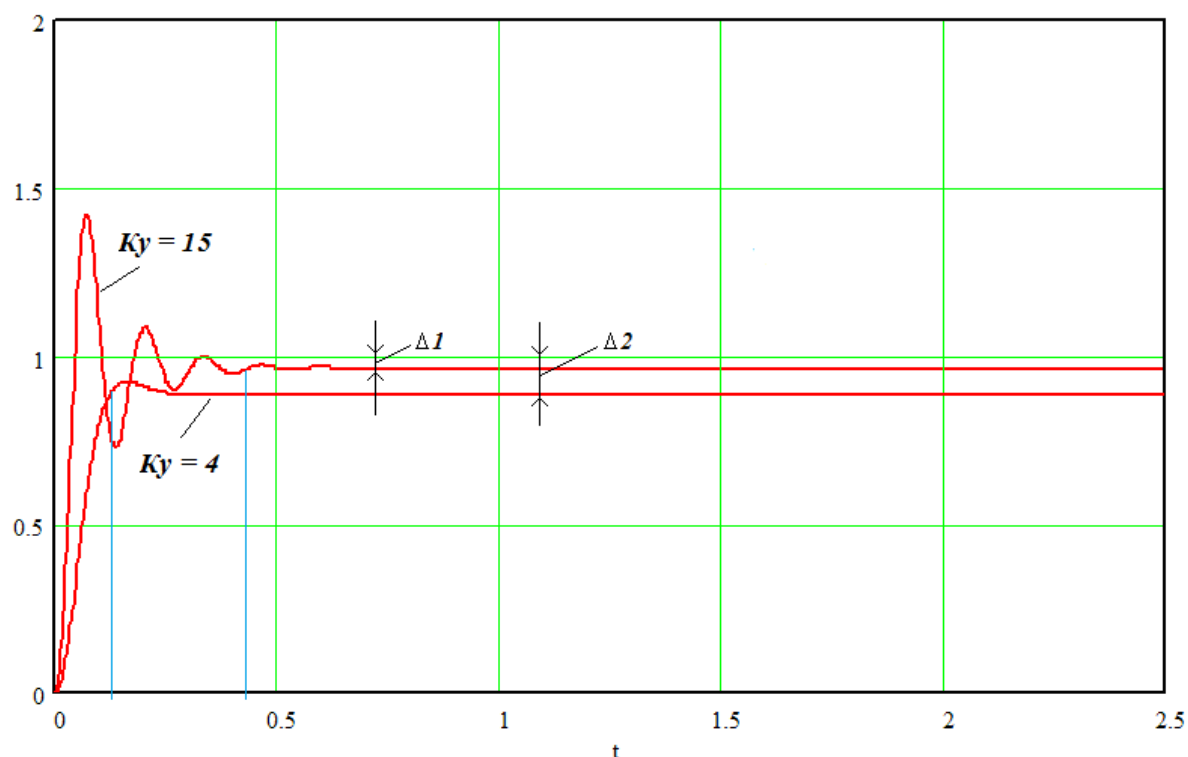


Рис. 2.3 Діаграми перехідних процесів замкнутої системи 3-го порядку.

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

$\Delta 1$ і $\Delta 2$ – статичні похибки регулювання

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

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.

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 характеристиці 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

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

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

$$W_k(s) = T_0 s + 1$$

При введенні такої ланки буде отримано додатковий позитивний фазовий зсув.

$$\Psi = \text{arctg} \omega T_1$$

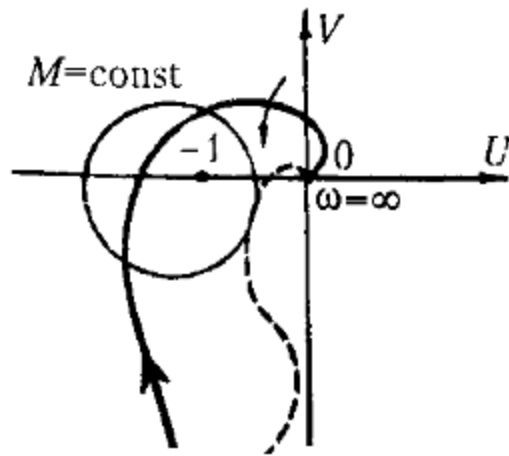


Рис. 2.4 АФХ з підняттям високих частот

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

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

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

ДЕМПФІРУВАННЯ 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:

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

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

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, порівняним періоду власних коливань і необхідністю постійного контролю часу періоду, в тому числі, для критичних за часом режимів [10,14, 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].

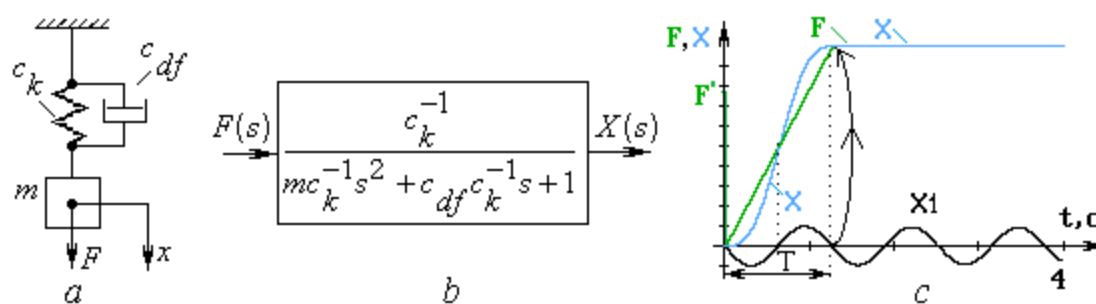


Рис. 3.1 Система з пружними властивостями (а), її математична модель – передавальна функція (б) і перехідні функції: x_1 – при дельта подібному, x – лінійно наростаючому керуючому впливі протягом періоду власних коливань системи (с).

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, 11, 12]. 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 [12, 13].

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 динамічними параметрами, 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.

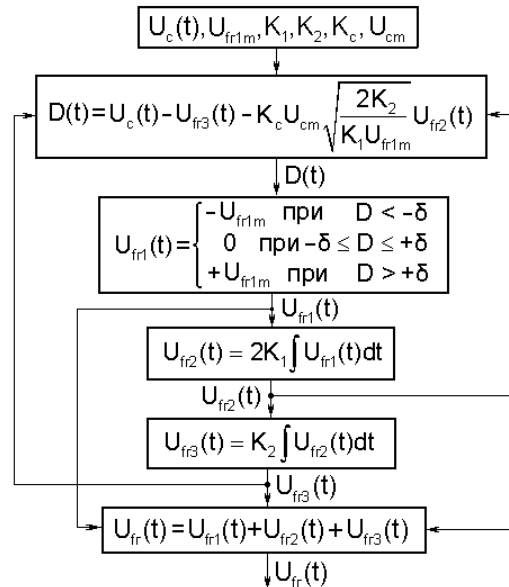


Рис. 3.2 Блок-схема алгоритму роботи способу. $K_1 = f(\varphi)$, $K_2 = f(\omega \varphi)$ – коефіцієнти; F , $U_{fr1m} = \frac{dF}{dt} \max$ – вплив і максимальна швидкість зміни впливу; U_c, U_{cm}, K_c – сигнал керування, його максимальне значення і коефіцієнт пропорційності; $U_{fr1}, U_{fr2}, U_{fr3},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

З метою запобігання перехідних процесів, пов'язаних з перерозподілом і розсіюванням механічної енергії закон керування, що формується враховує динамічні параметри привода, і 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.

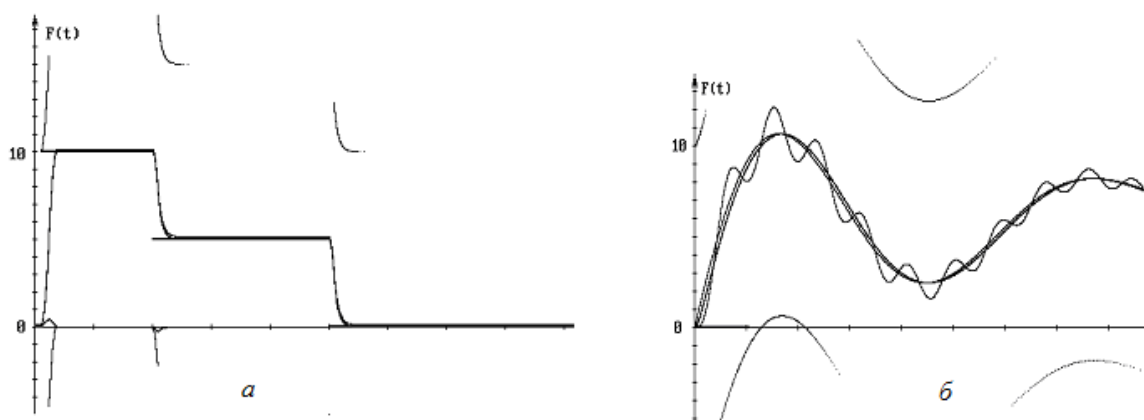


Рис. 3.3 Перехідні характеристики пружних зусиль, при ступінчастої (а) і плавної зміні (б) керуючого впливу. Позначені: ω , α , U_{fr} , U_{fri} , F_n^0 , F_n – частота, ступень демпфірування, закон впливу і його функції-координати, пружні зусилля: без застосування способу і з ним

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

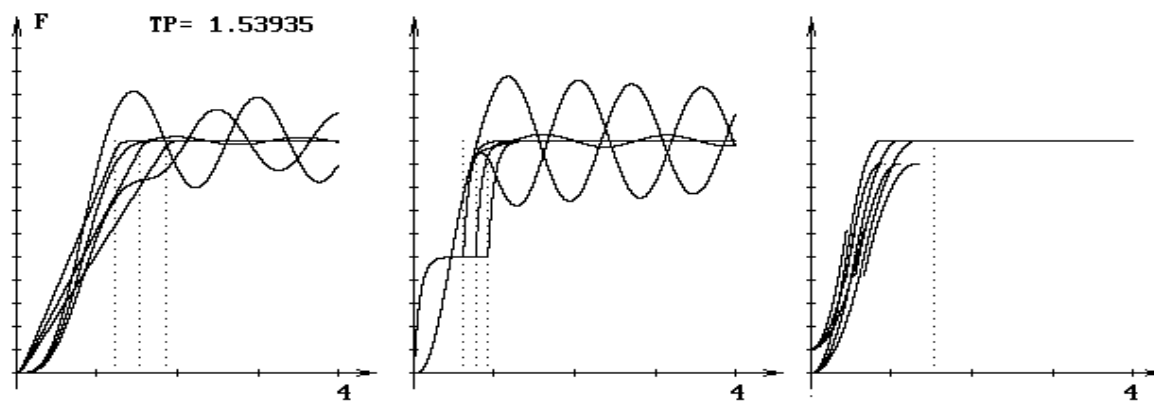


Рис. 3.4. Порівняння якісних показників динаміки процесу при використанні способів впливу: лінійного (а), двоступінчастого (б), багатокординатного (в), при відхиленні частотних параметрів на $\pm 20\%$. Позначені: T , ω , U_{fr} , F_n – період, частота, закон впливу і пружні зусилля в системі

Результати досліджень показали високу ефективність технічних рішень способу демпфірування коливань в пружній 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.

Багатокординатне 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 [2,3].

Реалізація способу на прикладі керування астатическою 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.

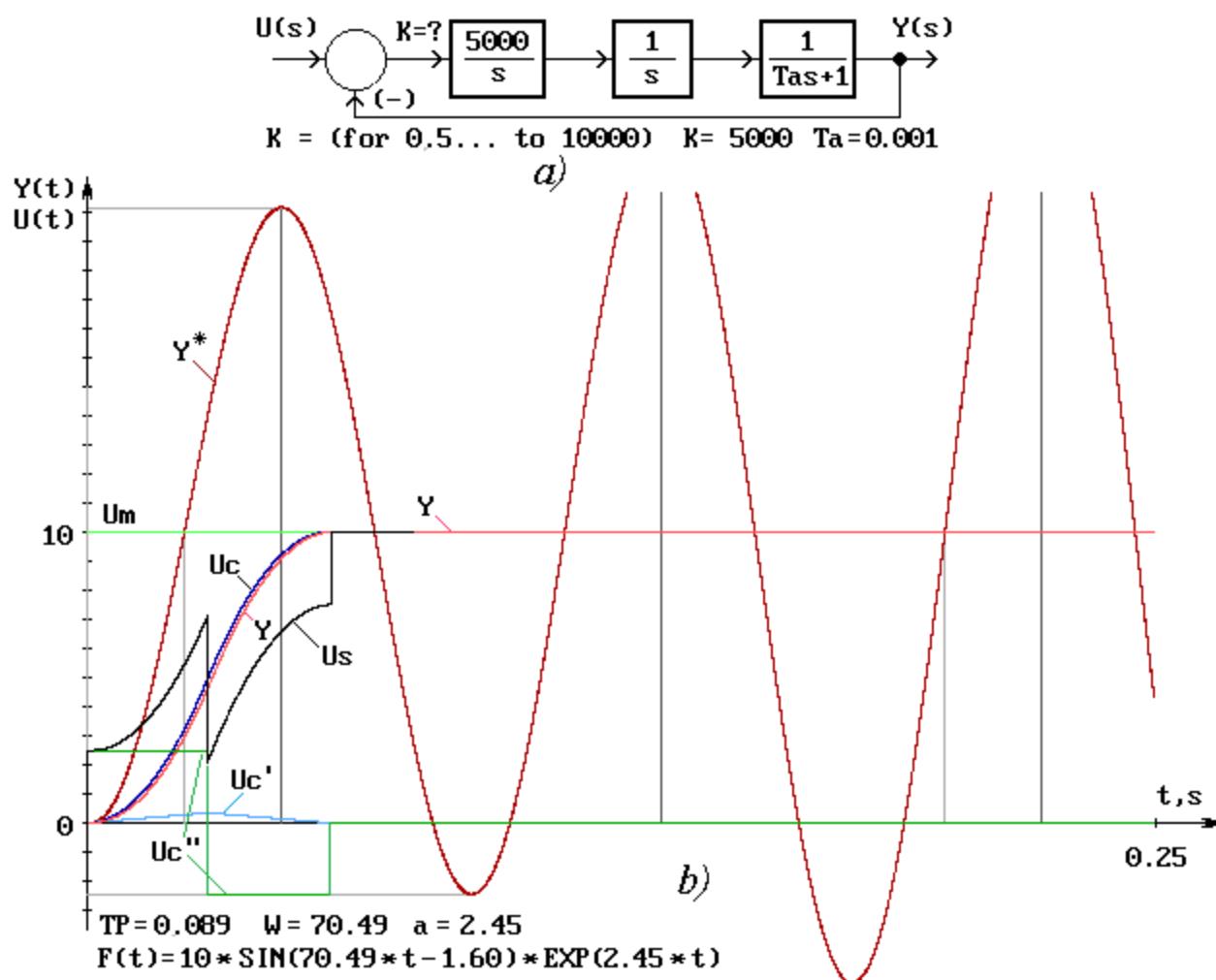


Рис. 3.5 - Система 3-го порядку з астатизмом 2-го порядку: *a)* структурна схема системи; *b)* діаграми перехідних процесів, без застосування Y^* і з застосуванням Y способу багатокординатного керування.

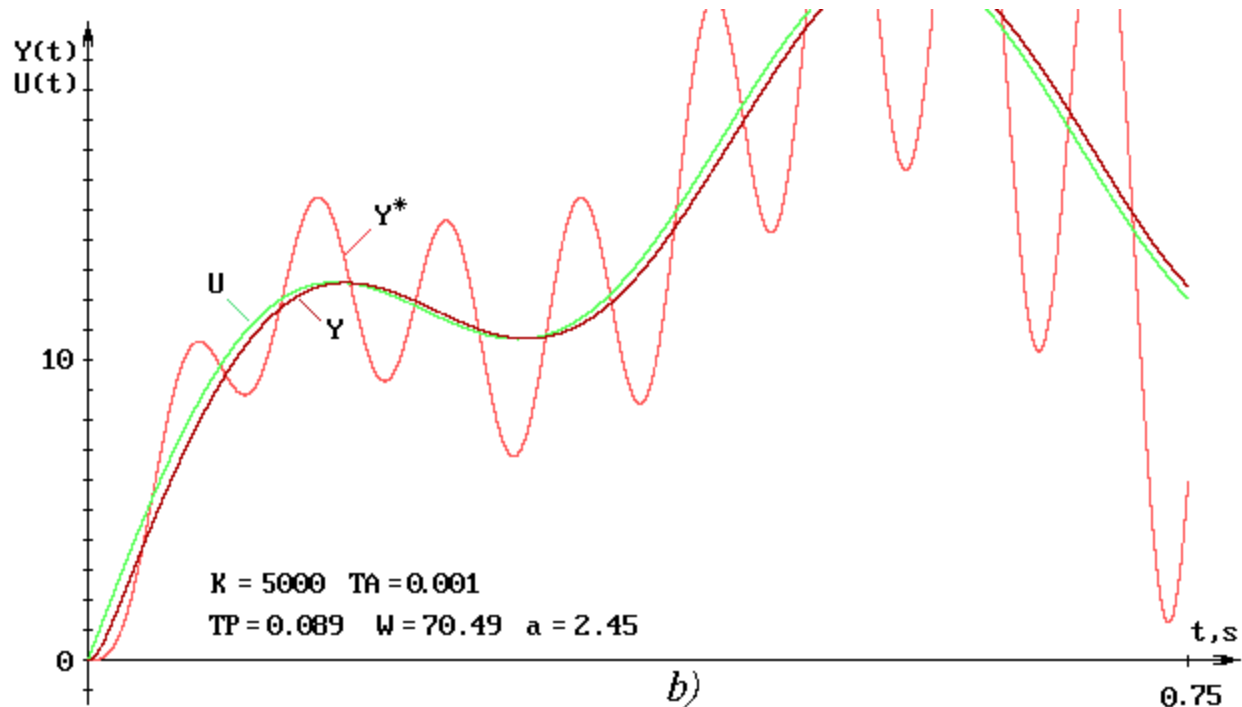
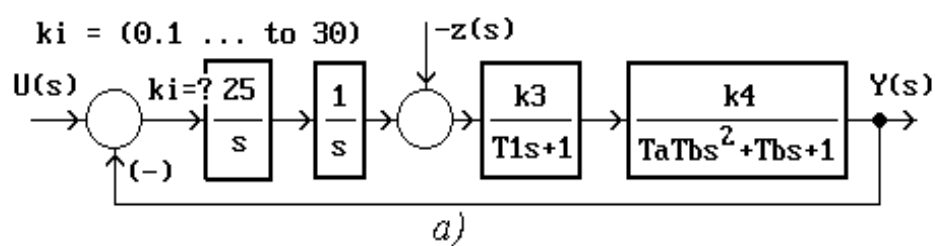


Рис. 3.6 - Діаграми динамічних властивостей системи, представленої на рисунку 3.5а: а) при змінних по знаку і величині східчастих керуючих впливах, б) при плавно мінливої керуючої дії.

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 7 (а-с).



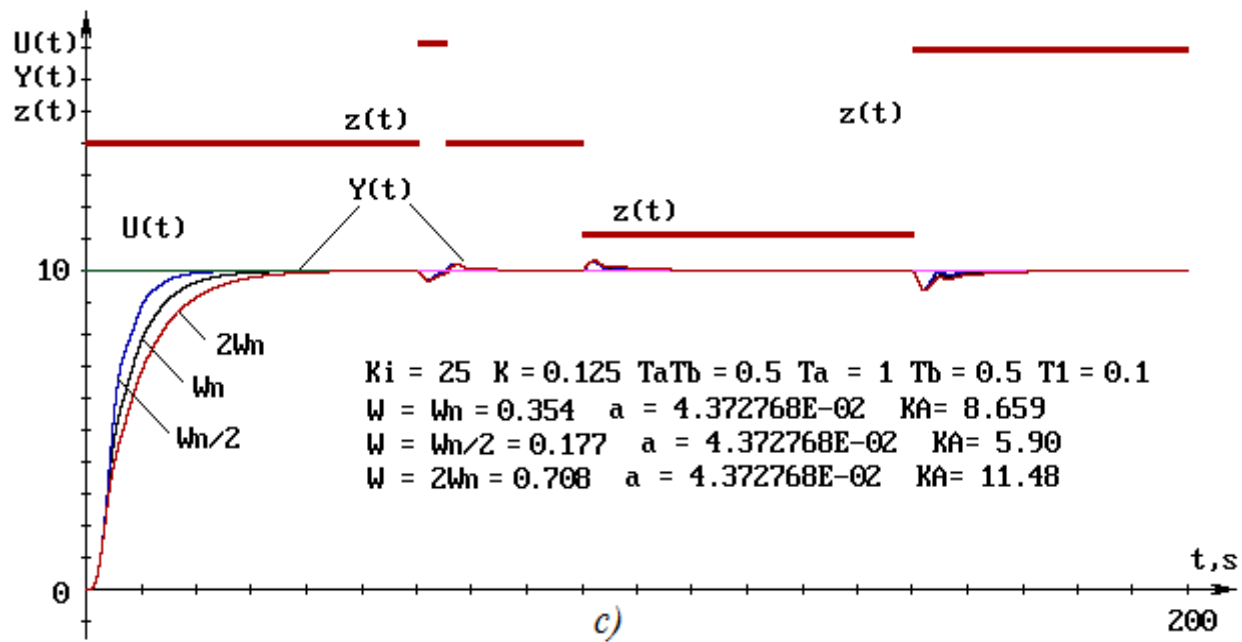
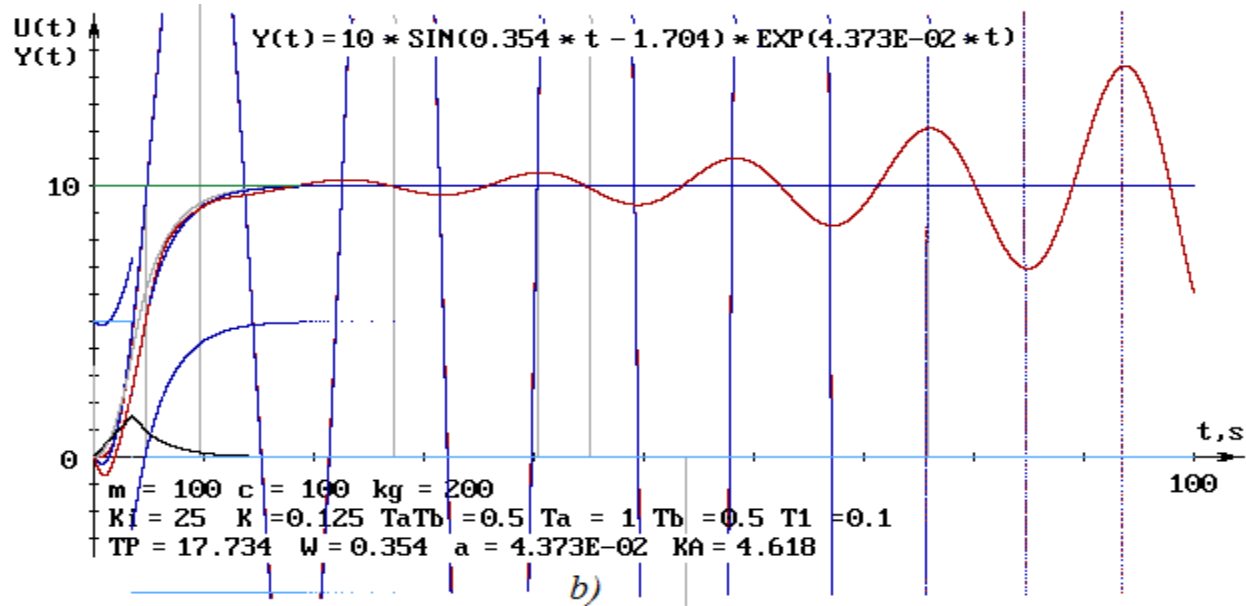


Рис. 3.7 – Моделювання способу керування для оцінки якості і точності системи: а) структурна схема системи, що моделюється (порядок інерційності - 5-й, астатизма - 2-й) с керуючими - $U(t)$ і збурюючими - $z(t)$ впливами; б) - перехідні характеристики системи в розімкнутому стані; в) - перехідні характеристики в умовах ступеневої зовнішнього впливу z при дворазових відхиленнях розрахункової частоти системи від номінальної.

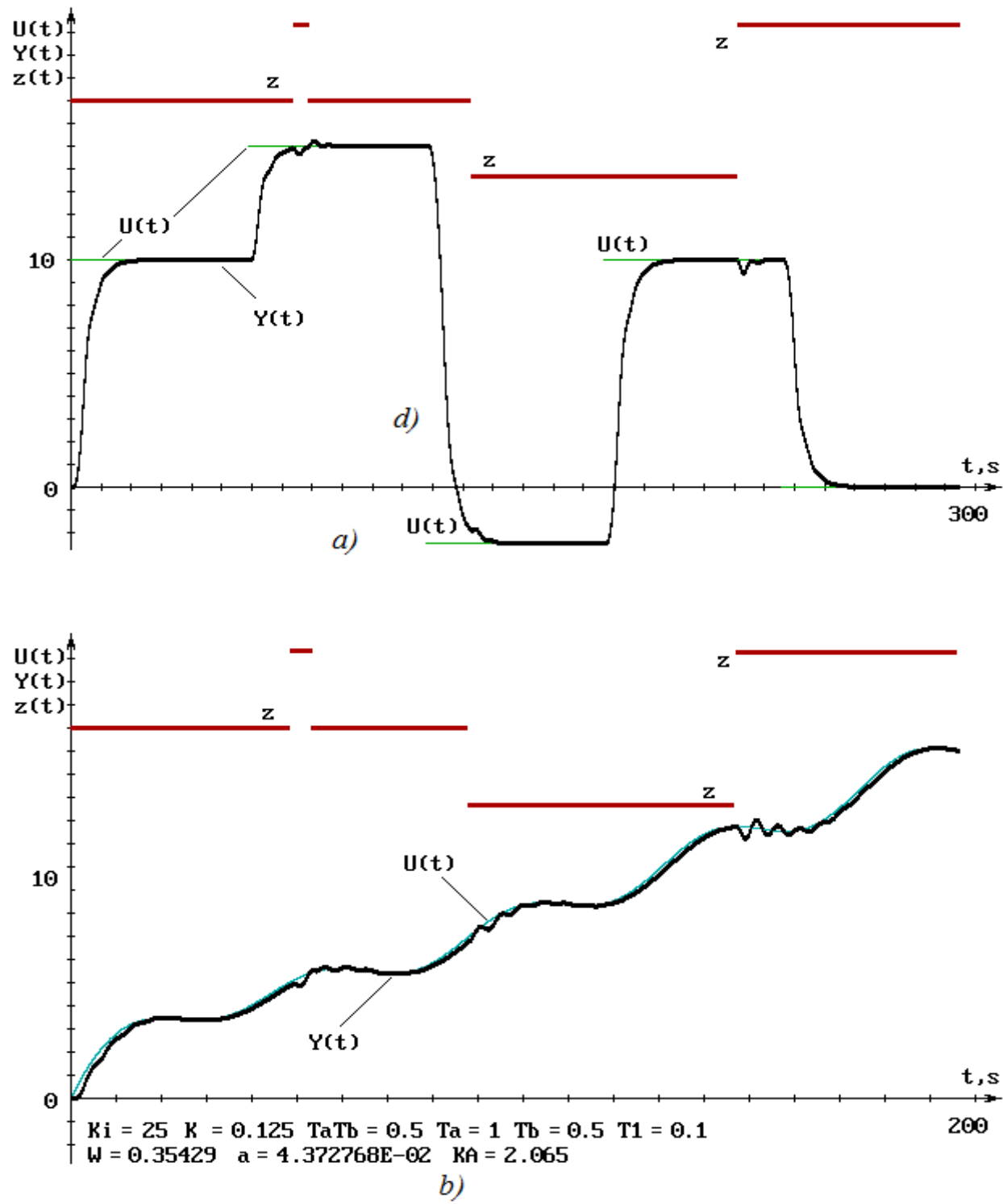


Рис. 3.8 – Перехідні характеристики системи 5-го порядку інерційності з 2-м порядком астатизма при зовнішніх впливах $z(t)$ і довільно змінюється функцією керування $U(t)$: а) - поступово; б) - плавно.

Проведені комп'ютерні моделювання показали що Метод багатокоординатного 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 підймальних 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 підймальних 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 багатопверхових 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 самолетов. 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 доступа: <http://asac.kpi.ua/article/view/29085> .
8. Спосіб гальмування шахтної підйомальної установки. Патент України на винахід UA114179 / В.І.Васильєв, Є.В.Васильєв // – Київ.:ДП “УІВ” (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 “УІВ” (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 // Гірничя 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. Васильєв 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” / Васильєв 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://nucphys.sinp.msu.ru/enc/e082.htm>