

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
Розробка керування високоточним позиціонуванням

студента гр. ЕІз-71

Р.Г.Рябоконея

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

В.І.Васильєв

Нормоконтроль,
ст. викладач, к.т.н.

О.Д. Динник

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є аналіз відомих методів розробки, налагодження та удосконалення технічних пристроїв для керування складними динамічними системами за критерієм якості, точності і швидкодії.

Мета роботи полягає в дослідженні можливостей сучасних методів і засобів для проектування оптимального за швидкістю і точності управління складними системами.

У процесі проведення роботи використовувалися сучасні досягнення технічної кібернетики в галузі аналізу та синтезу систем керування. В якості інструменту досліджень використовувалось комп'ютерне моделювання складних систем із застосуванням алгоритмів класичних методів математичного моделювання і частотного аналізу, а також сучасного методу простору змінних станів. Зручність комп'ютерного моделювання також полягає в тому, що воно дає можливість отримання зручного і швидкого результату а табличній або графічній формі.

Результатом проведених досліджень встановлено, що сучасні технології проектування на основі знань технічної кібернетики, математичних, цифрових і комп'ютерних методів аналізу і синтезу дають проектувальникам можливості більш ефективно в часі розробляти алгоритми і пристрої оптимального керування складними динамічними системами. При виконанні роботи крім відомих методів параметричної і структурної оптимізації систем досліджувався метод оптимального керування на основі багатокординатного впливу.

Робота викладена на 34 сторінках, у тому числі включає 12 рисунків, ___ таблиць, список цитованої літератури із 24 джерел.

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

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ СИСТЕМ ІЗ СКЛАДНОЮ ДИНАМІКОЮ	4
1.1 Статична помилка систем автоматички і способи її регулювання	4
1.2 Статичне і астатичне регулювання	6
1.3 Особливості астатичних регуляторів	8
РОЗДІЛ 2 ЯКІСТЬ І ТОЧНІСТЬ СИСТЕМ І ЇХ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК	10
2.1 Запас стійкості динамічної системи. Вплив коефіцієнту передачі	10
2.2 Демпфірування з придушенням високих частот	13
2.3 Демпфірування з підняттям високих частот.	14
2.4 Демпфірування з введенням негативних фазових зсувів	15
РОЗДІЛ 3 БАГАТОКООРДИНАТНЕ КЕРУВАННЯ І ТОЧНІСТЬ СИСТЕМ	17
3.1 Спосіб багатокординатного керування і статична помилка системи	17
3.2 Метод багатокординатного впливу	19
3.3 Комп'ютерне моделювання багатокординатного впливу	22
ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28

ВСТУП

Системи з заданими ресурсами, оптимальні за швидкодією, які спрямовані на підвищення якості, продуктивності, енергетичної ефективності завжди були об'єктом досліджень проектувальників [1,2,3], але особливо актуально це стало помітно в наш час, коли в машинобудуванні отримало розвиток новий напрямок - розробка та впровадження високоточних і швидкодіючих технічних систем в різних областях життєдіяльності людини. Зокрема ця проблема актуальна для авіа- і ракетобудування [3], лазерної техніки, сучасних систем оборони і озброєнь і т.д., а бурхливий розвиток досягнень в електронній промисловості в останні десятиліття став каталізатором цього процесу.

В процесі роботи ряду технічних систем відбуваються складні фізичні і інформаційні процеси. Зокрема енергетичні взаємодії елементів з інерційними властивостями приводять до коливань вихідного параметру, що погіршує динаміку, безпеку і ресурс роботи систем. 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. Іншою групою складних систем, де виникають проблеми стійкості і якості, складають астатичні системи. Астатические властивості їм надаються інтегруючими елементами регулятора. У передавальній функції таких систем є полюса і це відповідно ускладнює динаміку системи, обмежує сферу застосування, так як вони вимагають спеціальних коригувальних пристроїв, не можуть бути застосовані для деяких критичних режимів роботи, вимагають точного контролю частотних параметрів системи. Також, їх параметри не завжди відповідають вимогам безпеки систем по швидкодії в аварійних режимах роботи.

Метою роботи є пошук, вивчення і аналіз матеріалів по темі розробки сучасних високоточних систем.

РОЗДІЛ 1

1.1 Статична точність систем автоматики. Проблеми і способи її досягнення.

Класична автоматична електронна система керування процесом (наприклад, стабілізації параметру температури) або системою (наприклад, приводом, позиціонуванням безпілотного апарату, тощо) складається з підсистеми пристрою керування (регулятор), на яке надходить сигнал керування і об'єкта керування, на який в процесі руху, крім керуючого впливу з регулятора діє збурюючий вплив (наприклад, зміна навантаження, вплив зовнішнього середовища, тощо, знак якого, зазвичай, протилежний знаку сигналу керування). Дії впливів призводять до змін регульованої змінної.

Розглянемо вплив на рух системи керуючого і збурюючого впливів. Визначимо статичну (сталій режим, коли усі внутрішні параметри системи, похідні основної координати руху, дорівнюють нулю) помилку системи, представлену структурною схемою, на рисунку 1, в розомкнутому і замкнутому (пунктирний зв'язок) станах. Прийmemo зачення k_1 і k_2 – відповідно, коефіцієнти передачі регулятора і об'єкта керування, U – керуючий сигнал, z – вплив зовнішнього збурення, y – вихідний сигнал.

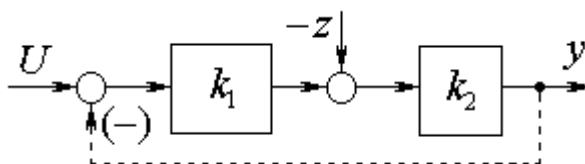


Рис. 1 Структурна схема статичної системи

Методами математичного аналізу визначимо помилку системи в розімкнутому стані (зворотний зв'язок відсутній) і замкнутому. Оскільки розглянута система є лінійною, то застосуємо до неї принцип суперпозиції. Визначимо вихідну змінну $y = y_0$ при $z = 0$ і $y = -\Delta y$ при $U = 0$ і запишемо загальні рівняння статичної системи.

1. Розімкнута система, зворотний зв'язок (пунктир) відсутній. Загальне рівняння:

$$y = y_0 - \Delta y = k_1 k_2 U - k_2 z \quad (1)$$

2. Замкнута система з негативним зворотним зв'язком.

$$y = y_0 - \Delta y = \frac{k_1 k_2}{1 + k_1 k_2} U - \frac{k_2}{1 + k_1 k_2} z \quad (2)$$

Представимо графічно отримані лінійні математичні залежності вихідного параметру від керуючого і зовнішнього впливу функцій графічно відповідно отриманим рівнянням $y = f(U)$ і $y = f(z)$. Кожному значенню впливу z_i що збурює відповідає статична помилка системи Δy_i , яка визначається зміною навантаження і іншими факторами, що діють на об'єкт. Аналіз рівнянь 1, 2 і відповідних їм графіків показує, що статична помилка замкнутої системи визначається величиною коефіцієнта передачі регулятора k_1 . Очевидно, що:

- 1) при $k_1 \rightarrow \infty \Delta y \rightarrow 0$;
- 2) статична помилка замкнутої системи менше, ніж у розімкнутої.

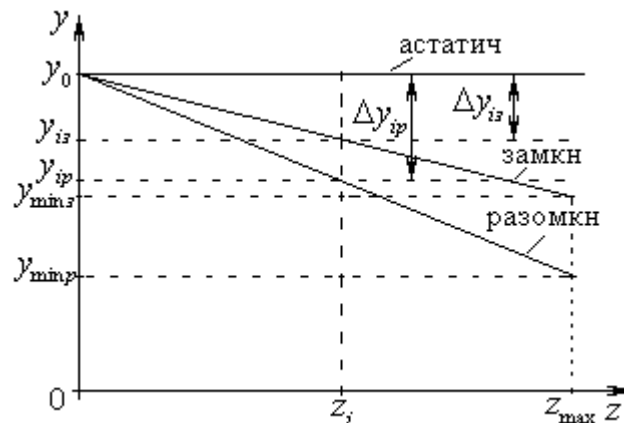


Рис. 2 Залежності статичної помилки системи від навантаження (графічна інтерпретація рівнянь 1 і 2).

Відносну зміну статичної помилки при зміні збурення (навантаження) від $z = 0$ до максимального значення z_{max} називають статизмом системи S .

$$S = \frac{y_0 - y_{min}}{y_0}$$

Проведений аналіз показує що в замкнутій системі статизм менший, ніж в розімкнутій і на величину статичної помилки впливає величина коефіцієнту підсилення регулятора.

1.2 Статичне і астатичне регулювання і його особливості

Регулювання і система називається статичними, якщо при прагненні значення впливу що збурює z до постійної величини відхилення Δy регульованої величини від y_0 також прагне до постійного значення, відмінного від нуля і залежного від величини впливу, що збурює.

$$\Delta y = \frac{k_2}{1 + k_1 k_2} z$$

Якщо при прагненні значення впливу що збурює до сталого значення відхилення регульованої величини відсутнє, $\Delta y = 0$ і не залежить від впливу z що збурює, то таке регулювання називають астатичним, а систему – астатичною.

Регулятором системи називають частину системи, яка знаходиться між об'єктом керування і чутливим елементом якій контролює і регулює параметр об'єкту. В якості чутливого елементу зазвичай застосовують блок арифметичного порівняння сигналів що відповідають заданому і отриманому на виході параметру об'єкту. Призначення регулятора зводити помилку регулювання до мінімуму, а краще до нуля.

Приклад 1. Визначимо помилку регулювання по збуренню в системі, що представлено на рис. 3.

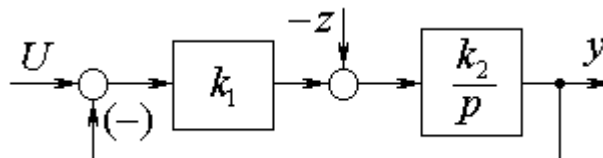


Рис. 3 Частково астатична система із пропорційним регулятором

В статичних системах основу регулятора складає пропорційна (безінерційна, підсилювальна) ланка, наприклад, k_1 , на рис. 3.

В сталому режимі похідні усіх динамічних параметрів дорівнюють нулю.

Якщо замість k_2 в рівнянні (2) підставимо інтегруючу ланку $\frac{k_2}{p}$, де оператор $p \rightarrow \frac{d}{dt}$, з урахуванням того, що $p = 0$, після перетворення, отримаємо:

$$y = y_0 - \Delta y = \frac{k_1 k_2}{p + k_1 k_2} U - \frac{k_2}{p + k_1 k_2} z = \frac{k_1 k_2}{0 + k_1 k_2} U - \frac{k_2}{0 + k_1 k_2} z = U - \frac{1}{k_1} z$$

Висновок: система, що представлено на рис. 3, є астатичною по керуючому впливу і статичною по впливу, що збурює. Це пояснюється наявністю інтегруючої ланки в колі зворотного зв'язку щодо керування, при цьому щодо збурення, така ланка відсутня. При цьому помилка системи прямо пропорційна величині впливу,

що збурює і обернено пропорційна коефіцієнту посилення регулятора k_1 : $\Delta y = -\frac{1}{k_1} z$

Приклад 2. Визначимо помилку регулювання по збуренню в системі, що представлено на рис. 4.

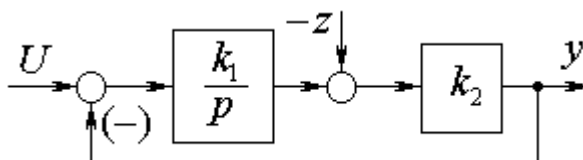


Рис. 4 Астатична система з інтегруючими властивостями регулятора

Після перетворень рівняння (2), з урахуванням того, що в сталому режимі усі похідні основної координати руху дорівнюють нулю, тобто $p = 0$, то отримаємо:

$$y = y_0 - \Delta y = \frac{k_1 k_2}{p + k_1 k_2} U - \frac{k_2 p}{p + k_1 k_2} z = \frac{k_1 k_2}{0 + k_1 k_2} U - \frac{k_2 0}{0 + k_1 k_2} z = U - 0 = U$$

Вихідний параметр y відповідає заданому значенню U , а помилка регулювання $\Delta y = 0$.

Висновок: система, що представлена на рис. 4, є астатичною як по керуючому, так і по зовнішнім впливам що збурюють. Це пояснюється наявністю в колі зворотного зв'язку в обох випадках інтегруючої ланки.

Таким чином, системи автоматики з інтегруючими властивостями регулятора є астатичними. Астатичні системи дають можливість отримання високої статичної точності, але в динаміці вони менш стійкі і схильні до коливань в перехідних режимах. Це пояснюється наявністю нульових коренів в характеристичних рівняннях астатичної системи, що призводить систему на грань стійкості і вимагає застосування коригувальних пристроїв, з метою компенсації інерційних властивостей від інтегруючої ланки.

1.3 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, які за амплітудою і по часу демпфірування, надають значно менший вплив, можна знехтувати.

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 зсувів, 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 детерміновані 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 фактором що має цікаве філософське значення є проблема між складним і спрощеним. Тобто як апроксимувати складний опис, щоб він бути спрощеним для практичного використання. На початку 20-го сторіччя 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 [11, 19, 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

ЯКІСТЬ І ТОЧНІСТЬ СИСТЕМ. ЇХ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК

2.1 Запас стійкості динамічної системи. 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 методам 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 $M = \text{const}$.

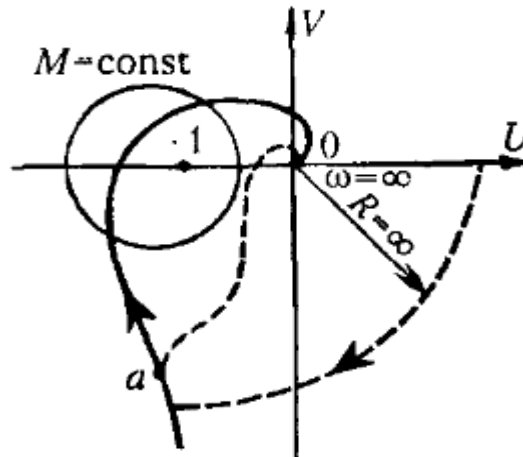


Рис. 2.1 АФХ розімкнутої системи з астатизмом 1-го порядку

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-го 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 MCAD діаграми перехідних процесів системи при параметрах коефіцієнта $K_u = 15$ і $K_v = 4$.

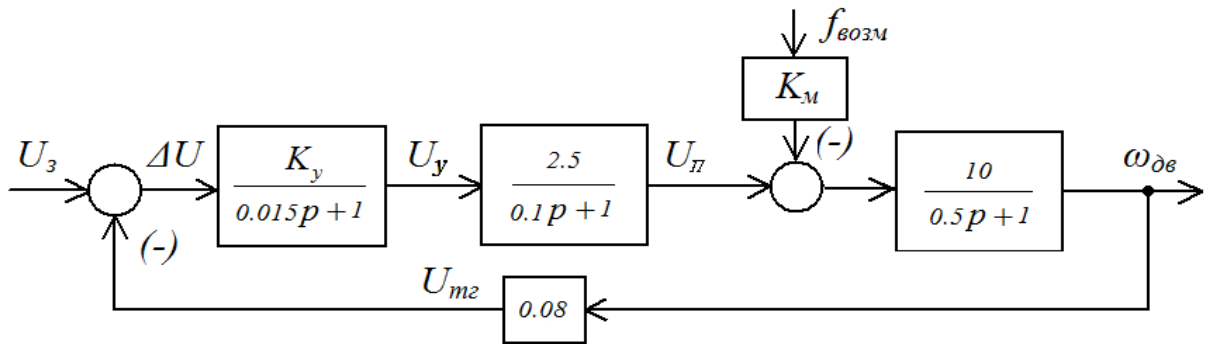


Рис. 2.2 Структурна схема замкнутої статичної системи. Позначені: U_3, f_{603M} , p - відповідно, керуючий, збурюючий впливи, оператор Лапласа

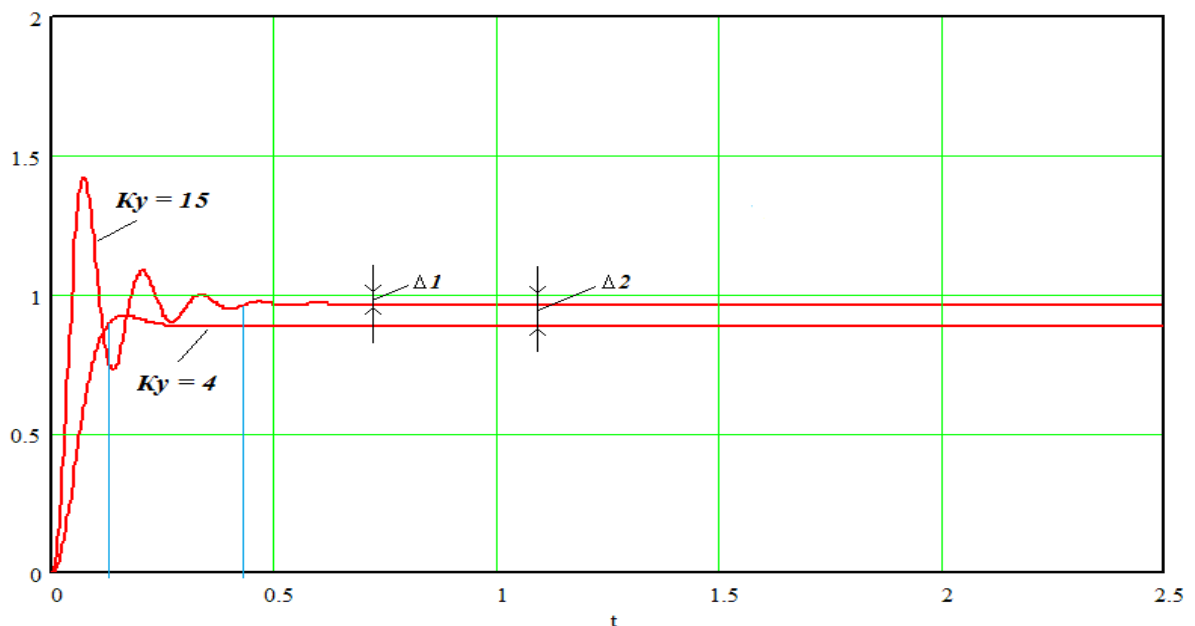


Рис. 2.3 Діаграми перехідних процесів замкнутої системи 3-го порядку і вплив K_y на статичну помилку системи. Параметри моделювання: $K_y=15$ і $K_y=4$. Позначені: $\Delta 1$ і $\Delta 2$ – статичні помилки регулювання

З отриманих діаграм видно, як впливає коефіцієнт підсилення K_y на динаміку системи і її точність. При коефіцієнті $K_y = 15$ динаміка процесу і швидкодія незадовільні, але відносно невелика статичної помилка $\Delta 1$. При $K_y = 4$ динаміка процесу і швидкодія задовільні, але значно збільшилась статична помилка $\Delta 2$.

Таким чином проблемою статичних систем високої точності є ефективне демпфірування коливань в системи, що знижує її швидкодю і керованість.

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. 2.4а) 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. 2.4а пунктиром. Як видно з цього графіку, деформованої характеристиці буде відповідати замкнута система, яка є не тільки стійкою, а також 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. 2.4б.

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.

$$\Psi = \arctg \omega T_1$$

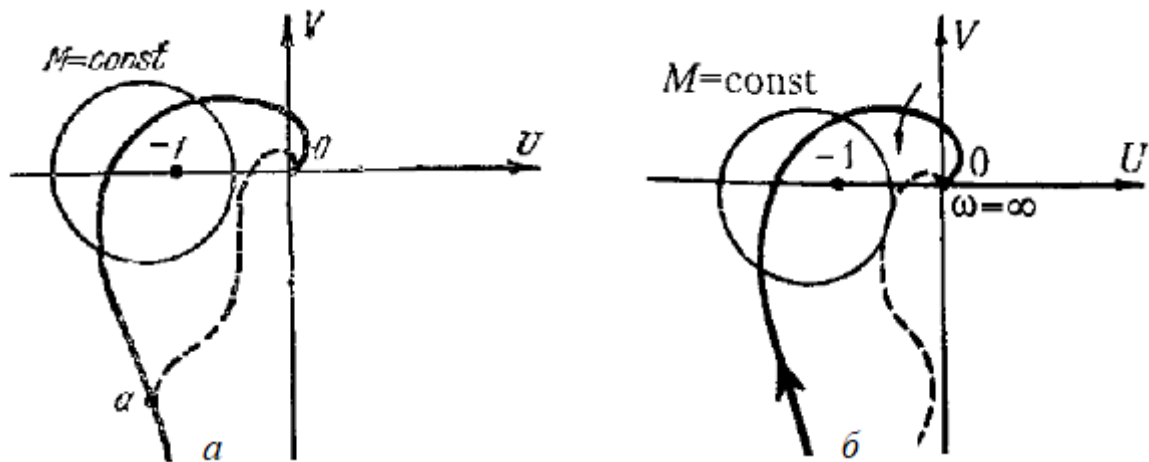


Рис. 2.4 АФХ з придушенням (а) і підняттям (б) високих частот

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» АФХ

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.

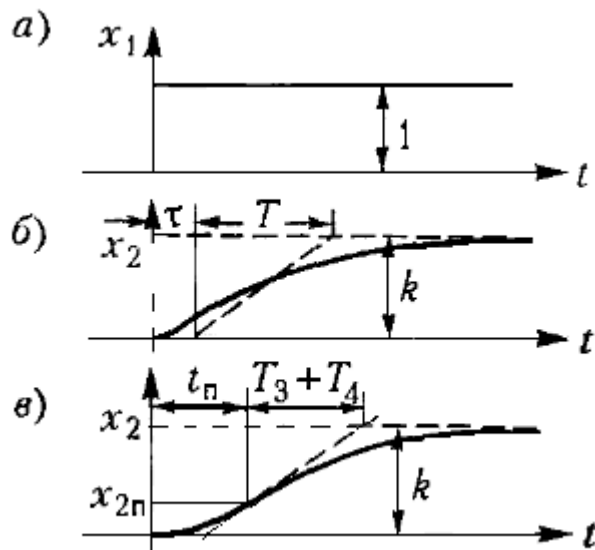


Рис. 2.5 Перехідні характеристики системи з коригуючими ланками запізнення (б), аперіодичною 2-го порядку (в).

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 аперіодичну ланку першого порядку з запізненням), взявши величини τ , T , k з експериментально отриманої кривої (рис. 2.5б).

Треба також зауважити, що така ж експериментальна крива згідно з графіком рис. 2.5 в може трактуватися і як часова характеристика звичайної аперіодичної ланки другого порядку з характеристичним рівнянням:

$$(T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1) = (T_3 p + 1)(T_4 p + 1) = 0$$

і відповідної передавальної функції.

$$W(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} = \frac{k}{(T_3 p + 1) \cdot (T_4 p + 1)}$$

Введення негативного фазового зсуву проводиться використанням послідовних коригувальних ланок фазозсувного типу. Оскільки подібні ланки

виявляються зазвичай немінимально-фазовими, то такий метод депфірування іноді називають методом з використанням немінимально-фазових ланок.

Демпфірування з використанням негативних фазових зсувів виявляється ефективним в разі наявності в каналі розімкнутої системи консервативних, а також коливальних ланок зі слабким демпфіруванням. У першому випадку це призводить до появи в АЧХ резонансних піків нескінченної висоти, а в другому - до резонансних піків кінцевої, але значної висоти.

Розглянуті тут методи демпфірування є основними, але лише ілюструють ті ідеї, які використовуються при підвищенні запасу стійкості. На практиці, в залежності від конкретних умов, можуть використовуватися і більш складні зміни динамічних властивостей системи управління. Так, наприклад, може здійснюватися придушення середніх частот з одночасним підняттям високих, підняття високих частот з придушенням їх деякої області, тобто фільтрація певних частот, тощо.

РОЗДІЛ 3

ДЕМПФИРУВАННЯ БАГАТООКООРДИНАТНИМ ВПЛИВОМ

3.1 Синтез оптимального керування

В попередніх розділах стосовно аналізу технічних рішень з розробки високоточних систем зроблені деякі висновки. А саме що: по-перше, точність статичних систем є природним компромісом між якістю і точністю, але вона при любых умовах не може бути нульовою. 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, 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].

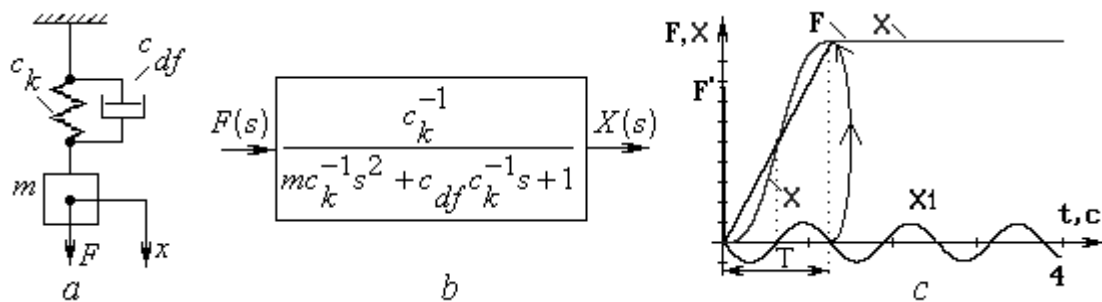


Рис. 3.1 Система з пружними властивостями (а), її математична модель – передавальна функція (b) і перехідні функції: x_1 – при дельта подібному, x – лінійно наростаючому керуючому впливі протягом періоду власних коливань системи (с).

Недоліком цих способів є обмежена область застосування, тому що вони не завжди 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,

підіймальними 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 привода.

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 нелінійного фільтра, що реалізує спосіб в пристрої, на рисунку 3.2.

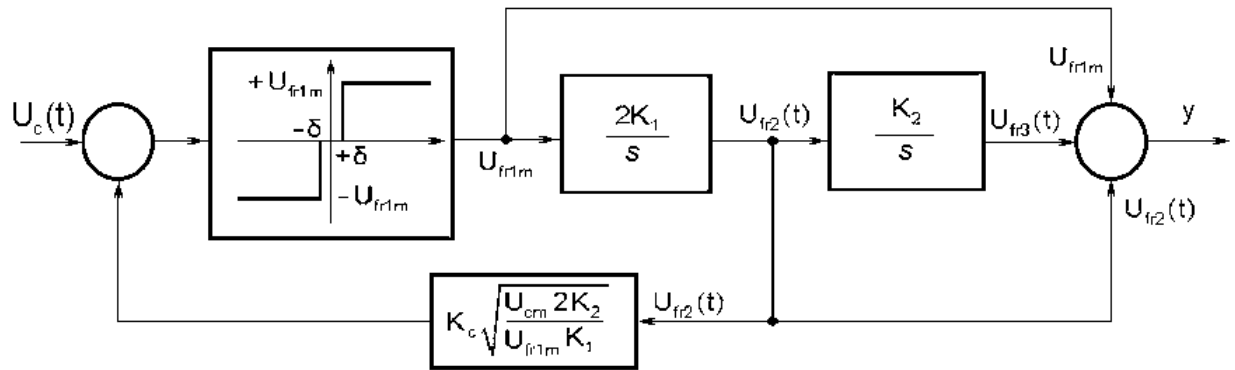


Рис. 3.2 Блок-схема нелінійного фільтра, що реалізує спосіб в пристрої.

$K_1 = f(\alpha)$, $K_2 = f(\alpha, \omega)$ – 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; $s \rightarrow \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа (символізує операцію диференціювання) $y = \sum U_{fri}$ – вихідний сигнал як сукупність його складових змінних

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 демпфірувати 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.

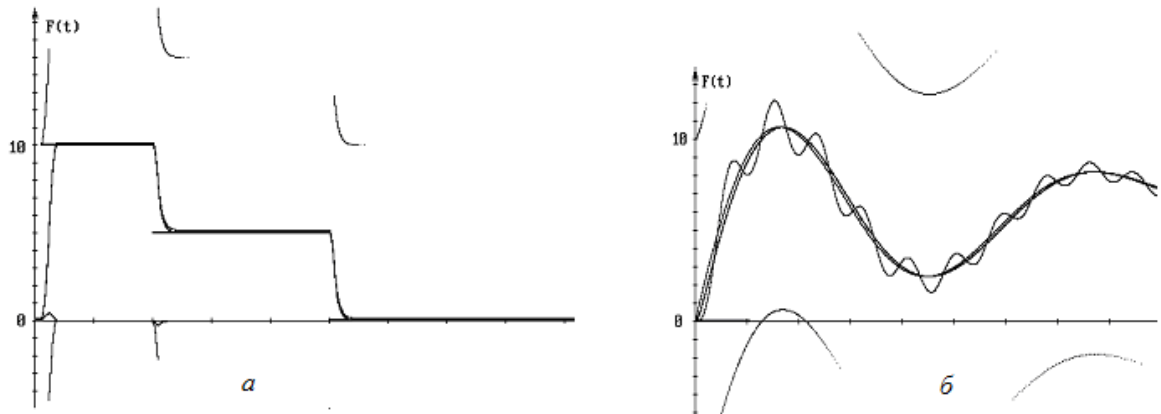


Рис. 3.3 Перехідні характеристики пружних зусиль, при ступінчастій (а) і плавній зміні (б) керуючого впливу. Позначені: ω , α , U_{fr} , U_{fn} , F_n^0 , F_n – частота, ступень демпфірування, закон впливу і його функції-координати, пружні зусилля: без застосування способу і з ним

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

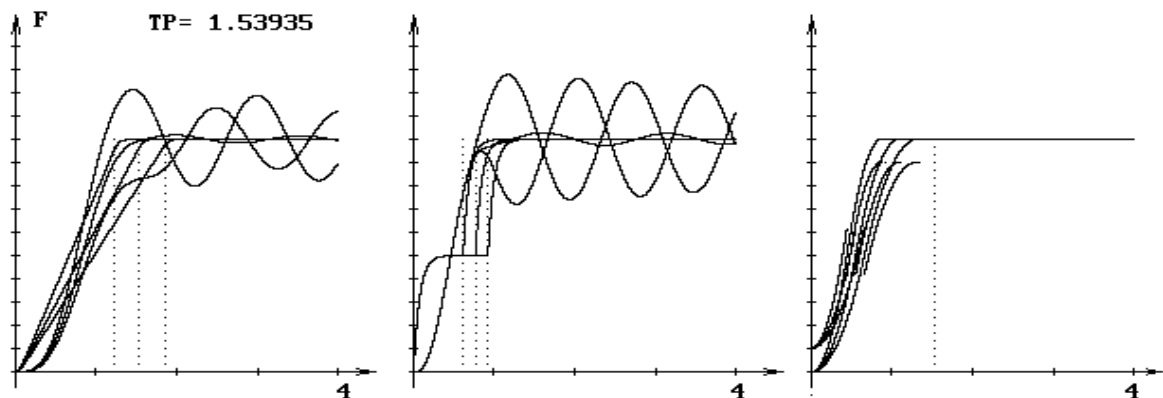


Рис. 3.4. Порівняння якісних показників динаміки процесу при використанні способів впливу: лінійного (*a*), двоступінчастого (*b*), багатокординатного (*в*), при відхиленні частотних параметрів на $\pm 20\%$. Позначені: T , ω , U_{fr} , F_n – період, частота, закон впливу і пружні зусилля в системі

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

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 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.

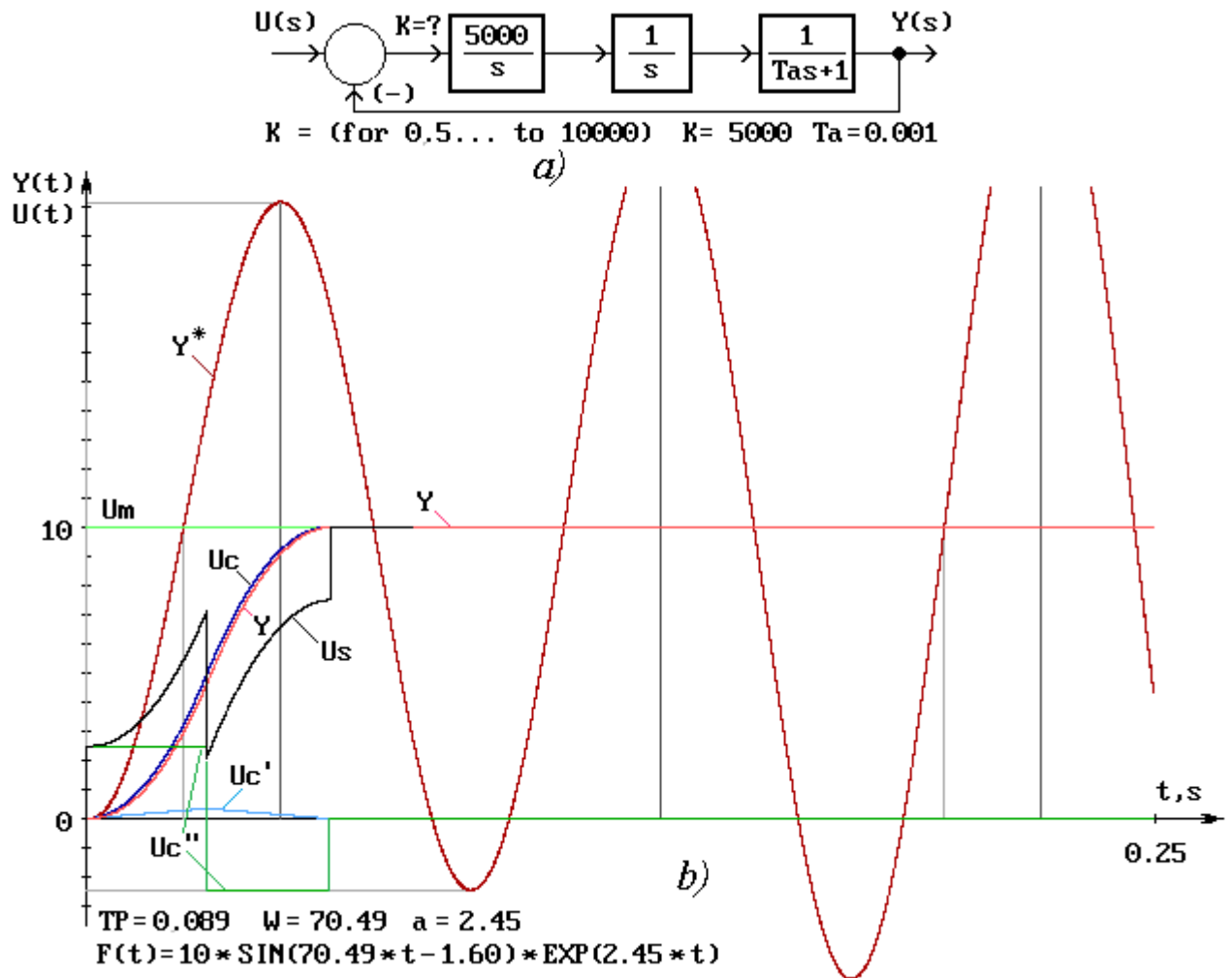


Рис. 3.5 - Система 3-го порядку з астатизмом 2-го порядку: *a)* структурна схема системи; *b)* діаграми перехідних процесів, без застосування Y^* і з застосуванням Y способу багатокординатного керування.

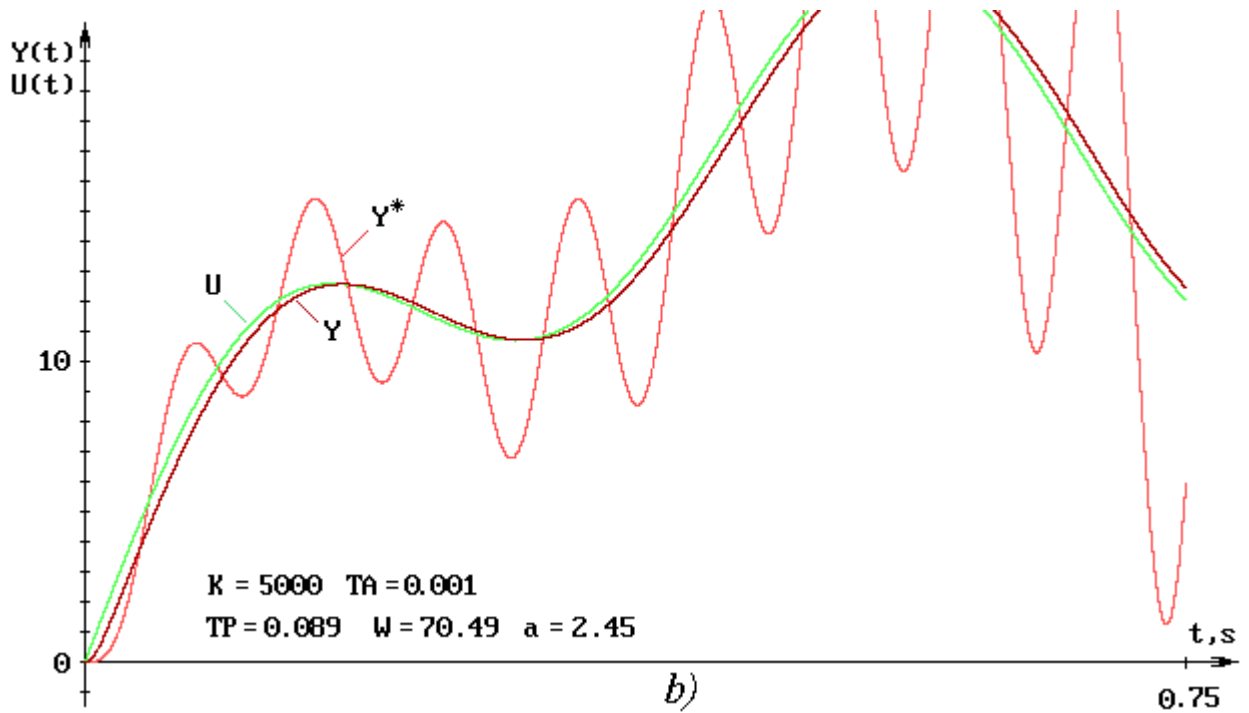


Рис. 3.6 - Діаграми динамічних властивостей системи, представленої на рисунку 3.5а: а) при змінних по знаку і величині східчастих керуючих впливах, б) при плавно мінливої керуючої дії.

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).

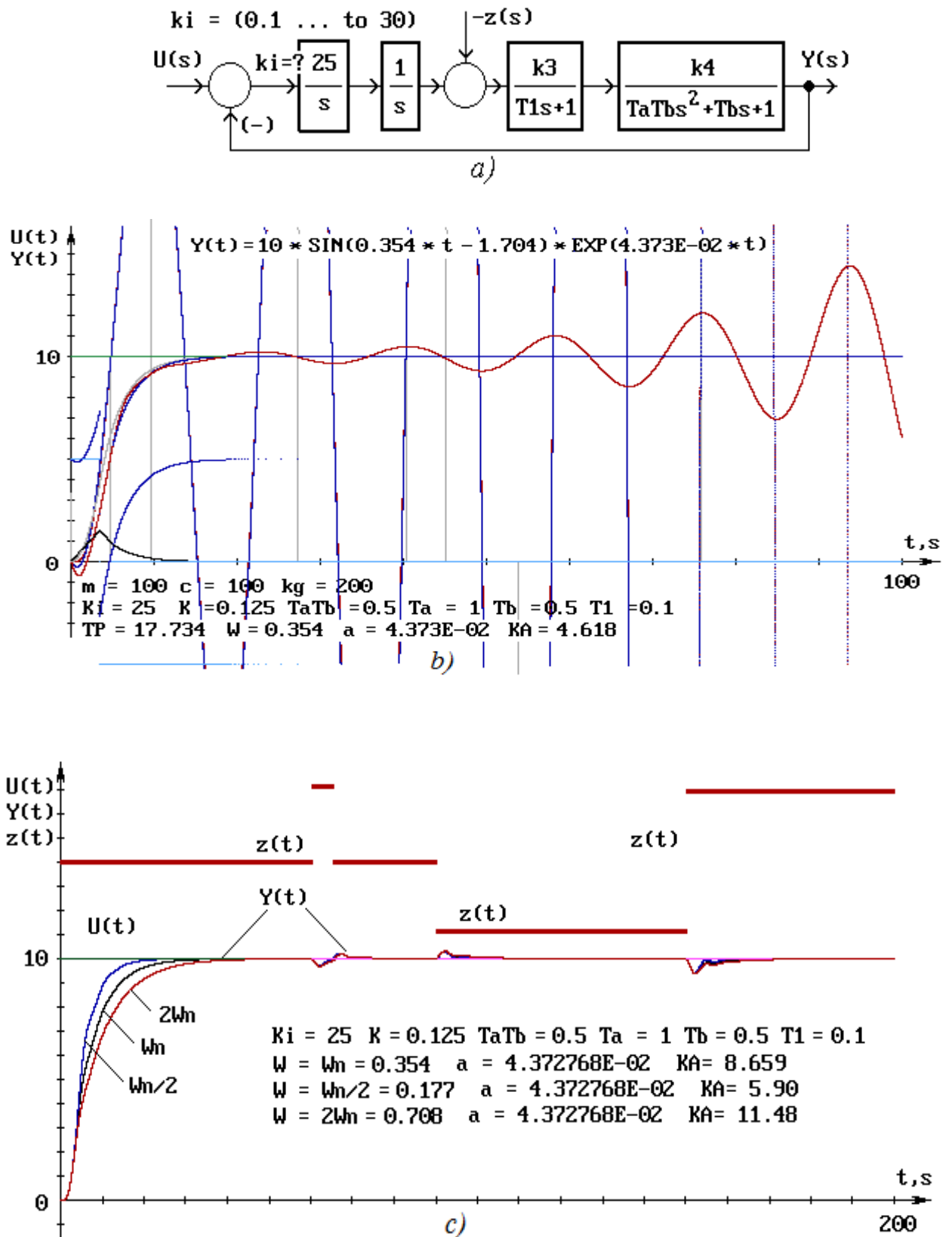


Рис. 3.7 – Моделювання способу керування для оцінки якості і точності системи: а) структурна схема системи, що моделюється (порядок інерційності - 5-й, астатизма - 2-й) з керуючими - $U(t)$ і збурюючими - $z(t)$ впливами; б) - перехідні характеристики системи в розімкнутому стані; в) - перехідні

характеристики в умовах ступеневої зовнішнього впливу z при дворазових відхиленнях розрахункової частоти системи від номінальної.

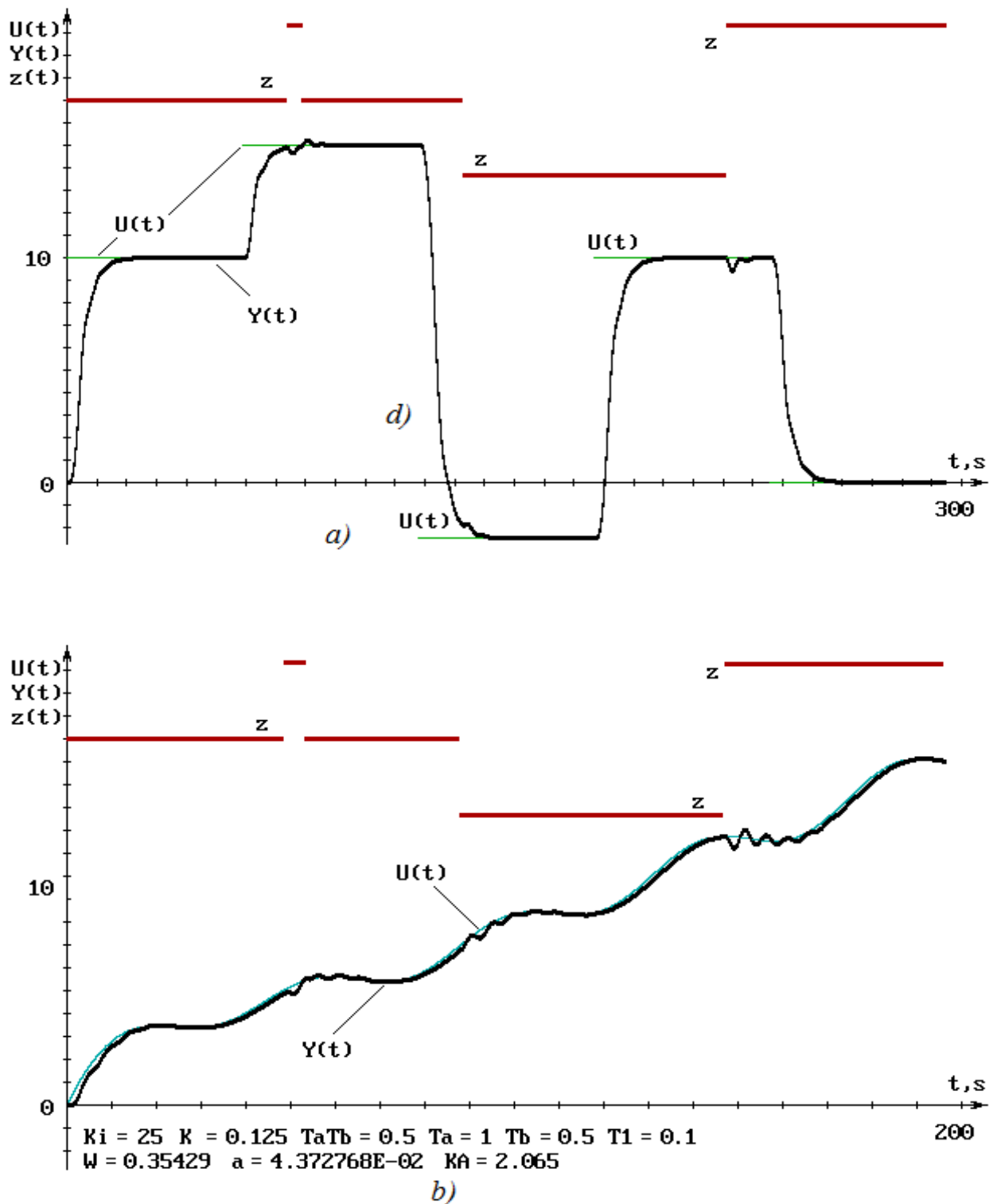


Рис. 3.8 – Перехідні характеристики системи 5-го порядку інерційності з 2-м порядком астатизма при зовнішніх впливах $z(t)$ і довільно змінюється функцією керування $U(t)$: а) - поступово; б) - плавно.

Проведені комп'ютерні моделювання показали що Метод багатокординатного керування ефективно і оптимально демпфірує систему. Це забезпечується за рахунок наступних технічних рішень [13, 14]:

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 збуренню 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 електромеханічними системами на прикладах систем автоматично регульованого запобіжного гальмування підймальних установок глибоких шахт, а також структурно не стійких високоточних астатичних систем з порядком астатизму 2 і вище.

2. На підставі аналітичних і експериментальних досліджень з урахуванням інерційних властивостей і систем розроблені описи і моделі систем, визначені і досліджені методи їх апроксимації для практичної розробки ефективних технічних пристроїв з заданими параметрами характеристик необхідних для динамічних режимів роботи обладнання по якості і точності.

3. Дані технічні рішення можуть бути корисними при створенні сучасних керувань високошвидкісними і якісними по динамічним властивостям системам.

4. За результати досліджень з'ясована зручність сучасних методів структурного моделювання і простору станів системи для синтезу керувань складними системами з інерційними елементами різної фізичної природи [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В.Солодовников, В.Н.Плотников, А.В.Яковлев. // – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
2. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах». М.: Высш. шк., 1989. — 263 с: ил.
3. Чермалых В. М. Исследование сложных электромеханических систем. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
4. Бесекерский В.Л., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е.П. Попов. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — СПб, Изд-во «Профессия», 2003. - 752 с. - (Серия: Специалист).
5. Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. // – 12th ed. – 2011. – 1082 p.
6. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых само-летов. Под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Наука, Физматлит, 1998, с. 555.
7. Кузовков Н.Г. Системы стабилизации летательных аппаратов / Н.Г. Кузовков // М.: Высш. шк., 1976. 304 с.
8. 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> .
9. Спосіб гальмування шахтної підйимальної установки. Патент України на винахід UA114179 / В.І.Васильєв, Є.В.Васильєв // – Київ.:ДП “УІВ” (Укрпатент), опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.
10. 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.

11. 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.
12. Васильев, В.І. Дослідження способів оптимального керування динамічними системами. [Текст] / В.І. Васильев, Є.В. Васильев // 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
13. Васильев В.И. Оптимальное управление сложными динамическими системами / В.И. Васильев, Е.В. Васильев // 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
14. 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
15. Васильев В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок / В.И. Васильев // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.
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. Patent CA2566001. Method for controlling application of brakes in single drum hoist systems. (Патент Канади “Спосіб керування гальмуванням в одинарних шахтних підіймальних системах”)

<http://brevets-patents.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/2566001/summary.html>

19. Васильєв В.І. Обґрунтування раціональних динамічних параметрів запобіжного гальмування шахтних підіймальних 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.

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

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

22. 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>

23. Ломонос А.І. Расконін О.Т. Дослідження замкнених систем керування електромеханічним обладнанням. Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. Вип. 4/2010 (63) стор. 44-48.

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