

Академія наук України  
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

**БОЙЧУК** Леонід Михайлович

УДК 658.562.3

**КООРДИНУЮЧЕ КЕРУВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ  
І ПРИРОДНИХ СИСТЕМАХ**

01.01.11 — системний аналіз і автоматичне керування

Дисертація на здобуття ученого ступеня  
доктора технічних наук  
у формі наукової доповіді

Київ 1992

Робота виконана в Інсти-  
това АН України.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00820016 (H)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
БАКАН Г. М.,

доктор технічних наук,  
професор ГОСТЄВ В. І.,

доктор технічних наук,  
професор ІГНАТЬЄВ М. Б.

Провідна організація: Харківський політехнічний інститут  
Міністерства освіти України.

Захист відбудеться « 4 » \_\_\_\_\_ 19 93 р. о \_\_\_\_\_  
годині на засіданні спеціалізованої ради Д. 016.45.04 при  
Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова АН України за  
адресою:

252207 Київ 207, просп. Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічному  
архіві інституту.

Дисертація розіслана « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 19 \_\_\_\_\_ р.

Учений секретар  
спеціалізованої ради

ЛННБ ім. В. Стефаника  
АН УРСР

ГУБАРЄВ В. Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Робота присвячена багатовимірним автоматичним системам для динамічної координації об'єктів за допомогою регулювання співвідношень між їх вихідними величинами. Ці системи не потребують зовнішніх командних сигналів, а за своїми властивостями подібні до природних і економічних систем балансового типу. В роботі вперше проведено комплексне теоретичне дослідження /синтез і аналіз/ таких систем.

Актуальність проблеми. Для багатьох динамічних керованих об'єктів треба забезпечити у перехідних режимах узгоджену зміну /координацію/ їх вихідних величин. Тоді мету керування подають у вигляді співвідношень між цими величинами, у той час як у системах стабілізації або слідкуючого регулювання метою керування є командні сигнали /завдання/ для кожної з цих вихідних величин. Однак якість продукції і надійність функціонування технологічних процесів часто безпосередньо залежать від дотримання співвідношень між регульованими величинами. Наприклад, в багатодвигунових лініях для обробки матеріалів синхронізують швидкості обертання виконавчих приводів, тому що при розузгодженні цих швидкостей погіршується структура матеріалу, утворюються "петлі" або розриви. Аналогічні вимоги виникають при керуванні крановими і шлюзовими механізмами, коли треба уникнути перекосів і заклинювання; при автоматичному дозуванні речовин, коли порушення відповідних пропорцій може призвести до не/сувних наслідків; при паралельній роботі двигунів і генераторів; при керуванні рухом тіл на траєкторії або їх стросм, коли треба забезпечити дистанції безпеки, і т.п. Процеси в координуючих системах керування, які є вельми специфічними і малодослідженими, близькі до процесів у природних і економічних системах. Ця аналогія виявляється в динамічних і статичних властивостях таких систем, перш за все - у можливості їх стабілізації без використання задатчиків /ефект саморегулювання, або гомеостатизму/.

Зв'яз немає достатньої теоретичної і методологічної основи, що необхідна для побудови прикладних координуючих систем. Багатовимірне керування звичайно синтезують, виходячи з принципу відпрацювання командних сигналів, що задаються для кожного з об'єктів. Але тоді в перехідних режимах, наприклад, якщо зворнення діє тільки на один з керованих об'єктів, співвідношення

між їх вихідними величинами можуть сильно відрізнятись від потрібних. Методи дослідження процесів координації в природних системах розроблені недостатньо, що в певній мірі не дозволяє підвищити ефективність довгострокового прогнозування таких систем і керування ними.

Стан проблеми. Координуючі системи створювались починаючи з 30-40-х рр. для регулювання співвідношень різного типу, наприклад "пальне-повітря" в енергоустановках, для розподілу навантажень генераторів і двигунів, для автоматичного дозування і т.п. /праці Є.П.Карпіна, Ту Сюй-Яня, Є.В.Зайцевої, В.Т.Морозовського, О.С.Соболева та ін./. Ідея координації як регулювання співвідношень була потім розвинута при побудові систем комплексної автоматизації /праці В.А.Романова, Б.Г.Волика, О.М.Костюка та ін./ і систем керування зі змінною структурою /праці С.В.Смелянова, Є.І.Герещенка, В.І.Уткіна, А.А.Колеснікова та ін./. Починаючи з 40-50-х рр. досліджують близькі за принципом дії системи програмного керування верстатами і рухом на траєкторії, що призвело до формування загальної задачі керування рухом на многовидях, які представлені у просторі вихідних величин об'єктів /праці М.П.Єругіна, А.С.Галіулліна та його школи, В.І.Зубова, М.Б.Ігнат'єва, О.І.Кухтенка, Ю.В.Крементула, А.В.Ушакова, І.В.Мирошнік, Г.М. Бакана та ін./. Але відомі методи такого керування не розповсюджені на важливі задачі координації типу багаторівневих і, головне, не враховують специфіку автоматичного керування, зокрема, вимогу астаtizму /незалежності від збурень в усталеному режимі/, неповноту інформації про об'єкт, необхідність використання у першу чергу стандартних регуляторів і т.п. Треба зазначити також, що вивчення координації як процесу керування без задатчиків ідейно наближається до відомих праць щодо регуляторів довжини електричної дуги /М.В.Чиколєв/, асинхронного двигуна без вимірювання швидкості його обертання /О.Г.Івахненко/ та ін. При використанні цих регуляторів стабілізація досягається за рахунок регулювання співвідношень між вимірюваними величинами /струмом і напругою/.

У 1963 р. М.Б.Ігнат'єв уперше визначив системи з метою керування у вигляді многочлєнів як узагальнення систем стабілізації і як самостійний клас автоматичних систем саморегульованого типу, причому що особливість він якісно пов'язав із своє-

рідністю означеної мети керування. Така ж за змістом мета функціонування притаманна природним і економічним системам. Однак вивчення механізмів саморегулювання і динаміки природних систем, що виконано, наприклад, В.М.Новосальцевим, Ю.М.Свиревим, О.М.Тарко, Є.А.Уматовим, В.Г.Ільїчовим, Л.О.Мироновським, В.Б.Георгієвським, Ю.М.Горським, В.Г.Горшковим та ін., потребує дальшого розвитку, перш за все - у плані визначення відповідних аналітичних умов і виникаючих системних ефектів.

В США теоретичних досліджень аналогічної спрямованості, за наявними даними, немає. Тільки нещодавно, у 1987 р., в одному з американських оглядів з автоматизації виробничих процесів відмічено, що задача регулювання співвідношень є найстарішою з досі актуальних прикладних задач, яка теоретично зовсім не розроблена. Наведений нижче виклад, на думку автора, в достатній мірі спростовує такий висновок американських спеціалістів.

Мета і задачі дослідження. Головна мета полягає у створенні теоретичних основ координації як самостійного засобу автоматичного керування, що потребує розв'язку таких задач:

1. Розробити загальні методи синтезу координуючого керування /для довільного числа регульованих співвідношень і для різних видів підпорядкування процесів їх відпрацювання/ і методи узгодження процесів координації і стабілізації.

2. Розробити методи аналізу систем координуючого керування і природних систем як багатозв'язних динамічних систем саморегульованого типу без задатчиків і визначити принципові особливості цих систем.

3. Виділити важливі у прикладному відношенні види технічних систем координуючого керування і створити спеціалізовані методи їх синтезу.

Наукова новизна проведеного дослідження координації як засобу автоматичного керування без задатчиків і як важливої особливості саморегульованих природних процесів полягає ось в чому.

1. Задача координації як задача регулювання співвідношень між вихідними величинами динамічних об'єктів вперше розглянута комплексно, тобто з точки зору як процедури синтезу, так і властивостей одержуваних замкнених систем.

2. Запропоновано загальний підхід до синтезу координуючих систем. Він полягає у проактивному перетворенні вектора

стабілізуючого керування, що формують за допомогою ПД-регуляторів, причому матриця зазначеного перетворення залежить як від заданих співвідношень, так і від налагоджувальних параметрів. Такий підхід не тільки забезпечує стійкий рух по відповідному многовиду, але також враховує вказану вище специфіку автоматичного керування. При цьому неідентичність і вихідна взаємозв'язаність об'єктів можуть у ряді випадків позитивно впливати на стійкість. У той же час для синтезу традиційних систем стабілізації характерною є протилежна тенденція, що пов'язана з динамічним "розв'язанням" і симетриюванням об'єктів.

3. Визначені і досліджені особливості процесів координації і пов'язані з ними системні ефекти /зменшення порядку характеристичного полінома, наявність інтегральних інваріантів, "усереднення" і "розподіл" рухів, негативне перерегулювання, статична і стаціонарна рівноваги, "магістральний" рух і т.п./.

Уперше одержане загальне рівняння статистики таких систем, що раніш, за думкою Р.Баллмана, вважалося неможливим. Виходячи з цього рівняння, визначені аналітичні умови саморегулювання /гомеостатизму/.

4. Поставлена і розв'язана нова задача-багаторівневої координації /при структурній і структурно-часовій підпорядкованості процесів відпрацювання розузгоджень окремих груп співвідношень/.

5. Установлено такі два принципових положення: а/процеси координації, що мають місце в технічних і природних системах, мають певну подібність, яка виявляється перш за все у балансі змінних /інтегральних інваріантах/; б/ наявність цього балансу є основною причиною саморегулювання /гомеостатизму/. В координуючих системах указаний баланс являє інформаційний закон зберігання, що обумовлений тільки структурою прийнятого закону керування і не залежить від виду регульованих співвідношень. У природних системах такий баланс зумовлений законами зберігання, наприклад, маси, і призводить до підтримання певних співвідношень між змінними.

Проведена робота належить до того напрямку в кібернетиці, що був започаткований П.К.Анохіним, а ще раніш - Я.Грдиною та ін. Головною ознакою цього напрямку є визнання саме

функціонального /координуючого/ керування, а не керування за відхиленням від командних сигналів основю регульованих процесів в природних і живих системах.

Практична значущість роботи полягає в тому, що вона дозволяє підійти до побудови систем керування з нових методологічних позицій, використовуючи регулювання співвідношень між вихідними величинами об'єктів. Конкретні досягнення у цьому напрямку такі:

1. Розроблена загальна схема координуючого керування, яка включає в себе стандартну схему ПІД - регулювання і має порівняно велику кількість налагоджувальних параметрів. Розв'язана задача структурного узгодження систем координації і діючих систем стабілізації.

2. Показана еквівалентність законів координуючого керування з безпосереднім вимірюванням розузгоджень співвідношень і з усередненням вихідних величин об'єктів, а також визначені структурні умови координованості об'єктів.

3. Запропонована загальна схема багаторівневого координуючого керування, що являє собою спеціальне багатовимірне перетворення однорівневих схем для окремих груп співвідношень, причому врахована необхідність "розподілу" у часі процесів відпрацювання розузгоджень для цих груп.

4. Синтезовано дворівневий закон координуючого керування при стабілізуючій корекції динамічних об'єктів і визначені оптимальні значення налагоджувального параметра - "ваги" другого рівня керування. На основі такого закону розроблені принципові схеми, що потрібні для розв'язання різних технічних задач: синхронізація об'єктів і узгодження їх положення у просторі; динамічна корекція діючих систем стабілізації, у тому числі без вимірювання похідних; генерування регульованих коливань; оптимізація функцій за наявності обмежень та ін.

5. Для дослідження процесів у природних і економічних системах запропоновано використати розроблені методи аналізу однорівневих систем координуючого керування, зважаючи на те, що вони є багатовимірними динамічними системами одного і того ж типу, а саме-балансовими.

Організація досліджень і реалізація їх результатів. Теоретичне вирішення задачі координації як загальної задачі ав-

томатичного регулювання співвідношень розпочато за ініціативою автора у 1965 р. Безпосереднім поштовхом до цього стала книга М.Б.Ігнат'єва "Голономные автоматические системы" /1963/. Вказана тематика до останнього часу не включалася у плани наукових досліджень, що складалися директивними органами, і не фінансувалася.

У 1992 р. робота щодо синтезу координуючого керування складними технологічними процесами зперше включена до Державної науково-технічної програми України 6.4.2 "Інтелектуальні системи автоматизації керування виробничими комплексами та технологіями". Раніш технічні задачі координації вирішувались автором, починаючи з 1977 р., згідно з догочором про науково-технічне співробітництво /на громадських засадах/ між Інститутом "УкрНДІпластмаш" /м.Київ/, а потім - згідно з загальним догочором про таке ж співробітництво між Мінхіммашем СРСР та АН УРСР, що сформульований у їх спільному наказі за № 58/02 від 11.02.86. В результаті цих робіт одержані нові схеми регулювання співвідношень між швидкостями обертання виконавчих приводів багатодвигунових технологічних ліній для виробництва полімерних плівок. Але головний підсумок таких досліджень полягає у з'ясуванні принципних особливостей координації як засобу автоматичного керування і у визначенні загальної структури керування. Запропоновані схемні рішення захищені 6 авторськими свідоцтвами на винаходи. Крім того, запропонований підхід до синтезу використано при пошуковій розробці перспективної системи керування геліостатами сонячної електростанції. Ця робота виконувалась за госпдогочорами № 723-87 та № 870-88 з Енергетичним інститутом ім.Г.М.Крижановського Міненерго СРСР.

Другий напрям прикладних досліджень пов'язаний з вирішенням задач оптимізації за наявності обмежень як задач дворівневої координації. Відповідний підхід застосовано для створення обчислювальних програм при виконанні науково-дослідної теми 8/79 "Розробити методи багатокритеріального автоматизованого керування каскадом Дніпровських водосховищ", що виконувалась згідно з Постановою РМ УРСР № 132 за 1975 рік /з Державної реєстрації 76072623/.

Основні тези, що виносяться на захист:

1. Синтез координуючого керування як засобу автоматичного регулювання співвідношень між вихідними величинами динамічних об'єктів доцільно провадити на основі проєктивного багатомірнього перетворення вектора керування, який формується за допомогою стандартних ПІД-регуляторів.

2. Синтез багаторівневого координуючого керування /при структурній і структурно-часовій підпорядкованості відпрацювання розузгоджень заданих груп співвідношень/ належить робити на основі "розщеплення" до відповідних підпросторах указанного оператора перетворення, а для узгодження процесів координації і стабілізації необхідно використовувати дворівневі системи з часовим підпорядкуванням виділених рівнів керування.

3. Динамічні і статичні особливості координуючих систем є нехарактерними для традиційних систем стабілізації і слідуючого керування, але вони є близькими до аналогічних особливостей природних і економічних систем балансового типу. Всі ці системи доцільно аналізувати на базі єдиної математичної моделі, що описується диференціальними рівняннями, розв'язки яких відрізняються наявністю інтегральних інваріантів.

Апробація роботи. Дослідження автора у розробці принципів і методів координуючого керування представлені в матеріалах Симпозіуму ІФАН з теорії і застосування багатозв'язних систем керування /Манчестер, Англія, 1977/ і доповідалися на таких Всесоюзних зібраннях: з багатозв'язних систем керування /Суздаль, 1990/; з теорії інваріантності та її використання в автоматичних системах /Москва, 1982/; з розв'язання екстремальних задач та їх використання /Горький, 1971/; з декомпозиції в складних системах /Челябінськ, 1986/; з штучного інтелекту /Мінськ, 1990/; з синтезу систем керування /Новосибірськ, 1991/, а також доповідалися на таких семінарах: Наукової ради АН України з проблеми "Кібернетика" /Київ/ - Теорія автоматичного керування /1967-1977/, Самоорганізація кібернетичних систем /1971-1991/, Адаптивні системи керування /1971/, Питання теорії роботів та штучного інтелекту /1978/; кафедри автоматки і телемеханіки Ленінградського інституту точної механіки і оптики /1978/; кафедри теоретичної механіки Університету дружби народів ім. П. Лумумби /Москва, 1978/; Північно-Кавказького Наукового центру Вищої школи "Питання теорії і принципи побудови

автоматичних систем керування технологічними процесами" /Таганрог, 1980/; кафедри автоматики і телемеханіки Новосибірського електротехнічного інституту /1989/; автоматизованого проектування електротехнічних пристроїв /Челябінськ, 1981/; з проблем надлишковості в інформаційних системах /Ленінград, 1983, 1986/; з прикладних проблем керування макросистемами /Тамбов, 1987/; з кібернетики електроенергетичних систем /Челябінськ, 1990/.

За ініціативою Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова АН України та Харківського політехнічного інституту була скликана Всесоюзна науково-технічна конференція "Координуюче керування в технічних і природних системах" /м.Алушта, Крим, 1991/, де вперше на міжреспубліканському рівні обговорювались питання, що безпосередньо пов'язані з темою дисертації. В рішенні конференції відмічені актуальність і перспективність досліджень з розглянутих на ній питань, а головне - новизна і єдність підходу, що базуються на принципі координації, до виччення процесів у складних технічних і природних системах.

Публікації і розвиток досліджень. Усього автор опублікував 115 праць з питань, що пов'язані з темою дисертації. В 42-х з них викладені принципові питання координації. Праці [1-30], що написані у 1965-1987 р.р., присвячені формуванню проєктивного принципу синтезу багатомірного керування. При цьому рівняння об'єктів вважалися відомими з достатньою точністю. З 1987 р. автор досліджує аналогію між координуючими системами керування і природними системами, що було викликано необхідністю подолання деяких протиріч при аналізі динаміки синтезованих систем керування [31, 35], і виділив спеціальний клас багатозв'язних динамічних систем - балансових.

В подальшому автор поєднав вказаний вище проєктивний принцип, що був одночасно запропонований також за кордоном для синтезу багатомірного керування, з відомим принципом ПІД-регулювання. Крім того, до методології синтезу був включений принцип структурного і параметричного "розмаїття" координованих об'єктів, що впливає із встановленої автором аналогії технічних і природних систем. Це дозволило врахувати при синтезі координуючих систем специфіку автоматичного керування, перш за все - необхідність компенсації неконтрольованих збурень і ва-

рівняння параметрів об'єктів.

Основний зміст дисертації відображений у монографії автора [35], що являє собою першу узагальнюючу публікацію з проблемами динамічної координації як у нас в країні, так і за кордоном, а також у статтях [26, 36-39, 41] з систем балансового типу. Праці [11, 12, 23, 32, 40] присвячені вирішенню алгоритмічних задач координації. У спільно виконаних працях [17-19, 24, 25, 28, 29] автору належить принцип побудови загального закону координуючого керування, а в працях [33, 34] - постановка задачі дослідження та принцип її вирішення.

### КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

I. Однорічявні координуючі системи визначають головні особливості досліджуваного класу систем, причому на відміну від традиційних автоматичних систем вони можуть бути стабілізовані без зовнішніх командних сигналів.

I.I. Основна постановка задачі синтезу та її вирішення. Керований об'єкт є багатоканальним. Кількість його вихідних величин дорівнює кількості його керуючих впливів. В схемах стабілізації і слідуючого регулювання /рис. I.I, а/ мета керування таким об'єктом зводиться до рівності командних впливів /вектор  $Y$ / вихідним величинам /вектор  $X$ /. При координації мета керування інша. Вона визначається тільки вихідними величинами і являє собою регульовані співвідношення між ними:

$$y = A^* x - b = 0, \quad \dim A^* = m \times n, \quad \text{rang } A^* = m < n, \quad (I.I)$$

причому кількість співвідношень  $m$  менша, ніж кількість змінних  $n$ . Відомі схеми координуючого керування /рис. I.I, б/ реалізують негативний зворотний зв'язок за розузгодженнями співвідношень, який звичайно синтезують, виходячи з повної інформації про об'єкти. При цьому, як правило, не усувається вплив неконтрольованих збурень в усталеному режимі, тобто не забезпечується астатизм системи.

Запропонований підхід до синтезу координуючого керування забезпечує потрібні якості системи, що синтезується, за рахунок двох основних факторів. По-перше, створюється ночий багатовимірний об'єкт /з підключеними ПІД-регуляторами/, який описується рівнянням

$$x(\rho) = [W_0(\rho)/\rho] u(\rho) + f(\rho), \quad \rho \triangleq d/dt, \quad (I.2)$$

де  $f$  - вектор зовнішніх збурень, що приєданий до входу об'єкта. По-друге, вектор керування цим об'єктом формується як спеціальне лінійне багаточимірне перетворення вектора похибок регулювання /стабілізаційних/. Тоді маємо

$$u(p) = H\varphi(p), \quad \varphi(p) = \Psi - x(p), \quad H = C(A^T C)^{-1} A^T, \quad (1.3)$$

де  $H$  - матриця "косого" проєктування, що залежить від налагоджувальної матриці  $C$  того ж розміру, що і матриця коефіцієнтів рівняння (1.1), причому  $\|A^T C\| \neq 0$ . Цей закон керування можна представити як явну функцію розузгоджень співвідношень:

$$u(p) = -K y(p), \quad K = C(A^T C)^{-1}, \quad y(p) = A^T \varphi(p), \quad (1.4)$$

тобто керування (1.3) дійсно реалізує негативний зворотний зв'язок за цими розузгодженнями. Крім того, закон керування (1.3) можна записати ще в одній еквівалентній формі, яка є раціональною при відносно великій кількості співвідношень:

$$u(p) = \varphi(p) - P\varphi(p), \quad P = E - H = A_0 (C_0^T A_0)^{-1} C_0^T, \quad (1.5)$$

де  $P$  - доповнююча проєкційна матриця, причому  $C_0^T C_0 = 0$ ,  $A_0^T A_0 \neq 0$ . Для всіх наведених законів вектор керування являє собою неортогональну проєкцію вектора похибок регулювання на підпростір, що визначається вказаною вище налагоджувальною матрицею /рис.1.2/.

Структурні особливості синтезованого керування проілюструємо для граничних /мінімального і максимального/ значень кількості співвідношень. Коли вона дорівнює одиниці, то вектор керування співпадає за напрямком з вивірочаним вектором. Тоді

$$u(p) = \bar{\varphi}(p) c_q, \quad \bar{\varphi}(p) = a_q^T \varphi(p) / a_q^T c_q, \quad (1.6)$$

де  $\bar{\varphi}$  - середньозважене /за компонентами вектору  $a_q$ / значення похибок регулювання. Коли ця кількість на одніцю менша числа змінних, то згідно з виразом (1.5) також викорис-

---

\* Наявність завдання у законі (1.3) обумовлена лише потребою структурного узгодження діючих систем керування і систем, що синтезуються.

товується середньозважене значення похибок регулювання:

$$u(p) = \varphi(p) - \bar{\varphi}(p) a_{01}, \quad \bar{\varphi}(p) = C_0^T \varphi(p) / C_0^T a_{01}. \quad (1.7)$$

В обох випадках не потрібно безпосередньо вимірювати розузгодження співвідношень, а відповідна схема керування стає відносно простою / вона містить як основний блок, що додається, тільки блок усереднення/.

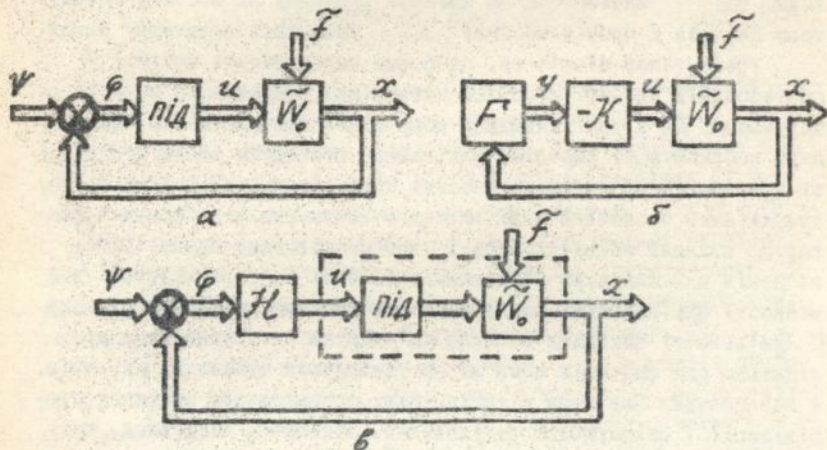


Рис. 1.1

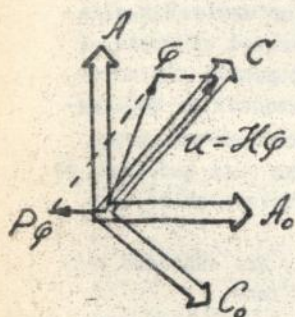


Рис. 1.2

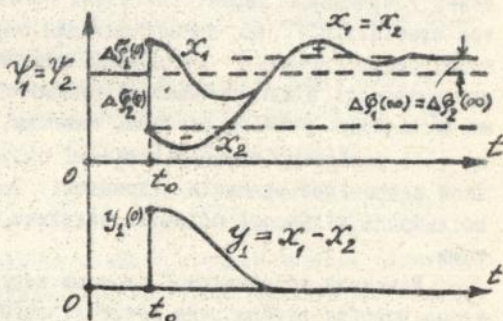


Рис. 1.3

1.2. Динамічні властивості систем досліджуємо виходячи з рівнянь, що визначають зміну розузгоджень для співвідношень між вихідними величинами об'єктів і зміну власне цих величин.

Для розузгоджень це рівняння таке:

$$W_y(p) y(p) = p A^T (K(p) - \psi), \quad W_y(p) = A^T (pE + W_0(p)) C (A^T C)^{-1} \quad (7.8)$$

За умови стійкості системи їх урівноважені значення дорівнюють нулеві при усіх обмежених зовнішніх впливах /астатизм відносно розузгоджень/. Якщо ж у схему керування не включені ПІД-регулятори, то аналогічне за змістом рівняння не містить оператора Лапласа у правій частині і вказаного астатизму немає.

Треба також відмітити, що форма передаточної матриці у синтезованій системі зумовлює своєрідне усереднення каналів керування. Це в ряді випадків може підвищити динамічні показники координуючої системи, наприклад, призвести до її стійкості при нестійкій вихідній системі стабілізації. Вірність цього твердження, в значній мірі якісного, залежить від багатьох факторів: заданих співвідношень і налагоджувальних параметрів; зв'язків між каналами керування в об'єкті та параметричної відмінності цих каналів; числа ступенів свободи розв'язку рівнянь (I.1); кількості вихідних величин об'єкту та ін. Аналітичне дослідження цих факторів поки що не уявляється можливим, як, втім, і аналогічних факторів в традиційних автоматичних системах стабілізації і слідуючого регулювання. Показано, наприклад, що при одному співвідношенні і при незв'язних, але різних за параметрами об'єктах характеристичний поліном системи являє собою певне усереднення характеристичних поліномів для замкнених систем стабілізації, що призначені для окремих об'єктів. При кількості співвідношень на одиницю меншій кількості об'єктів і при наявності відносно слабких взаємозв'язків деякої підсистеми збільшення розміру системи, навпаки, призводить до виділення в її характеристичному поліномі операторного співмножника, який відповідає вказаній підсистемі. Тоді, якщо вона нестійка, то збільшення кількості об'єктів викликає нестійкість всієї системи.

Рівняння координуючої системи керування, яке записане відносно похибок регулювання /стабілізаційних/, таке:

$$W_f(p) \phi(p) = p(\psi - f(p)), \quad W_f(p) = pE + W_0(p)H, \quad (7.9)$$

де  $W_f(p)$  - відповідна передаточна матриця. Ця матриця в уста-

леному режимі /при  $p=0$ / є виродженою, а її детермінант дорівнює нулеві. Зважаючи на цю обставину і на структуру матриці  $H$ , можна показати, що, по-перше, розв'язок наведеного рівняння

$$\varphi(p) = [ \|W_y(p)\| E - W_0(p) C W_y^{-1}(p) A^T ] (\Psi - f(p)) / \|W_y(p)\|, \quad (1.10)$$

де

$$\hat{W}_y(p) = W_y^{-1}(p) \|W_0(p)\|, \quad (1.11)$$

не містить /на відміну від попереднього випадку/ оператора Лапласа як співмножника. Отже, відносно змінних система не має статизму ( $\varphi(\infty) \neq 0$ ), тобто ustaleni значення змінних не дорівнюють заданням ( $x(\infty) \neq \Psi$ ). По-друге, динамічна стійкість залежить в обох випадках, що розглядаються, від одного й того ж операторного детермінанта, що визначається виразом для  $\|W_y(p)\|$ . По-третє, порядок /ступінь/ відповідного характеристичного полінома менше порядку характеристичного поліному для вихідної системи стабілізації на величину, яка не менша, ніж  $n-m$ , що дорівнює кількості ступенів свободи розв'язку рівнянь (1.1). Треба також відмітити, що перехідні процеси в координатних системах є вельми специфічними, типу процесів Бертон - Гаузе (рис. 1.3), що мають місце у природних системах. Для цих процесів властиві, зокрема, як позитивні, так і негативні перерегулювання, а також, на відміну від згайданих систем автоматичної стабілізації, для них визначальною є статична, а не динамічна стійкість.

Важлива особливість, що так обумовлена виродженістю матриці перетворення у законі координатного керування, полягає в наявності інтегральних інваріантів /балансів/:

$$Q_w^T(p) \varphi(p) \equiv Q_w^T(p) [\Psi - f(p)], \quad Q_w^T(p) = C_0^T W_0^{-1}(p) \quad (1.12)$$

Таким чином, для будь-якого моменту процесу зважані суми змінних та їх похідних залежать від зовнішніх впливів і, зокрема, можуть бути сталими. Матриця цих інваріантів визначається тільки матрицею налагоджування у законі керування і передаточною

матрицею об'єкту, але не залежить від форми задаваних співвідношень.

Вказані особливості не мають аналогів для традиційних багатовимірних систем автоматичного керування з задатчиками для кожної регульованої величини.

І.3. Достатні умови координації. Перша з них полягає в тому, що праві нуль-вектори передаточної матриці об'єкту і матриці коефіцієнтів рівнянь (І.І) для співвідношень не повинні співпадати, тобто належати одному й тому ж підпростору. Для виконання цієї умови необхідно додержувати нерівності:

$$W_0(p)A_0 \neq 0. \quad (I.13)$$

Друга умова потребує неідентичності або взаємозв'язаності об'єктів:

$$W_0(p) \neq \text{diag } v_i(p), \quad v_i(p) = v_0(p), \quad i = \overline{1, n}. \quad (I.14)$$

Якщо виконується хоч одна з цих умов, то відповідні вектори керування є такими ж, як і для традиційних систем стабілізації. Треба зазначити, що виконання умови (І.14) суперечить відомим тенденціям у побудові багатовимірних автоматичних систем, коли намагаються реалізувати динамічне "розв'язання" підсистем /автономність/ і взагалі зробити підсистеми однаковими.

І.4. Статичні особливості системи. визначаються залежністю між урівноваженими  $\Delta \varphi(\infty)$  і початковими  $\Delta \varphi(0)$  відхиленнями змінних від їх незбурених /передначальних/ значень  $\varphi(-0)$ . Ця залежність можна одержати, наприклад, з виразу (І.10) при  $p=0$ . Тоді маємо

$$\Delta \varphi(\infty) = P_0 \Delta \varphi(0), \quad (I.15)$$

де матриця коефіцієнтів, що названа матрицею статичних взаємозв'язків, така:

$$P_0 = A_0(Q_0^T A_0)^{-1} Q_0^T, \quad Q_0^T = C_0^T W_0^{-1}, \quad \text{rang } P_0 = n-m. \quad (I.16)$$

Ця матриця є неортогональним проектором вектора початкових відхилень /рис.І.4/ і визначається урівноваженими значеннями інтегральних інваріантів - матрицею  $Q_0$ , а також правими нуль-векторами для матриці коефіцієнтів співвідношень.

Наведений вираз дозволяє досліджувати статичну стійкість системи. Наприклад, коли кількість співвідношень на одиницю

менше кількості змінних, а відхилилась тільки одна змінна, то тоді при певних умовах модуль вектора усталених похибок зменшується із збільшенням загальної кількості змінних:

$$\|\Delta\varphi(\infty)\| \equiv 1/n, \quad \Delta\varphi(\infty) = (\varphi_0, \Delta\varphi_1(0)/\varphi_0^T a_0) a_0. \quad (1.17)$$

Аналогічний ефект має місце, коли зважена сума початкових відхилень  $\varphi_0^T \Delta\varphi(0)$  прямує до нуля при збільшенні величини  $n$ .

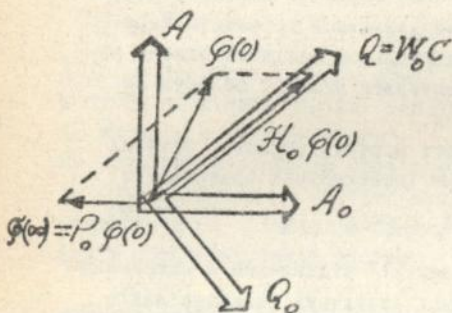


Рис. 1.4

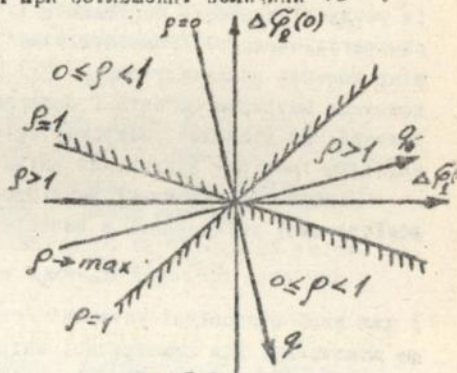


Рис. 1.5

Загальне дослідження статичної стійкості можна провести, виходячи із порівняння норми векторів для початкових та усталених відхилень. Це призводить /при використанні квадратичної норми/ до дослідження знаковизначеності квадратичної форми

$$\Phi = \Delta\varphi^T(0)(E - P_0^T P_0)\Delta\varphi(0), \quad (1.18)$$

матриця якої має  $m$  позитивних і  $n-m$  негативних власних чисел. Останнє впливає з того, що сингулярні числа матриці (1.16), що відповідають її ненульовим власним числам, як доведено автором і Ю.П.Драчківським, завжди не менше одиниці:

$$\sigma_i^2[P_0] = 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad \sigma_i^2[P_0] \geq 1, \quad i = \overline{m+1, n}. \quad (1.19)$$

Зважаючи на цю обставину, можна показати, що багатовимірний простір початкових відхилень "розшарується" на три підпростори, які описуються виразами

$$\Phi(\Delta\varphi(0)) > 0, \quad \Phi(\Delta\varphi(0)) < 0, \quad \Phi(\Delta\varphi(0)) = 0 \quad (1.20)$$

і відповідають статичній стійкості, нестійкості і нейтральності. Базисні вектори першого з них є власні вектори матриці квадратичної форми (1.18) для позитивних власних чисел цієї матриці, другого - для негативних, а третього -

для нульових. При цьому підпростір статичної стійкості містить область, базисні вектори якої ортогональні векторам інтегральних інваріантів і яка описується таким виразом:

$$\Delta \Phi(\sigma) = Q\lambda, \quad Q = W_0 C : Q^T Q_0 = 0, \quad \lambda = v\alpha\tau. \quad (I.21)$$

Якщо початкові відхилення належать ІЯ, то згідно з (I.15), (I.16) їх усталені значення дорівнюють нулеві. В цьому полягає ефект саморегульованості /гомеостатизму/, або ефект Ле-Шательє. Одержана область гомеостатизму (I.21) визначається усталеною передаточною матрицею об'єкта і налагоджувальною матрицею закону керування. Це дозволяє, зокрема, орієнтувати вказану область на найбільш імовірні відхилення змінних.

Підпростір статичної нестійкості містить область, базисні вектори якої співпадають з векторами інтегральних інваріантів

$$\Delta \Phi(\sigma) = Q_0 \lambda_0, \quad \lambda_0 = v\alpha\tau \quad (I.22)$$

і для якої відповідні усталені /статичні/ відхилення є максимально можливими. Для симетричної матриці статичних взаємозв'язків /при  $Q_0 = A_0$ / ця область відсутня, бо тоді матриця квадратичної форми (I.18) не має негативних власних чисел. Для двовірної координуючої системи можливий вигляд підпросторів, що описані, наведеной на рис. I.5 ( $\rho \triangleq \|\Delta \Phi(\infty)\| / \|\Delta \Phi(0)\|$ ).

Треба підкреслити, що, по-перше, для координуючої системи керування пов'язаність статичної стійкості на відміну від динамічної стійкості залежить не тільки від значень параметрів системи, але й від початкових значень змінних. По-друге, наявність підпростору статичної стійкості завжди супроводжується наявністю підпростору статичної нестійкості і навпаки.

2. Балансові динамічні системи являють собою широкий клас багатовимірних систем, перехідні процеси в яких відрізняються наявністю інтегральних інваріантів, тобто, наприклад, сталістю деяких зважених сум змінних. Крім систем координуючого керування до них належать системи функціональної діагностики; системи масового обслуговування і інформаційні, що описуються рівняннями Колмогорова — Чепмена; енергосистеми в режимі самосинхронізації; основний регулюючий блок в схемі Г.В.Щипанова для компенсації зовнішніх збурень і т.п. Для цих систем інтегральні інваріанти обумовлені відповідною сигнальною структурою або, іншими словами, законами зберігання інформаційного типу. Для біо-

логічних, економічних, екологічних систем, для деяких динамічних поточкових мереж, для процесів безвідходної технології, кровообігу та ін. наявність інтегральних інваріантів обумовлена дією законів зберігання маси або так званою "кільцевою" структурою системи /замкненим циклом трансформації речовин, точарів і т.п./.

За сучасними уявами, "без інваріантів немає системи".

2.1. Рівняння динаміки системи та структура її балансів.

Таке рівняння має вироджену матрицю коефіцієнтів:

$$\dot{x} = \tilde{A}x + f(t), \quad \dim x = \dim f = n, \quad \text{rang } \tilde{A} = m < n, \quad (2.1)$$

де  $x$  є вектором змінних стану системи, тобто його компоненти містять не тільки вихідні величини об'єктів, але також їх фазові змінні, а  $f$  є вектором збурень. Треба відмітити, що загальні результати проведеного нижче аналізу розповсюджуються на системи координуючого керування за умови, що вектор збурень прямує у часі до нуля. Це випливає з факту астатизму таких систем.

Дефект  $(n-m)$  матриці коефіцієнтів рівняння (2.1) дорівнює дефекту матриці перетворення у законі координуючого керування або кількість діючих законів зберігання. Завдяки цьому вона має по  $n-m$  лівих і правих нуль-векторів, що утворюють відповідно матриці  $Q_0$  та  $V_0$ . Ліві нуль-вектори визначають структуру рівнянь для інтегральних інваріантів /балансів/:

$$Q_0^T x(t) = Q_0^T \tilde{f}(t), \quad \tilde{f}(t) \triangleq \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad (2.2)$$

а праві визначають урівноважені значення змінних /при зовнішніх впливах, що прямують до нуля/. В останньому випадку вираз для відповідних значень змінних подібний до виразу (1.15)

$$x(\infty) = P_0 \tilde{f}(\infty), \quad P_0 = V_0 (Q_0^T V_0)^{-1} Q_0^T. \quad (2.3)$$

Тому умови статичної стійкості можна знаходити, як і для систем координуючого керування. Так, хай балансова умова являє, наприклад, сталість суми змінних. Тоді якщо аналогічна сума відхилень змінних від значень, що відповідають деякому урівноваженому або статичному режиму, дорівнює нулеві, то вектор відхилень є вектором типу (1.21), тобто належить до підпростору гомеостатизму системи. Таким чином, при цих відхиленнях стан рівноваги не зміщується.

АНБ ім. В. Стефаньки  
АН УРСР

2.2. Загальний розв'язок різнняння динаміки системи та "розподіл" рухів. Динаміку балансової системи досліджуємо для випадку, коли кількість нульових власних чисел матриці коефіцієнтів рівняння (2.1) дорівнює її дефекту. При цьому, використовуючи розклад Леверра-Фаддеева, одержуємо операторний розв'язок:

$$x(p) = (pE - \tilde{A})^{-1} f(p) = B(p) f(p) / \Delta(p), \quad (2.4)$$

де

$$B(p) = \sum_{i=0}^m p^{m-i} B_i, \quad \Delta(p) = \sum_{i=0}^m p^{m-i} a_i. \quad (2.5)$$

У загальному випадку ( $n > 2$ ) порядок характеристичного поліному системи менше, ніж її диференціальний порядок  $n$ . Треба підкреслити, що цей поліном має один нульовий корінь.

Вектор (2.4) можна записати як суму двох складових: перехідної  $x'(p)$  і інтегруючої  $x''(p)$ . Відповідний вираз має вигляд:

$$x(p) = x'(p) + x''(p), \quad (2.6)$$

де

$$x'(p) = R(p) f(p) / \Delta(p), \quad x''(p) = P_0 f(p) / p. \quad (2.7)$$

причому

$$R(p) = \tilde{B}(p) - \tilde{\Delta}(p) P_0, \quad \tilde{B}(p) = p \tilde{B}(p) + B_m, \quad \Delta(p) = p \tilde{\Delta}(p) + a_m. \quad (2.8)$$

Для цих складових виконуються балансові умови:

$$Q_0^T x'(p) \equiv 0, \quad Q_0^T x''(p) \equiv Q_0^T f(p) / p. \quad (2.9)$$

Таким чином, зважені суми перехідних складових дорівнюють нулеві, а зважені суми інтегруючих складових, які називають також магістральними, дорівнюють аналогічним сумам інтегралів від зовнішніх впливів.

2.3. Основні властивості усталеного та перехідного рухів. Усталений рух має місце після закінчення перехідного руху, тривалість якого залежить від величини коренів операторного поліному  $\Delta(p)$ . Усталений рух, що залежить безпосередньо від зовнішніх впливів, з достатньою точністю описується таким виразом:

$$x(t) \approx R f(t) + P_0 \tilde{f}(t), \quad (2.10)$$

де

$$R = (B_{m-1} - a_{m-1} P_0) / a_m : \cdot AR = P_0 - E. \quad (2.11)$$

Якщо при цьому зовнішні впливи є досить короткими у часі, наприклад являють собою деякі початкові відхилення змінних, то у наведеному виразі переважає друга /проекційно-інтегруюча/ складова, Тоді маємо

$$x(t) \approx P_0 \tilde{f}(t). \quad (2.12)$$

Можна показати, що саме при такому русі для кожного елемента балансової системи виконуються умови локальної рівноваги /сума потоків  $\{a_{ij} z_j\}$ , що подаються на цей елемент, дорівнює сумі потоків, які він передає на всі інші елементи системи/. Дослідження такої рівноваги важливе, наприклад, для аналізу балансу "витрати-випуск" в економічних системах.

Якщо ж вектор зовнішніх впливів структурно такий, що він належить означеному вище підпростору гомеостатизму системи, тобто  $Q_0^n f(t) \equiv 0$ , то описуваний інтегруючий ефект при усталеному русі зникає. Тоді згідно з (2.3) маємо, що  $P_0 f(t) \equiv 0$ , а в усталеному режимі виникає стаціонарна /зсувна/ рівновага:

$$x(t) \approx S f(t), \quad S = B_{m-1} / a_m, \quad (2.13)$$

При цьому вектор швидкості змінних, що обчислюється згідно з диференціальним рівнянням (2.1), дорівнює нулеві незалежно від зміни зовнішніх впливів. Описуваний режим має місце, наприклад, в динамічних мережах, коли приплив дорівнює відтоку. /Згідно з теорією В.О.Ліщука, до них належать саморегульовані системи кровообігу, що функціонують у живих істотах./

З динамічних ефектів у балансових системах належить відмітити також ефект негативного парарегулювання /фальш-старт/. За такого ефекту одна чи кілька змінних на початку перехідного процесу зміщуються у напрямку, що є протилежним до того, який визначається наступним усталеним режимом. Достатня умова цього ефекту, наприклад, при відхиленні тільки початкових зна-

чень змінних. полягає в додержанні знакової рівності

$$\text{sign}_i (\tilde{A} \Delta x(0)) = -\text{sign}_i (H_0 \Delta x(0)), H_0 = E - P_0 \quad (2.14)$$

хоча б для однієї змінної ( $i \in [1, n]$ ).

3. Багаторічкові координуючі системи призначені для регулювання двох або більше груп співвідношень між вихідними величинами об'єктів. При цьому закон керування для будь-якої групи не повинен залежати від форми рівнянь груп, що додають до нєї /структурна декомпозиція/. Крім того, треба врахувати необхідність підпорядкування процесів відпрацювання їх розузгоджень /структурно-часова декомпозиція/.

3.1. Структурна декомпозиція призначена для незалежного /у вказаному вище сенсі/ відпрацювання  $M$  груп співвідношень:

$$y^{(j)} \equiv A^{(j)T} x - \theta^{(j)} = 0, \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.1)$$

причому

$$\dim A^{(j)T} = m^{(j)} \times n, \quad \sum_{j=1}^M m^{(j)} \leq n. \quad (3.2)$$

Закон керування прийнято у вигляді суми векторів, кожний з яких призначений для регулювання однієї групи співвідношень. Таким чином, маємо

$$u = \sum_{j=1}^M u^{(j)}, \quad u^{(j)} = \tilde{H}^{(j)} \varphi, \quad \varphi = \psi - x, \quad (3.3)$$

а використані тут матриці одержані в результаті розкладу проектора для загального закону координуючого керування (1.3) на суму несиметричних проекторів, що відповідають окремим групам співвідношень. Ці проектори задовольняють у чван

$$\sum_{j=1}^M \tilde{H}^{(j)} = H; \quad \tilde{H}^{(j)} \tilde{H}^{(l)} = 0, \quad j > l; \quad \tilde{H}^{(j)} \tilde{H}^{(l)} \neq 0, \quad j \leq l. \quad (3.4)$$

Кожний з наведених у (3.3) векторів керування являє неортогональну проєкцію на підпростір, що визначається векторами коефіцієнтів для рівнянь усіх попередніх за нумерацією груп співвідношень, причому він, однак, є неортогональним до відповідних векторів керування.

Синтезована за викладеним принципом схема керування містить паралельно включені блоки, кожний з яких призначений для відпрацювання розузгодження тільки однієї групи співвідношень. Оскільки загальний вектор керування дорівнює тому вектору, що

розрахований за виразом (І.3) , то динамічні і статичні властивості синтезованої системи, природно, не відрізняються від властивостей еквівалентної однорівневої системи.

3.2. Структурно-часова декомпозиція зводиться до використання додаткового фактора, а саме: відомого в автоматичці принципу розподілу рухів на "швидкі" і "повільні". Тоді вектор керування приймають таким:

$$u = \sum_{j=1}^M \alpha_j u^{(j)}, \quad \alpha_1 = 1 \gg \alpha_2 \gg \dots \gg \alpha_M, \quad (3.5)$$

де вагові коефіцієнти  $\alpha_j$  задовольняють умову послідовного у часі відпрацювання розузгоджень груп співвідношень /в міру збільшення номера рівня керування/. Доцільність цього визначається, перш за все, технологічними вимогами до виробництва, що автоматизується.

Хай, наприклад, розглядається система для нашарування деякої речовини /покриття/ на листовий матеріал, що рухається. Ця система складається з трьох основних елементів, що включають такі виконавчі електроприводи: подачі сировини у бункар; для регульованої подачі перероблюваної сировини на матеріал; для руху самого матеріалу. При розузгодженні швидкостей обертання вказаних приводів необхідно, в першу чергу, скоординувати швидкість витрати речовини, що йде на покриття, з лінійною швидкістю переміщення матеріалу /швидкість транспортеру/. Це досягається за допомогою І-го рівня керування (3.5) . При дотриманні такої умови треба узгодити витрату покриття з витратою сировини /2-й рівень керування/, а лише при виконанні обох цих умов доцільно стабілізувати значення швидкостей усіх трьох приводів /3-й рівень керування/. В протилежному випадку нашарочане покриття буде нерівномірним, а вироблюваний матеріал - неякісним.

Аналогічна ситуація, що викликає необхідність використання закону координуючого керування (3.5) виникає при автоматичному дозуванні хімічних речовин, коли треба витримати необхідну послідовність хімічних реакцій. В протилежному випадку можуть виникнути назворотні процеси, за яких об'єкт керування перестав взагалі існувати.

3.3. Узгоджене регулювання є частковим і дуже важливим у прикладному відношенні випадком координуючого керування. Воно призначене для узгодження динамічних об'єктів зі стабілізуючим

корекцією, причому кількість задаваних співвідношень на одиницю менше кількості об'єктів, тобто регульований многовид є одновимірним. Необхідний закон керування приймаємо дворівнявим, типу (3.5), використовуючи структурно-часову підпорядкованість рівнів:

$$u(p) = (H + \alpha P) \varphi(p), \quad H = E - P, \quad P = c_0^T c_0^T a_0^T \quad (3.6)$$

або

$$u(p) = \varphi(p) - (1 - \alpha) \bar{\varphi}(p) a_0, \quad \bar{\varphi}(p) = c_0^T \varphi(p) / c_0^T a_0 \quad (3.7)$$

де  $c_0$  - варіюваний вектор;  $a_0$  - вектор, що є ортогональним усім векторам - рядкам матриці коефіцієнтів співвідношень;

$\alpha \ll 1$  - основний налагоджувальний параметр. Якщо він дорівнює одиниці, то одержуємо вихідне стабілізуюче керування, що пропорційне вектору похибок  $\varphi$ , а якщо він дорівнює нулеві, то одержуємо суто координуюче /однорівняве/ керування. Оптимальне значення цього параметра, що вибирають експериментально, є досить малим /у межах 0,05+0,2/. Наведений загальний закон узгодженого регулювання при відповідному виборі такого параметра реалізує послідовно у часі "швидке" відпрацювання розузгоджень співвідношень з наступним "повільним" відпрацюванням командних сигналів /задавань/ для вихідних величин об'єктів /"розподіл рухів"/. При цьому швидкість "повільного" руху є приблизно пропорційною величині вказаного параметра.

Треба відмітити важливі у прикладному відношенні часткові форми закону узгодженого регулювання (3.7). Так, якщо співвідношення описуються системою рівнянь (I.1) при  $\xi = 0$ ,  $c = \bar{c}$ , то правий нуль - вектор 1х матриці коефіцієнтів необхідно дорівнює вектору завдань ( $a_0 = \psi$ ), а закон керування зводиться до виразу

$$u(p) = [\bar{x}(p)\psi - x(p)] + \alpha[\psi - \bar{x}(p)\psi], \quad (3.8)$$

де

$$\bar{x}(p) = c_0^T x(p) / c_0^T \psi \quad (3.9)$$

Цей закон має неочну технічну інтерпретацію: його перша складова /1-й рівень керування/, що дорівнює відхиленню змінних від їх середньозваженого значення, реалізує власне координативу змінних, а його друга складова /2-й рівень керування/, що взята з відносно малою вагою і дорівнює відхиленню вказаного середнього значення від завдань для окремих змінних, реалізує їх коректурну стабілізацію.

Еквівалентним є зображення закону (3.8) у вигляді стандартної структури, а саме - як відхилення від деякого змінного завдання:

$$u(p) = k(x, p) \psi - x(p), \quad k(x, p) = \alpha + (1-\alpha) E(p); \quad k(x, 0) = 1. \quad (3.10)$$

Оператор  $k(x, p)$ , що входить у цей вираз, можна розглядати як відомий в автоматизованому електроприводі інерційний "задатчик інтенсивності", що використовують для плавного пуску електричних двигунів. Але на відміну від таких задатчиків вказаний оператор не тільки є аперіодичною ланкою, але й залежить від регульованих величин.

Характеристичний поліном системи узгодженого регулювання дорівнює зваженій сумі характеристичного полінома  $\Delta_a(p)$  вихідної системи стабілізації і характеристичного полінома  $\Delta(p)$  однорівневої координативної системи, тобто

$$\Delta(p) = \alpha \Delta_a(p) + (1-\alpha) \Delta(p), \quad (3.11)$$

причому ваговий коефіцієнт при характеристичному поліномі вихідної системи дорівнює основному налагоджувальному параметру в законі керування. При відносно малій величині цього параметра стійкість і динамічні властивості системи визначаються перш за все відповідною однорівневою координативною системою. Але тоді тривалість процесу регулювання досить велика. Щоб підвищити швидкість запропоновано змінювати вказаний налагоджувальний параметр за релейним законом: він дорівнює одиниці при відпрацьованих розузгодженнях співвідношень і нулеві - у протилежному випадку.

Загальна схема узгодженого регулювання наведена на рис.3.1, а типові перехідні процеси - на рис.3.2,а /при стабілізації змінних/ і на рис.3.2,б /при координативу змінних зі стабілізуючою корекцією/. На рис.3.2,б пунктирною лінією означений більш швидкий процес координативу при релейній зміні основного налагоджувального параметра. Вказані криві відповідають дотримувачню

рівності змінних, наприклад швидкостей обертання двигунів / виконавчих пристроїв, коли на деякий час гальмується один з них /заклинається/. При цьому у випадку координувачого керування швидкість обертання другого двигуна теж зменшується /"швидкий" рух/ до відносно малої величини, що визначається налагоджувальним параметром  $\alpha$ . Після припинення гальмування швидкості обох двигунів, які практично вже зрівнені, прагнуть до своїх установлених значень, що визначається задатчиками /"повільний" рух/.

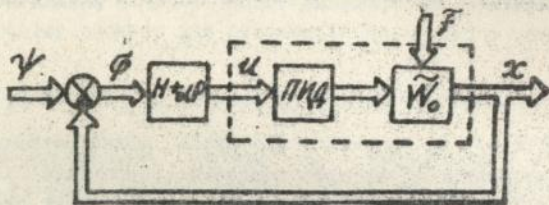


Рис.3.1

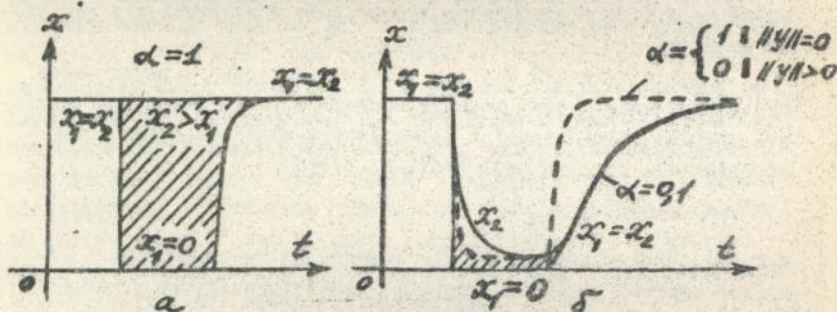


Рис.3.2

4. Алгоритми координувачого керування розроблені для ефективного /в обчислювальному плані/ розрахунку вектора (1.3). Відповідний рекурентний алгоритм побудований на базі розкладу (3.4) за умови, що співвідношення кожного рівня керування описуються одним рівнянням. На кожному кроці алгоритма треба обчислювати ліву проекцію вектора коефіцієнтів вказаного рівняння і праву проекцію налагоджувального вектора. Це є проекції на підпростір, базисні вектори якого ортогональні усім меншим за

нумерацієк векторам коефіцієнтів задаваних співвідношень. Такі проєкції знаходимо за допомогою узагальненої /на випадок неортогонального проєктування/ процедури Грама - Шмідта. Розроблена також ще одна рекурентна процедура для розрахунку координуючого керування, яка є узагальненням відомої процедури Холеського. За допомогою цих алгоритмів розв'язані, зокрема, деякі задачі оптимізації за наявності обмежень і фільтрації сигналів.

5. Використання координуючих систем. Показано, що за допомогою принципу координуючого керування можна вирішувати різноманітні задачі. Спільно з І.Я.Воронєцьким і В.Ф.Охмакевичем розроблена система синхронізації приводів технологічних ліній, що призначені для обробки полімерних плівок і проєктуються в Інституті "УкрДіпластмаш" /м.Київ/. Випробування системи показали, що нерівномірність товщини матеріалу зменшується у 2-3 рази у порівнянні з використанням існуючих законів керування, а також покращуються режими пуску і зупинки лінії.

Розглянута задача узгодження положення у просторі відзеркалюючих поверхонь геліостатів для сонячних електростанцій. Це важливо, щоб підвищити їх коефіцієнт корисної дії. Моделювання підтвердило можливість вказаного підвищення, зважаючи на те, що для одного й того ж моменту часу ці геліостати мають різні динамічні властивості, у тому числі серед них були коливальні.

Виявилася, зокрема, перспективність координації як самостійного засобу динамічної корекції об'єктів лише за рахунок їх "розмаїття". При цьому використовують ефект "усереднення" в координуючих системах. Для реалізації такого ефекта підключають /навіть при одній керованій величині/ додаткові динамічні об'єкти як інерційні ланки у схемі регулятора, а потім координують їх з основним об'єктом. Це дає також можливість обходитися без спеціальних диференціюючих пристроїв.

Показано, наприклад, що для типового об'єкта промислової автоматики /другого порядку із змінним демпфуванням  $\tilde{\alpha}$ / такий підхід практично усуває негативний вплив цього ефекта. Процес пуску означеного об'єкта, коли  $\tilde{\alpha} = 0 \div 1$ , при одному допоміжному об'єкті і варіюванні основ- ного налагоджувального параметра закону координуючого керуван-

ня 3.7 наведений на рис.5.Г.

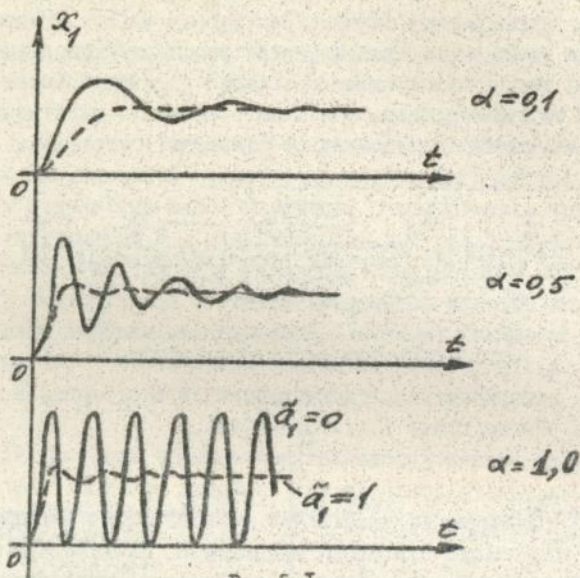


Рис.5.Г

Розроблені закони керування рухом на нелінійній траєкторії і близькі за принципом дії багатозазорні регульовані автоколивальні системи /генератори/ і системи оптимізації за наявності обмежень. При цьому забезпечується відпрацювання траєкторних відхилень незалежно від швидкості руху, а для вказаних генераторів - стабілізація форми коливань і зсувів фаз незалежно від зміни задаваної частоти. За таким принципом, що запропонований автором, побудована, зокрема, мікропроцесорна система керування рухом взаємозв'язаних приводів подачі для верстатів /Балаян А.Н., Курмашов А.Д., Соколов О.А., 1990/.

#### В И С Н О В О К

У цій роботі координація розглядається як самостійний засіб керування, при використанні якого підвищення якості

функціонування систем досягається за рахунок формування мети керування у вигляді спеціальних задаваних часозм'язків між об'єктами /співвідношень/, а не у вигляді командних сигналів для кожного з них. В дисертації вперше проведена регулярне дослідження цих систем. Головні його результати такі.

1. Координуюче керування можна синтезувати, не змінюючи, а тільки доповнюючи схеми керування, що побудовані на базі стандартних ПІД-регуляторів. При цьому воно являє багатовимірне перетворення проєктивного типу для вектора керування, що діє в існуючих схемах. Багаторівневе координуюче керування запропоновано синтезувати на основі розкладу матриці вказаного перетворення на суму проєкційних матриць, кожна з яких відповідає окремій групі співвідношень. Відзначено, що "розмаїття" динамічних і статичних властивостей об'єктів і наявність зв'язків між ними важливі для підвищення ефективності координації.

2. Аналіз синтезованих систем зведений до аналізу багатовимірних динамічних систем балансового типу, що описуються диференціальними рівняннями з виродженою матрицею коефіцієнтів. Встановлено єдність вказаних математичних моделей і математичних моделей природних систем із замкненим циклом трансформації речовин. Визначено специфічні системні ефекти, що зв'язані з умовами динамічної стійкості, сталого руху, стаціонарної і статичної рівноваги, "розподілу" рухів на перехідний і інтегруючий, негативного перерегулювання /фальш-старту/ і т.п.

3. Вирішена задача Р.Баллмана, яка зводиться до знаходження статичної складової загального розв'язку диференціальних рівнянь, що описують балансові системи. Завдяки цьому встановлено умови, за яких усталені значення відхилень змінних менші, ніж їх збурені значення /статична стійкість/, або навіть дорівнюють нулеві /гомеостатизм/.

4. На основі закону дворівневого координуючого керування синтезована схема узгодженого регулювання /координація із стабілізуючою корекцією/. Встановлено, що чага цієї корекції повинна бути відносно малою і підбиратись при впровадженні системи експериментально, а рух системи розподіляється при цьому на "швидку" і "повільну" складові. Розроблені модифікації вказа-

ного закону керування, а також визначені основні напрями застосування відповідних схем /синхронізація об'єктів та їх позиційне узгодження, динамічна корекція без диференціювання сигналів, побудова регульованих генераторів та ін./.

5. Розроблені алгоритми координуючого керування, які узагальнюють /на випадок неортогонального проєктування/ відомі алгоритми Грама - Шмидта та Холеського для розрахунку проєкцій векторів. Запропоновано використовувати ці алгоритми для фільтрації сигналів і оптимізації за наявності обмежень. При цьому така принципова особливість закону координуючого керування як наявність варіюваних векторів застосована для вирішення задач оптимізації і фільтрації, а принцип "розподілу рухів", що відомий в оптимізації /рух до допустимої області, а в ній - до екстремуму/, застосований при координації.

На основі проведених досліджень можна, таким чином, стверджувати, що склався новий науковий напрям - координуюче керування в технічних і природних системах. Його виникнення викликано потребою удосконалення керування складними процесами і комплексами, а також - удосконалення керування і прогнозування для еколого-економічних систем. Принципові особливості цього напрямку такі.

По-перше, для нього характерний наголос на визначенні структур складних систем, що відрізняються так званими горизонтальними зв'язками і відсутністю командного центру /для керування об'єктів/ або замкненим циклом перетворення, наприклад, речовин /для некерування об'єктів/.

По-друге, динаміка цих систем є вельми специфічною і потребує перш за все визначення впливу балансів змінних, що обумовлені інформаційними або матеріально-енергетичними законами зберігання. Процеси регулювання в таких системах не обов'язково зв'язані з передачею інформації чи наявністю спеціальних керуючих пристроїв.

По-третє, на перший план ставиться дослідження усталених

і статичних режимів, які визначають основні властивості систем, що розглядаються. Ці властивості зв'язані перш за все з ефектами саморегулювання змінних і підтримання співвідношень між ними. /Такі ефекти також називають відповідно гомеостатизмом I-го і 2-го роду./

Основний зміст дисертації викладений в таких опублікованих наукових працях автора:

1. А.с. 203733 СССР, Кл.2І в<sup>4</sup>, 8/01. Генератор / Л.М.Бойчук. - Опубл.09.10.67, Бюл. № 21.

2. Бойчук Л.М. Использование функционального преобразования независимой переменной процесса для структурного синтеза нелинейной колебательной системы // Сложные системы управления. - Киев, 1968. - Вып.4. - С.153-159;

3. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза систем функционального регулирования одного класса // Автоматика. - 1969. - №6. - С.10-19.

4. Бойчук Л.М. Метод синтеза структур специальных систем функционального регулирования // Кибернетика и вычисл. техника. - Киев, 1970. - Вып.5. - С.91-99.

5. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. - М.: Энергия, 1971. - 112 с.

6. Бойчук Л.М. Структурный синтез систем автоматической оптимизации с использованием принципа функционального регулирования. - Киев, 1972. - 28 с. - (Препр/АН УССР. Ин-т кибернетики; 72-52).

7. Бойчук Л.М. Регулируемый генератор синусоидальных колебаний // Механизация и автоматизация упр. - 1973. - №6. - С.61-62.

8. Бойчук Л.М. Методы многоуровневой и многокритериальной оптимизации водохранилищ // Математические модели для прогнозирования и управления качеством вод. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1973. - С.36-63.

9. Бойчук Л.М. Структурный синтез автоматических многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами. - Киев, 1974. - 63 с. - (Препр./ АН УССР. Ин-т кибернетики; 74-24).

10. Бойчук Л.М. Метод синтеза багаторівневих систем функціонального керування // Автоматика. - 1974. - №4. - С.3-16.

11. А.с. 480090 СССР, М.Кл. G 06 g 7/38. Устройство для решения задач нелинейного программирования / Л.М.Бойчук. - Оpubл. 05.08.75, Бюл. № 29.

12. А.с. 497602 СССР, М.Кл. G 06 g 7/48. Устройство для решения задач нелинейного программирования. / Л.М.Бойчук. - Оpubл. 30.12.75, Бюл. № 48.

13. Бойчук Л.М. Синтез многоуровневых систем функционального управления // Кибернетика и вычисл.техника. - Киев, 1975. - Вып.27. - С.59-73.

14. Бойчук Л.М. Метод дифференциального спуска для решения задач вынужденного программирования, использующий принцип функционального управления // Кибернетика. - 1976. - № I. - С.92-95.

15. Бойчук Л.М. Описание и учет ограничений в задаче синтеза управления роботов-манипуляторов // Вопросы теории роботов и искусственного интеллекта. - Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1978. - С.59-71.

16. Бойчук Л.М. Декомпозиционный метод решения задач нелинейного программирования одного класса на основе многоуровневого функционального управления // Автоматика. - 1969. - № 4. - С.30-39.

17. Бойчук Л.М., Воронцкий И.Я., Охманевич В.Ф. Синтез двухуровневой системы функционального /согласованного/ управления многодвигательным электроприводом технологических линий для непрерывной обработки полосочных материалов // Кибернетика и вычисл.техника. - Киев, 1980. - Вып.48. - С.41-45.

18. А.с. 746853 СССР, М.Кл.<sup>2</sup> H 02 P 5/50. Устройство для поддержания заданного соотношения скоростей в многодвигательном электроприводе / Л.М.Бойчук. - Оpubл.07.07.80, Бюл. № 25.

19. А.с. 874560 СССР, М.Кл.<sup>3</sup> B 65 H 77/00. Устройство для стабилизации соотношения натяжений движущегося материала в зонах многодвигательной технологической линии / Л.М.Бойчук. - Оpubл. 23.10.81, Бюл. № 39.

20. Бойчук Л.М. Метод синтеза нелинейных двухуровневых систем координирующего управления // Автоматизированное проектирование электротехнических устройств и комплексов. - Челябинск, 1981. - Вып.2. - С.167-172.

21. Бойчук Л.М. Метод синтеза многоуровневых координирующих систем управления взаимосвязанными объектами // Синтез алгоритмов сложных систем. - Таганрог, 1981. - Вып.4. - С.135-139.

22. Бойчук Л.М. Синтез нелинейных двухуровневых систем координирующего управления // Автоматика. - 1982. - № 5. - С.79-82.

23. Бойчук Л.М. Метод расчета оптимального управления нелинейными дискретными объектами на большом временном интервале // Кибернетика и вычисл.техника. - Киев, 1983. - Вып.61.-С. - 38-45.

24. А.с. 1062159 СССР, В 65 Н 77/00. Устройство для стабилизации соотношения натяжений движущегося материала в зонах многодвигательной технологической линии / Л.М.Бойчук, И.Я.Воронцовский, В.Ф.Охмакевич. - Оpubл.23.12.83, Бюл. № 47.

25. А.с.1977040 СССР, Н 02 Р 5/50. Устройство для поддержания заданного соотношения скоростей в многодвигательном электроприводе / В.Ф.Охмакевич, Л.М.Бойчук, И.Я.Воронцовский. - Оpubл. 23.02.84, Бюл. № 8.

26. Бойчук Л.М. Имитационное моделирование речных водохранилищ на основе интегральных инвариантов линейных динамических систем // Автоматика. - 1985. - № 6. - С.64-71.

27. Бойчук Л.М. Метод синтеза двухуровневых систем координирующего управления с использованием операторов сопряженного проектирования // Автоматика. - 1986. - № 6. - С.38-42.

28. Бойчук Л.М., Воронцовский И.Я., Охмакевич В.Ф. Структурный синтез многоуровневых координирующих систем управления многодвигательными технологическими линиями // Синтез алгоритмов сложных систем. - Таганрог, 1986. - Вып.6. - С.70-73.

29. А.с. 1280697 СССР, Н 02 Р 7/68. Многодвигательный электропривод / Л.М.Бойчук, В.Ф.Охмакевич, И.Я.Воронцовский. - Оpubл. 30.12.86, Бюл. № 48.

30. Бойчук Л.М. Инвариантная фильтрация дискретных процессов // Автоматика. - 1987. - № 2. - С.10-16.

31. Бойчук Л.М. Природные и автоматические системы: в чем общность и в чем различие? // Там же. - С.90-93.

32. Бойчук Л.М. Проекционно-градиентный метод оптимизации в неевклидовой метрике для расчета управления нелинейными дискретными объектами при наличии ограничений / Кибернетика и вычисл.техника. - Киев, 1988. - Вып.79. - С.58-63.

33. Бойчук Л.М., Финин Г.С. Метод управления объектами с переменными параметрами на основе применения координирующих систем // Автоматика. - 1989. - № 6. - С.36-43.

34. Бойчук Л.М., Юрачковский Ю.П. Статическая устойчивость и гомеостатический эффект в координирующих системах управления // Там же. - 1990. - № 6. - С.35-45.

35. Бойчук Л.М. Синтез координирующих систем автоматического управления. - М.: Энергоатомиздат, 1997. - 160 с.

36. Бойчук Л.М. Балансные динамические системы и исследование их статической устойчивости и гомеостатизма на основе решения задачи Р.Беллмана // Автоматика. - 1997. - № 3. - С.50-67.

37. Бойчук Л.М. Динамика и статика многообразных динамических систем балансного типа // Кибернетика электрических систем. - Челябинск: Политех. ин-т, 1997. - С.5-11.

38. Бойчук Л.М. Особенности динамики и статики балансных систем замкнутого типа // Автоматика. - 1991. - № 4. - С.42-47.

39. Бойчук Л.М. Разделение движений и стационарное равновесие в балансных динамических системах открытого типа // Там же. - № 6. - С.55-64.

40. Бойчук Л.М. Итерационный метод оптимизации при наличии ограничений с использованием операторов неортогонального проектирования // Кибернетика и вычисл.техника. - Киев, 1997. - Вып.89. - С.52-58.

41. Бойчук Л.М. Общие динамические свойства балансных систем и эффект отрицательного перерегулирования /фальш-старта/ // Автоматика. - 1992. - № 2. - С.45-58.

42. Бойчук Л.М. Локальное равновесие составных элементов балансной динамической системы как аналог экономического равновесия при простом воспроизводстве // Там же. - № 5. - С.52-59.

Підп. до друку 10.12.92. Формат 60×84/16. Пап. кн. журн. Офс. друк.  
Ум. друк. арк. 1,86. Ум. фарбо-відб. 1,98. Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100.  
Зам. 1881.

---

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею  
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова АН України  
252207 Київ 207, проспект Академіка Глушкова, 40

Ab 26.629

**AV 26.629**