

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЛЮБЧИК Леонід Михайлович

КОМБІНОВАНЕ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ
НА ОСНОВІ МЕТОДУ ОБЕРНЕНИХ МОДЕЛЕЙ
В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

05.13.07 - автоматизація технологічних процесів та виробництв

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 1995



00778228 (У)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському Державному політехнічному університеті.

Науковий консультант: Доктор технічних наук, професор
Костенко Юрій Трохимович.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор Бакан Геннадій Михайлович;
2. Доктор технічних наук, професор Александров Євген Євгенович;
3. Доктор технічних наук, професор Сухоруков Георгій Олександрович

Провідна організація: НВО "Київський інститут автоматики", м. Київ.

Захист відбудеться " 29 " 06 1995 р. о 14³⁰
годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.06 у
Харківському Державному політехнічному університеті (310002, м.
Харків, МСП, вул. Фрунзе 21).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського
Державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий " _____ " _____ 1995 р.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Кізілов В.У.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. На сучасному етапі розвитку автоматизації виробництва на перший план висуваються вимоги підвищення точності стабілізації та регулювання основних режимних технологічних змінних, які в значній мірі обумовлюють якість кінцевого продукту, продуктивність, економічність, надійність і безпеку функціонування технологічного обладнання. Підвищення вимог щодо точності дотримання технологічних режимів в умовах постійно діючих збурень, зумовлених нестабільністю параметрів сировини та обладнання, а також змінами режимів роботи, призводить до необхідності вдосконалення методів управління технологічними процесами. Особливостями зазначених задач є багатовимірність та структурна складність моделей технологічних об'єктів управління, наявність інтенсивних збурень складної структури, що повільно змінюються (так звані "хвильові" збурення), суттєва неповнота апріорної (відсутність адекватних математичних моделей збурень) і поточної (відсутність можливості безпосередніх вимірювань) інформації про збурюючі дії, негативний вплив взаємних зв'язків між регулюємими величинами. Указані особливості характерні для задач управління хіміко-технологічними процесами, тепло- і електроенергетичними установками, процесами автоматизованих випробувань в промисловості, процесами обслуговування технологічних комплексів.

Традиційні методи синтезу систем управління при наявності збурень звичайно базуються на використанні осереднених чи мінімаксних показників точності. При цьому системи, що мають властивість оптимальності відносно класів збурень, часто не забезпечують належної якості управління для кожної реалізації. Особливі труднощі виникають також тоді, коли спектральні діапазони задаючих та збурюючих впливів в значній мірі перекриваються, що має місце в

багатьох задачах програмного управління технологічними режимами і проектування слідкуючих систем промислового призначення.

В зазначених випадках значного підвищення точності управління можна досягти шляхом введення в закон управління додаткової інформації про збурюючі дії, що реалізується різними схемами комбінованого управління, які досліджені в роботах А. Г. Івахненка, А. П. Кухтенка, В. Б. Павлова, В. К. Стеклова, Г. Ф. Зайцева, Б. Н. Петрова, Г. М. Уланова, Б. М. Менського, Я. З. Ципкіна, Е. Девісона, С. Джонсона, Н. Сераджи, М. Уонема та інших.

Основна увага при цьому приділялась розгляду систем зі скалярними входом та виходом на основі класичної теорії інваріантності. Треба підкреслити, що традиційні підходи до компенсації недоступних безпосередньому вимірюванню збурень, що ґрунтуються на їх поточному оцінюванні, потребують завдання достатньо точної апріорної моделі збурень або її ідентифікації, що в реальних задачах управління часто не може бути здійснено.

Поширення відомих підходів на задачі комбінованого управління багатовимірними технологічними процесами зустрічає ряд принципових труднощів, пов'язаних не тільки з проблемою вимірності, а також з проблемами високої чутливості комбінованих систем до параметричних відхилень, відсутністю конструктивних критеріїв їх реалізованості і методів синтезу, що забезпечують задану динамічну якість і грубість.

Альтернативою є розробка методів відновлення та компенсації збурень без застосування їх апріорних моделей на основі концепції обернених задач динаміки, розвинутих П. Д. Крутько, та теорії обернених систем, що вивчалась в роботах В. Т. Борухова, К. Д. Жука, Г. Є. Пухова, В. Д. Юркевича, Ю. І. Яаксоо, Л. Сільвермана. Треба підкреслити, що зазначена проблема тісно пов'язана з важливою задачею вимірювальної техніки - обробкою непрямих вимірювань і корекцією динамічних похибок. Реалізація такого підходу в значній мірі стри-

мується відсутністю науково-обґрунтованих і ефективних методів синтезу обернених динамічних моделей (ОДМ) та багатовимірних регуляторів на їх основі з урахуванням вимог одержання рішень у параметризованому вигляді з виділенням порівняно невеликої кількості параметрів, що настраюються, як це диктується інженерною практикою. Необхідно також забезпечити можливість оцінки потенціально досяжної точності управління на етапі проектування.

Таким чином, виникає необхідність в поширенні методів обернених задач динаміки на системи з неповною інформацією, а також у створенні передумов їх застосування в практиці автоматичного управління технологічними процесами, що визначає актуальність роботи.

Мета роботи. Мета дисертаційної роботи полягає в розробці та практичній реалізації принципів та конструктивних методів побудови систем комбінованого управління багатовимірними та структурно-складними технологічними об'єктами в умовах неповної інформації про збурення на основі методу обернених моделей, а також алгоритмів їх структурно-параметричного синтезу з урахуванням вимог точності, фізичної реалізуємості, динамічної якості і грубості.

Зазначена мета досягається шляхом розв'язання комплексу наступних взаємозв'язаних задач:

- аналізу і формалізації типових задач комбінованого управління технологічними процесами в умовах неповної інформації про збурення;
- розробки методів структурного синтезу багатовимірних компенсуючих регуляторів та спостерігачів збурень на основі мінімальних реалізацій обернених моделей в просторі станів;
- розробки конструктивних методів структурно-параметричного синтезу обернених динамічних систем на основі їх параметризації та регуляризації по заданим показникам якості;
- розробки методів и алгоритмів аналітичного конструювання багатовимірних комбінованих систем з оберненими моделями з

урахуванням вимог якості та фізичної реалізуємості, а також обмежень на керуючі дії;

- поширення методу обернених моделей на задачі управління складними технологічними об'єктами із застосуванням структурної та часової декомпозиції з урахуванням вимог децентралізації, компенсації взаємозв'язків та автономності;

- побудови комплексу алгоритмів цифрової обробки інформації, діагностики та управління із застосуванням обернених моделей, оптимізації їх параметрів та оцінки ефективності;

- апробації та реалізації розроблених методів комбінованого управління у складі алгоритмічного та програмного забезпечення АСУ ТП в хімічній промисловості, теплоенергетиці і авіадвигунобудуванні.

Методологія та методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовувалась методологія теорії управління та системного аналізу, методи простору станів, обернених задач динаміки, модального і оптимального управління, рекурентного оцінювання в умовах невизначеності, векторних функцій Ляпунова, розподілу рухів та сингулярних збурень, а також методи моделювання та цифрового управління технологічними процесами.

Об'єктом дослідження були системи автоматизації та процеси управління технологічними об'єктами в умовах невизначеності.

Наукова новизна. Основний науковий результат дисертаційної роботи полягає в теоретичному узагальненні та обґрунтуванні методу обернених моделей і розв'язанні на його основі актуальної наукової проблеми комбінованого управління багатовимірними і структурно-складними технологічними об'єктами в умовах неповної інформації про збурення на основі синтезуємих обернених динамічних моделей.

Наукова новизна обумовлюється наступними результатами.

Одержано мінімальні реалізації в просторі станів компенсуючих регуляторів та спостерігачів збурень з оберненими моделями, а також розв'язуючих компенсаторів, що не використовують явних оцінок збурень.

Винайдено кількісні зв'язки між основними структурними параметрами розв'язуючих компенсаторів і об'єктів управління.

Запропоновано новий спосіб параметризації рівнянь обернених моделей на основі спостерігачів для систем з невідомими входами.

Розв'язано задачу параметричного синтезу обернених задач на основі моделей модального і оптимального управління, одержано умови розв'язності задачі та виявлено їх зв'язок з властивістю функціональної спостерігаємості по входу.

Розвинено метод параметричної оптимізації обернених моделей з використанням мінімальної апріорної інформації в статистичній та нестатистичній формах.

Одержано рівняння дискретних оптимальних обернених систем у вигляді нових типів стохастичних і мінімакських рекурентних алгоритмів фільтрації.

Запропоновано ефективну процедуру аналітичного конструювання багатовимірних комбінованих систем на основі методу ОДМ.

Виявлено узагальнений принцип алгебраїчної розподілимості в задачах синтезу комбінованих систем зі спостерігачами збурень і на його основі обгрунтовано можливість декомпозиції задачі синтезу.

Виявлено зв'язок гранично досяжної точності управління в умовах непрямого вимірювання збурень з параметрами об'єкту (насамперед зі ступенем немінимально-фазовості), запропоновано методику її кількісної оцінки.

Теоретично обгрунтовано можливість компенсації взаємозв'язків в структурно-складних системах з використанням обернених моделей, запропоновано методику побудовання областей стійкості в просторі

параметрів, що настроюються, на основі аналізу агрегованих моделей порівняння й кількісної оцінки досяжного ступеню компенсації за умови заданих вимог до динамічних характеристик системи.

Практична цінність роботи полягає у створенні достатньо універсальної та цілісної методики проектування багатовимірних комбінованих систем управління технологічними процесами, відмітними рисами якої є:

- можливість використання непрямих вимірювань і досить грубої апріорної інформації, що не вимагає побудування та ідентифікації моделей збурень;
- можливість ефективної формалізації і алгоритмізації побудування структур компенсуючих регуляторів та спостерігачів збурень;
- можливість раціонального вибору множин змінних, що вимірюються та регулюються, з використанням установлених конструктивних критеріїв структурної невиродженості і розв'язності задач синтезу;
- зведення до мінімуму кількості параметрів, що настроюються, у синтезованих структурах, функціонально подібних багатовимірним ПІД-регуляторам;
- можливість оцінки на етапі проектування потенційно досяжної і реалізуємої точності управління.

Запропоновані методи реалізовані у вигляді комплексу нових типів рекурентних алгоритмів цифрової обробки вимірюваної інформації та управління, які відрізняються простотою обчислювальної реалізації і стійкістю до похибки початкових даних.

Реалізація запропонованих методів при розробці елементів математичного та програмного забезпечення АСУ ТП в ряді галузей промисловості дозволила значно підвищити точність непрямих вимірювань і компенсації збурень, знизити вимоги до точності і обсягу початкової інформації, значно розширити сферу застосування методів

непрямого вимірювання і комбінованого управління, зокрема, на об'єкти, немінимально-фазові по каналам управління і збурення.

Реалізація результатів роботи. Математичні методи, інженерні методики проектування, алгоритми і програми, що розроблено в дисертації, реалізовано під час виконання та впровадження в промисловість госпдоговірних і держбюджетних науково-дослідних робіт, а також договорів про творчу співдружність, які було виконано в період з 1983 по 1994 рік на кафедрі технічної кібернетики ХДПУ під керівництвом і при безпосередній участі автора.

Методику синтезу інваріантних спостерігачів та обернених систем використано при розв'язуванні обернених задач теплопровідності і переносу випромінювання при створенні методів та засобів безконтактної діагностики у технологічних процесах промислових стендових випробувань повітряно-реактивних двигунів (ПРД), що виконано відповідно до постанови директивних органів і впроваджено в Тураєвському машинобудівному конструкторському бюро "Союз" (м.Москва) Міністерства авіаційної промисловості СРСР (госпдоговори №№ 72992, 72973, 72147) при створенні автоматизованої системи стендових випробувань ПРД.

Методи синтезу спостерігачів невимірюваних збурень і синтезу нестационарних динамічних компенсуючих регуляторів реалізовано при розробці алгоритмів і програм відновлення крайових умов теплообміну та циклічного управління температурними режимами з метою імітації температурних полів в умовах випробувань, що виконано в рамках спільної програми АН УРСР та Мінавіапрому СРСР "Підвищення надійності і довговічності газотурбінних двигунів", тема 1.21: "Розробка автоматизованої системи випробувань на утому деталей газотурбінних двигунів" (наказ № 284-510 від 17.07.86 р.) та впроваджено на Запорізькому виробничому об'єднанні

"Моторобудівник" Мінавіапрому СРСР (госпдоговір № 72700), при проектуванні автоматизованої системи випробувань на термоміцність та малоциклово утому дисків газотурбінних двигунів.

Рекурентні алгоритми інваріантної фільтрації в умовах неповної інформації і спосіб побудування спрощених моделей теплоприймачів методом часткового усереднення реалізовано при розробці алгоритмів і програм для вимірювання нестационарних теплових течій та корекції динамічних похибок теплоприймачів, що виконано відповідно до п.1а.12 Міжгалузевої програми метрологічного забезпечення теплофізичних вимірювань на 1986-1990 р.р. і п.1.9.1.5.4 Координаційного плану науково-дослідних робіт по комплексній проблемі "Теплофізика та теплоенергетика" на 1986-1990 р.р. та впроваджено у Харківському державному науково-виробничному об'єднанні "Метрологія" (госпдоговір № 72941) при створенні комплексу засобів метрологічного забезпечення вимірювань течій теплового випромінювання високої інтенсивності та пристроїв для відтворення одиниць щільності теплової течії, а також вимірювань температури плазми МГД-генераторів.

Методи синтезу регуляторів, компенсуючих збурення, та систем автономного управління з оберненими моделями використані при створенні елементів математичного і програмного забезпечення АСУ ТП відділень абсорбції та дистиляції содового виробництва, що забезпечують управління температурними режимами аміачного циклу, які було розроблено відповідно договору про творчу співдружність з НДІОХІМ Міністерства промисловості України (м. Харків) та впроваджено на Славянському ПО "Хімпром" і Кримському содовому заводі.

Методи синтезу цифрових розв'язуючих компенсаторів з обмеженими керуючими діями були використані при розробці нових алгоритмів управління рівнем рідини в елементах технологічного обладнання енергоблоків ТЕС та АЕС, а також динамічних моделей і стратегії

обслуговування КТС АСУ енергоблоків, що використовуються Інститутом надійності та безпеки технологічних систем (м. Харків).

Методику математичного моделювання і управління складними замкнутими системами обслуговування використано при проектуванні автоматизованих комплексів технологічного обладнання для виробництва електродвигунів у НДІТЕлектромаш (м. Харків).

Методи розв'язання обернених задач динаміки систем з розподіленими параметрами реалізовано при створенні комплексу програм ідентифікації фізичних полів по неповним даним, який було розроблено відповідно наказу Мінвузу України № 78 від 21.03.91 р. (тема М-7202) та використано у Науково-технічному центрі електрофізичної обробки НАН України (м. Харків) при ідентифікації джерел забруднень в системах екологічного моніторингу, а також в учбовому процесі ХДПУ.

Акти впровадження із зазначенням техніко-економічного ефекту наведені у Додатку до дисертації. Загальний економічний ефект від впровадження розробок автора складає 2.074 млн. крб. у цінах 1991 року.

Матеріали дисертації частково використано в спеціальних лекційних курсах "Теорія управління та прийняття рішень" і "Автоматизація технологічних процесів", на кафедрі технічної кібернетики ХДПУ, а також при створенні циклу лабораторних робіт по зазначеним курсам і при виданні двох навчальних посібників по плану Міністерства освіти України.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на: X Всесоюзній нараді по проблемам управління (м.Алма-Ата, 1986), Всесоюзній конференції "Актуальні проблеми моделювання та управління системами з розподіленими параметрами (м.Одеса, 1987), республіканській конференції "Методологічні проблеми автоматизованого проектування й дослідження систем" (м.Се-

вастополь, 1987), IV Всесоюзному семінарі "Обернені задачі ідентифікації процесів теплообміну (м. Москва, 1988), Всесоюзній конференції "Математичне моделювання складних хіміко-технологічних систем" (м.Казань, 1988), V Всесоюзному симпозиумі "Методи теорії ідентифікації в задачах вимірювальної техніки і метрології" (м.Новосибірськ, 1989), Всесоюзній конференції "Методи і мікроелектронні засоби цифрової обробки сигналів" (м.Рига, 1989), V, VI Всесоюзних нарадах по управлінню багатозв'язними системами" (м.Тбілісі, 1984, м.Москва, 1990), I Всесоюзній конференції "Координуюче управління в технічних та природних системах" (М.Маяк,1991), Міжнародному семінарі IFAC "Evaluation of Adaptive Control Strategies in Industrial Application" (м.Тбілісі), Міжнародному семінарі IMASC/IFAC "Methods and Software for Automatic Control Systems" (м.Іркутськ, 1991), Міжнародній конференції IEEE "Energy, Communication and Control Systems" (Індія, м.Делі, 1991), Міжнародному семінарі IEEE "Advanced Motion Control" (Японія, м.Нагойя,1992), Європейській конференції по управлінню "European Control Conference" (Нідерланди, м.Гронінген, 1993), Міжнародних конференціях "MicroCAD-System" (Венгрія, м.Мішкольц, 1991, м. Харків, 1993), Міжнародному симпозиумі IFAC "Intelligent Components and Instruments for Control Applications" (Венгрія, м.Будапешт, 1994), VII Міжнародному конгресі "Information Tehnology Vision" (Індія, м.Делі, 1993), Міжнародній літній школі "Computer Integrated Manufacturing and Industrial Automation" (Греція, м.Патри, 1994), Республіканській конференції "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань" (м. Харків, 1994), I Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика-94" (м.Київ, 1994).

Публікації. Загальний зміст дисертації опубліковано в 78 друкованих працях, серед яких два навчальних посібника, 44 статті та 31 теза доповідей.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 6 розділів і висновків, викладених на 266 сторінках друкованого тексту, списку літератури із 184 найменувань та додатку, а також ілюструється 58 рисунками.

Особистий внесок у розробку наукових результатів.

На захист виносяться наступні положення, які здобуті особисто автором:

1. Методологія аналітичного конструювання багатовимірних комбінованих систем з оберненими моделями.
2. Новий принцип побудови спостерігачів збурень і компенсуючих регуляторів, які не потребують завдання математичних моделей збурень.
3. Конструктивні алгебраїчні критерії розв'язності задач структурно-параметричного синтезу обернених моделей та розв'язуючих компенсаторів на їх основі.
4. Методи параметризації і регуляризації рівнянь обернених моделей, що ґрунтуються на теорії інваріантних спостерігачів.
5. Методика декомпозиції задач параметричного синтезу комбінованих систем з оберненими моделями та процедури їх оптимізації.
6. Принцип побудови та параметричної оптимізації децентралізованих систем автономного управління на базі методу ОДМ.
7. Новий підхід до оцінки граничної (потенційно досяжної) точності компенсації збурень та взаємозв'язків на етапі проектування.
8. Принципи побудови алгоритмів комбінованого керування неперервними технологічними процесами в умовах неповної інформації на базі методу обернених моделей і результати розв'язання практичних задач комбінованого управління параметричного синтезу і оптимізації відповідних систем.

ЗМІСТ РОБОТИ

В першій главі роботи розглянуто особливості комбінованого управління технологічними процесами.

В зв'язку з тим, що процеси функціонування технологічних об'єктів управління (ТОУ) характеризуються наявністю постійно діючих збурень, обумовлених нестабільністю інтенсивності і складу вхідних матеріальних потоків сировини, параметрів технологічного обладнання, його режимів та навантаження, особливого значення набуває розробка методів управління, які забезпечують суттєве зниження їх впливу.

Проблеми, що виникають за цих обставин, проілюстровано на прикладах вивчаємих в роботі задач управління процесами хімічної технології (стабілізація температурних режимів процесів абсорбції та дистиляції аміачного циклу содового виробництва з урахуванням збурень по витратам фільтрової рідини і температури та складу парогазової суміші), задач управління теплоенергетичним обладнанням (регулювання рівня рідини в парогенераторах АЕС з урахуванням збурень по витратам і тиску пара), задач управління температурними режимами під час випробувань на термоміцність елементів авіаційних двигунів з урахуванням збурюючих дій, що обумовлено умовами проведення випробувань.

В роботі виконана класифікація методів синтезу систем управління в умовах постійно діючих збурень в залежності від обсягу наявної апріорної та поточної інформації і надана порівняльна оцінка методів, при цьому виділені два основних напрямки:

методи мінімізації впливу збурень, що ґрунтуються на використанні наявної апріорної інформації як в статистичній, так і в нестатистичній формах;

методи компенсації впливу збурень, що базуються на використанні додаткової поточної інформації про конкретні реалізації

збурень, яка получена їх безпосереднім вимірюванням (комбіноване управління), або оцінювання по непрямим вимірюванням на основі апріорних математичних моделей збурень.

В практичному відношенні досить перспективним є підхід, пов'язаний з відновленням та компенсацією збурень без використання їх точних математичних моделей на основі концепції обернених задач динаміки, що розвинута в роботах П.Д. Крутько. Ідея використання теорії обернених операторів для поданого класу задач автоматичного управління була запропонована Г.Є. Пуховим та К.Д. Жуком. В їх роботах показано принципову можливість компенсації збурень в подібному класі систем без використання їх апріорних математичних моделей і встановлено зв'язок методу з класичною теорією інваріантності.

Однак, не дивлячись на безумовну теоретичну привабливість методу, його практичне застосування в задачах управління технологічними процесами напштовхується на ряд труднощів як обчислювального (побудування обернених операторів для багатовимірних ТОУ), так і принципового характеру (висока чутливість синтезованих систем до відхилення параметрів ТОУ, нестійкість для немінімально-фазових об'єктів, тощо).

На основі проведеного аналізу сформульовано комплекс задач по узагальненню і розвитку методів управління, що використовують обернені моделі каналів ТОУ з метою забезпечення їх практичної реалізуємості в задачах управління багатовимірними й структурно-складними ТОУ.

Суть запропонованої автором методики полягає в поєднанні розроблених методів побудування параметризованих мінімальних реалізацій обернених систем в просторі станів та методів їх параметричного синтезу і оптимізації відповідно вимогам стійкості, точності, динамічної якості та гнучості.

У другій главі з метою виявлення притаманних методу обернених моделей обмежень та умов застосування в роботі виконано його теоретичне узагальнення й обґрунтування стосовно широкого класу лінійних багатовимірних об'єктів, що описуються операторними рівняннями:

$$y_1(t) = \Omega_{11}(u)(t) + \Omega_{12}(w)(t), \quad y_2(t) = \Omega_{21}(u)(t) + \Omega_{22}(w)(t). \quad (1)$$

Закон управління, який забезпечує відтворення регулює- мими змінними $y_1(t)$ командних впливів $y_1^*(t)$ і компенсацію збурень $w(t)$, який використовує лише інформацію про вимірювані змінні $y_2(t)$, має вигляд

$$u^*(t) = \Omega_{11}^{-1}(\kappa_1^*)(t), \quad \kappa_1^*(t) = y_1^*(t) - \Omega_{12}^{-1}(\hat{w})(t), \quad (2)$$

$$\hat{w}(t) = \Omega_{22}^{-1}(\kappa_2)(t), \quad \kappa_2(t) = y_2(t) - \Omega_{21}(u)(t),$$

де обернені оператори Ω_{11}^{-1} , Ω_{22}^{-1} , надалі іменуватимуться оберненими динамічними моделями (ОДМ) каналів управління та збурення.

В роботі сформульовані умови реалізуємості методу ОДМ, які можливо розподілити на умови "потенційної" і практичної реалізуємості.

Умови потенційної реалізуємості, які забезпечують в ідеальному випадку виконання рівності $y_1(t) = y_1^*(t)$ включають вимоги: оберненості каналів ТОУ, структурної невиродженості та фізичної реалізуємості. Умови "потенційної" реалізуємості, власно кажучи, еквівалентні умовам здійсненності абсолютної інваріантності, до того ж, умова структурної невиродженості гарантує можливість виключення з (2) оцінок збурень і одержання рівнянь розв'язуючого компенсатора (РК) у вигляді $u(t) = \Omega_d(y_1^*, y_2)(t)$.

Умови практичної реалізуємості, що визначають можливість використання методу ОДМ для побудови реальних систем управління та включають в себе вимоги стійкості та заданої динамічної якості обернених моделей, грубості ОДМ по відношенню до варіації параметрів ТОУ, коректності ОДМ, що визначає чутливість розв'язань по відношенню до похибок вимірювання $y_1^*(t)$, $y_2(t)$.

Показано, що структура рівнянь обернених моделей в просторі станів обумовлюється основними структурними параметрами ТОУ, а саме, матрицями відносних порядків $A = (\alpha_{ij})$ та індексів спостережності по входу $B = (\beta_i)$, $i = 1, 2$. За умови виконання вимог оберненості математичної моделі багатовимірною ТОУ

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A^0 x(t) + B_1^0 u(t) + B_2^0 w(t), & y_1(t) &= C_1^0 x(t) + D_{11}^0 u(t) + D_{12}^0 w(t), \\ y_2(t) &= C_2^0 x(t) + D_{21}^0 u(t) + D_{22}^0 w(t), & x(0) &= x_0, \quad t \geq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

для якого $\dim u = m_1$, $\dim w = m_2$, $\dim y_i = q_i$, рівняння регулятора, який компенсує безпосередньо вимірювані збурення при $\alpha_{11} \leq \beta_1 \leq n = \dim x$, одержано у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= (A^0 - B_1^0 \bar{D}_{11}^{-1} \bar{C}_1^0) x_c(t) + M_1^2(p) w(t) + B_1^0 \bar{D}_{11}^{-1} L_1(p) y_1^*(t), \\ u^*(t) &= \bar{D}_{11}^{-1} [L_1(p) y_1^*(t) - \bar{C}_1^0 x_c(t) - M_1^1(p) w(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

де матричні параметри \bar{D}_{11} , \bar{C}_{11} та операторні поліноми $L_1(p)$, $M_1^i(p)$, $p = d/dt$, такі, що $\deg L_1(p) = \beta_1$, $\deg M_1^i(p) = \delta_i = \max\{0, \beta_1 - \alpha_{12}\}$ визначаються на основі матриці параметрів Маркова системи

$$S_{ij}^0(0) = D_{ij}^0, \quad S_{ij}^0(\alpha) = C_i^0 (A^0)^{\alpha-1} B_j^0, \quad 0 \leq \alpha \leq n, \quad (5)$$

$$\bar{S}_{11}(\alpha_{11}, \beta) = \begin{pmatrix} S_{11}(\alpha_{11}) & \dots & 0 \\ \vdots & & \\ S_{11}(\beta) & \dots & S_{11}(\alpha_{11}) \end{pmatrix}.$$

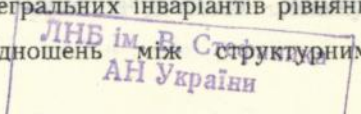
Встановлено, що за умови використання комбінованого закону управління $u(t) = K(p)e(t) + u^*(t)$, $e(t) = y_1^*(t) - y_1(t)$ помилка регулювання задовольняє системі диференціальних рівнянь,

$$L_1(p)e(t) = -\bar{C}_1^0 \dot{e}(t) - \bar{D}_{11} K(p)e(t), \quad \dot{e}(t) = A^0 e(t) + B_1^0 K(p)e(t), \quad (6)$$

які мають балансну властивість

$$\bar{C}_1^0 (A^0)^{-1} \dot{e}(t) + \bar{L}_1(p)e(t) = 0, \quad \bar{L}_1(p) = L_1(p) - (\bar{C}_1^0 (A^0)^{-1} B_1^0 - \bar{D}_{11}) K(p). \quad (7)$$

В роботі одержано вираз для інтегральних інваріантів рівняння похибки (6) для всіляких співвідношень між структурними



параметрами і показано, що в ряді випадків усталене значення помилки залежить від початкових значень, інакше кажучи, в системі має місце статизм регулювання по початковим умовам.

В умовах наявності лише непрямих вимірювань оцінка збурюючих дій без використання їх апіорних моделей, що формуються за допомогою спостерігача збурень (СЗ) на базі ОДМ відповідного каналу

$$\begin{aligned}\hat{x}(t) &= (A^0 - B_2^0 \bar{D}_{22}^+ \bar{C}_2)x(t) + B_2^0 \bar{D}_{22}^+ L_2(p)y_1(t) + [B_1^0 - B_2^0 \bar{D}_{22}^+ M_2(p)]u(t) \\ \hat{w}(t) &= \bar{D}_{22}^+ [L_2(p)y_2(t) - \bar{C}_2 \hat{x}(t) - M_2(p)u(t)], \\ M_1^i(p)\hat{w}(t) &= L_2^i(p)y_2(t) - \bar{C}_2^i \hat{x}(t) - M_2^i(p)u(t),\end{aligned}\quad (8)$$

де $\deg L_2(p) = \deg L_2^i(p) = \delta_2 = \max\{\beta_2, \delta_1 + \alpha_{22}\}$, $\deg M_2(p) = \deg M_2^i(p) = \delta =$

$= \max\{0, \delta_2 - \alpha_{21}\}$, "+" - знак псевдообернення матриці. Параметри спостерігача (8) обчислюють на основі матриці (5) по наведеним в роботі формулам.

Встановлено, що помилка відновлення описується однорідними рівняннями

$$\begin{aligned}\dot{e}_x(t) &= (A^0 - B_2^0 \bar{D}_{22}^+ \bar{C}_2)e_x(t), \quad e_w(t) = -\bar{D}_{22}^+ \bar{C}_2 e_x(t), \\ e_x(t) &= x(t) - \hat{x}(t), \quad e_w(t) = w(t) - \hat{w}(t).\end{aligned}\quad (9)$$

В роботі показано, що рівняння (4), (8) можуть бути об'єднані в одне рівняння розв'язуючого компенсатору виключенням проміжних оцінок збурюючих дій при виконанні умови

$$\text{rank } M_8 = m_1, \quad M_8 = \lim_{|s| \rightarrow \infty} s^{-\delta} [I_{m_1} - \bar{D}_{11}^{-1} M_2^1(s)] \quad (10)$$

при $\beta_1 \geq \alpha_{12}$, $\delta_2 \geq \alpha_{21}$, де $\delta = \deg M_2^1(p)$. Умову (10) можна трактувати як алгебраїчний критерій структурної невиводженості.

Аналітично сконструйований розв'язуючий компенсатор має структуру багатовимірного ПІД-регулятора вимірності $(q_1 + q_2)m_1$ та порядку $2n + \delta m_1$, що використовують похідні командної дії до порядку β_1 включно та похідні вимірюваних змінних до порядку δ_2 .

Одержані достатні умови існування розв'язуючого компенсатору, в структурі якого використовуються диференціатори порядку не вище заданого. Ці умови фактично являють собою алгебраїчні критерії здійсненності абсолютної інваріантності в багатовимірних системах (алгебраїчний аналог принципу двохканальності Б.М.Петрова).

Проведені дослідження динамічних властивостей аналітично сконструйованих ОДМ встановлюють вироджений характер їх рівнянь, що зв'язано з наявністю проєкційних операторів у відповідних рівняннях. Розроблено методику зниження порядку ОДМ до $n - q_i \alpha_i$ з використанням методу розщеплення і властивостей інтегральних много статностей, що дозволяє знизити порядок розв'язуючого компенсатора до $n_d = 2n - \alpha_{11}q_1 - \alpha_{22}q_2 + \delta m_1$. Оскільки спектр ОДМ збігається з нулями відповідного каналу ТОУ, внаслідок чого стійкість спостерігача (9) і компенсатора (5) буде мати місце лише для об'єктів, мінімально-фазових по каналам управління та збурень. Крім того, за умови використання ОДМ в структурі комбінованої системи трапляється скорочення нулів та полюсів, що призводить до втрати грубості. Таким чином, виникає необхідність в розробці методів синтезу ОДМ з заданими динамічними властивостями.

Розглянуто також дискретні аналоги комбінованих систем з ОДМ, до того ж для ТОУ, що не містять чистого запізнення, можна обмежитися розглядом випадку $\beta_i \leq 1$. Показано, що за умови забезпечення фізичної реалізованості дискретного розв'язуючого компенсатора зв'язано з введенням штучного загалювання $\beta_1 + \beta_2$, що призводить до виникнення залежності помилки регулювання від приросту збурюючих впливів за відповідне число кроків дискретизації. Однак, для збурень, що змінюються повільно порівняно з частотою дискретизації збурень, метод ОДМ в принципі дозволяє досягнути достатньо високої точності.

Для дискретних систем також виникає необхідність в корекції динамічних властивостей ОДМ. Ця проблема набуває ще більшого значення, оскільки, як показано К. Остромом, за умови достатньо швидкої дискретизації дискретна модель будь-якого неперервного об'єкту з ексцесом полюсів не меншим двох, є немінимально-фазовою незалежно від розташування нулів неперервної передаточної функції.

Ключовим моментом роботи, який визначає практичну реалізованість методу, є використання ОДМ, що настроюються.

У *третьій главі* розглянуто задачі синтезу обернених моделей. Запропонована в роботі методика синтезу ОДМ включає в себе етап структурного синтезу, який дозволяє одержати рівняння оберненої моделі з точністю до набору довільних параметрів, що варіюються (настроюються), і етап параметричного синтезу, який включає до себе вибір зазначених параметрів за умови забезпечення заданих динамічних властивостей оберненої моделі, включаючи вимоги до якості перехідних процесів та вимоги до завадостійкості в умовах наявності похибок вимірювань. Розроблена методика базується на теорії динамічних спостерігачів для систем з невідомим вхідним сигналом.

Розв'язання задачі структурного синтезу ОДМ розглядається стосовно початкової динамічної системи загального вигляду

$$p\mathbf{x} = A\mathbf{x} + B\mathbf{w} + B_0\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = C\mathbf{x} + D\mathbf{w} + D_0\mathbf{u} \quad (11)$$

де \mathbf{w} та \mathbf{u} - відповідно невідомий та відомий вхідні сигнали, \mathbf{y} - відомий вихідний сигнал, p - оператор диференціювання в неперервному і зрушення на шаг вперед у дискретному випадку. Розв'язання задачі ілюструється на прикладі найбільш розповсюдженого в практичних задачах випадку, коли $\beta \leq I$, тобто $\text{rank}(D^T \mid (CB)^T) = m = \dim \mathbf{w}$.

Без обмеження загальності можна узяти, що $\text{rank } B = m = \dim \mathbf{w}$, $\text{rank } C = q = \dim \mathbf{y}$.

Динамічний спостерігач вигляду

$$p\hat{\mathbf{x}} = F\hat{\mathbf{x}} + G\mathbf{y} + G_0\mathbf{u}, \quad \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + H\mathbf{y} + H_0\mathbf{u} \quad (12)$$

будемо називати інваріантним по відношенню до невимірюваного вхідного впливу w , якщо помилка оцінювання не залежить від w .

Тоді оцінку невідомого сигналу w одержано у вигляді

$$\begin{aligned} p\hat{x} &= F\hat{x} + (G - FH)y + H(py) + (G_0 - FH_0)u_0 + H_0(pu_0), \\ \hat{w} &= [\tilde{B}(F - A) - \tilde{D}C]\hat{x} + [\tilde{B}(G - FH) + \tilde{D}]y + \tilde{B}H(py) + \\ &+ [\tilde{B}(G_0 - FH_0 - B_0) - \tilde{D}D_0]u_0 + \tilde{B}H_0(pu_0), \end{aligned} \quad (13)$$

де $\tilde{B} = P_D(BP_D)^+$, $P_D = I_m - D^+D$, $\tilde{D} = D^+ - P_D(BP_D)^+BD^+$.

Рівняння динамічної системи (13) визнаємо як рівняння оберненої моделі для (11).

В роботі отримано умови інваріантності похибки оцінювання по відношенню до w у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} (I_n - HC)A - F(I_n - HC) &= GC, \quad (I_n - HC)B - (G - FH)D = 0, \quad (14) \\ (I_n - HC)B_0 - (G - FH)D_0 - G_0 + FH_0 &= 0, \quad HD_0 + H_0 = 0, \quad HD = 0, \end{aligned}$$

що є узагальненням відомих умов Луенбергера і переходять в останні при $B=0$, $D=0$, інакше кажучи, відсутності невідомих вхідних сигналів.

За умови виконання вимог $\text{rank } D = m \geq q$ або $\text{rank } (CB) = m > q$ при $D = 0$ розв'язання рівнянь (14) получено у вигляді

$$\begin{aligned} D \neq 0 \quad (\beta = 0): & \quad D = 0, \quad CB \neq 0 \quad (\beta = 1): \\ F &= A - BD^+C - L\Omega_D C, & F &= PA - LC, \quad G = PAH - L\Omega \\ G &= BD^+ + L\Omega_D, & H &= B(CB)^+, \quad H_0 = -HD_0, \\ H &= H_0 = 0, \quad \Omega_D = I_q - DD^+, & \Pi &= I_n - B(CB)^+C, \quad (15) \\ G_0 &= B_0 - BD^+D_0 - L\Omega_D D_0, & \Omega &= I_q - (CB)(CB)^+, \\ & & G_0 &= \Pi B_0 - GD_0. \end{aligned}$$

Тут L - довільна матриця параметрів, що варіюються, розміром $(n \times q)$. Коли виконано умови (14), то похибка відновлення вхідного сигналу задовольняє однорідному рівнянню.

$$\begin{aligned}
 pe_x &= F(L)e_x, & e_x(0) &= e_{x_0}, \\
 e_w &= -D^+Ce_x, & \alpha &= \beta = 0, \\
 e_w &= -[(CB)^+CA + B^+LC]e_x, & \alpha &= \beta = 1.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Таким чином, система (13) являє собою параметризовані рівняння оберненої моделі, які можна трактувати як результат введення в структуру "класичних" обернених систем коректуючих обернених зв'язків по стану з матричними коефіцієнтами посилення L .

В роботі отримані також рівняння обернених моделей зниженого порядку $n - q$ при $\beta = 1$, параметризовані матрицею агрегування R :

$$p\bar{x} = R\Pi\xi_1 + RB(CB)^+(p\xi_2), \quad \hat{w} = -[(CB)^+ + B^+P\Omega][C\xi_1 - (p\xi_2)], \tag{17}$$

$$\xi_1 = A Q \bar{x} + A P y + (B_0 - A P D_0) u, \quad \xi_2 = y - D_0 u,$$

$$(P \mid Q) = \begin{pmatrix} P_1 & Q_1 \\ P_2 & Q_2 \end{pmatrix}, \quad P_1 = I_q, \quad Q_1 = O_{q \times n-q}, \quad R = Q_2^{-1}(-P_2 \mid I_{n-q}),$$

а P_2 та Q_2 - довільні матриці розміром $(n-q \times q)$ та $(n-q \times n-q)$ відповідно, причому $\det Q_2 \neq 0$.

Відповідні рівняння для похибки відновлення мають вигляд

$$p\bar{e}_x = \bar{F}(R)\bar{e}_x, \quad e_w = -[(CB)^+ + B^+P\Omega]CAQ\bar{e}_x, \tag{18}$$

де $\bar{F}(R) = R\PiAQ$ - матриця динаміки ОДМ зниженого порядку.

Отримане параметризоване розв'язання задачі структурного синтезу ОДМ дозволяє формалізувати задачу їх параметричного синтезу, що полягає в виборі настроєчних матриць L та R з умов одержання заданого спектру матриці динаміки $\alpha[F(L)] = \sigma^*$ або $\alpha[\bar{F}(R)] = \bar{\sigma}^*$. В роботі одержано умови розв'язності задачі параметричного синтезу і виявлено їх зв'язок з умовами функціональної спостерігаємості по входу системи (11). Запропоновано обчислювальний алгоритм для перевірки виконання умов функціональної спостерігаємості.

Розглянуто різні підходи до розв'язання задач параметричного синтезу ОДМ і отримано наявні розв'язки з використанням методу модального управління, еталонної моделі та еквівалентного оптимального управління за умови структурних обмежень. Наведено розв'язок, який одержано на основі запропонованого в роботі аналітичного розв'язання

загальної задачі модального управління $\det[sI_n - F(L)] = \Delta^*(s)$ де $\Delta^*(s)$ - заданий характеристичний поліном синтезуємої моделі. В роботі одержано основне рівняння запропонованого модального синтезу $\Delta^*(\text{ПА}) = K_y(F, L) \Gamma(\sigma^*) K_n(\text{ПА}, C)$, де K_y та K_n - матриці управляємості та спостерігаємості, побудовані на відповідних матрицях, $\Gamma(\sigma^*)$ - ганкелева матриця розміром $(nq \times nq)$, побудована на коефіцієнтах бажаного характеристичного поліному.

Загальний розв'язок задачі відносно матриці варійованих параметрів L отримано у вигляді

$$L = \Delta^*(\text{ПА})[\Psi^+]_q + \tilde{L}_q \left(I_q - [\Psi^T]_q^T [\Psi^+]_q \right), \quad \Psi = \Gamma(\sigma^*) K_n(\text{ПА}, C), \quad (19)$$

де \tilde{L}_q - допоміжна довільна матриця розміром $(n \times nq)$, а за допомогою $[\cdot]_q$ позначена операція виділення q перших стовпців відповідних матриць.

Перевагою одержаного розв'язку є його "подвійна" параметризація, яка дозволяє здійснити послідовне зв'язування варійованих параметрів при розв'язанні наступних задач синтезу.

В роботі наведено, що умови розв'язності задачі параметричного синтезу ОДМ порушуються в одному з найбільш важливих в практичному відношенні випадків рівності числа вхідних та вихідних змінних $m = q$. Запропоновано спосіб модифікації рівнянь обернених моделей, названий регуляризацією ОДМ, що ґрунтується на заміні точних умов (14) приблизними умовами квазіінваріантності $B - HCB = \varepsilon B$, де параметр регуляризації $0 \leq \varepsilon \leq I$ є додатковий налагоджуваний параметр. У цьому випадку рівняння динаміки похибки відновлення мають властивість "інваріантності до ε " відносно невідомих вхідних сигналів

$$pe_x = F(\varepsilon, L)e_x + \varepsilon Bw, \quad F(\varepsilon, L) = \Pi(\varepsilon)A - LC, \quad (20)$$

$$e_w = -[(1 - \varepsilon)(CB)^+CA + B^+LC]e_x + \varepsilon w,$$

а матриця динаміки ОДМ $F(\varepsilon, L)$ залежить від "регуляризованого" проєктору $\Pi(\varepsilon) = I_n - (1 - \varepsilon)B(CB)^+C$. Показано, що за умови $\varepsilon > 0$, $m=q$ задача параметричного синтезу $\alpha[F(\varepsilon, L)] = \sigma^*$ має розв'язок, до того ж елементи матриці розв'язку $L^*(\varepsilon)$ є дрібно-раціональними функціями додаткового настроєчного параметру ε . Наведено також, що введення настроєчного параметру дозволяє забезпечити грубість синтезуємої ОДМ, оскільки її полюси не збігаються з нулями системи, що обернюється (11).

Відповідно загальній методології регуляризації А.Н.Тихонова, вибір параметру ε необхідно здійснювати із врахуванням точності вимірювання вихідних змінних. Розглянуто різні підходи до вибору оптимальних значень настроєчного параметру, що визначаються наявною апіорною інформацією про похибки вимірювання та відновлюємий сигнал. Так, при завданні апіорної інформації в статистичній формі оптимальне значення настроєчного параметру знаходиться з умов

$$J(\varepsilon) = \|H_w\|_2^2 \sigma_w^2 + \|H_v\|_2^2 \sigma_v^2, \quad H_w = G_w \Phi_w, \quad H_v = G_v \Phi_v, \quad (21)$$

де G_w , G_v - матричні передаточні функції похибки відновлення по вхідному сигналу w та похибкам вимірювання v , Φ_w та Φ_v - нормовані спектральні щільності, σ_w^2 , σ_v^2 - дисперсії відповідних сигналів.

В роботі наведено також розв'язок задач синтезу оптимальних обернених моделей в умовах невизначенності при завданні апіорної інформації як в статистичній, так і в нестатистичній формах. Одержані розв'язки наведені у вигляді рекурентних алгоритмів відновлення, що є узагальненням відомих алгоритмів калмановської та мінімаксної фільтрації. Отримано умови існування стаціонарних фільтрів і розроблена методика їх регуляризації.

Остаточний вибір оптимальних значень настроєчних параметрів здійснюється чисельними методами на основі компромісу між вимогами якості перехідних процесів в ОДМ та точності відновлення вхідного сигналу. В цьому разі можливість використання досить грубої апріорної інформації обумовлена тим, що вона використовується не для вибору структури моделі, а для її параметричної настройки.

У четвертій главі розглянуто задачі аналітичного конструювання комбінованих систем з оберненими моделями. На основі запропонованого підходу до синтезу ОДМ розроблено методи структурно-параметричного синтезу багатовимірних комбінованих систем з оберненими моделями. У випадку, коли збуджуючі дії доступні безпосередньому вимірюванню (задачі управління по збуренню багатовимірним об'єктом) рівняння компенсуючого регулятора (КР) для об'єкту вигляду (3) при $\alpha_{11} = \beta_4$ держано у вигляді

$$\dot{x}_C(t) = F_1(\varepsilon_1, L_1)x_C(t) + L_1 y_1^*(t) + H_1(\varepsilon_1) \dot{y}_1^*(t) + \Pi_1(\varepsilon_1) B_2^0 \omega(t), \quad (22)$$

$$u^*(t) = C_1(\varepsilon_1, L_1)x_C(t) + (B_1^0)^+ L_1 y_1^*(t) + (1 - \varepsilon_1) S_{11}^{-1} [\dot{y}_1^*(t) - S_{12} \omega(t)],$$

$$F_1(\varepsilon_1, L_1) = \Pi_1(\varepsilon_1) A^0 - L_1 C_1^0, \quad \Pi_1(\varepsilon_1) = I_n - H_1(\varepsilon_1) C_1^0,$$

$$H_1(\varepsilon_1) = (1 - \varepsilon_1) B_1^0 S_{11}^{-1}, \quad C_1(\varepsilon_1, L_1) = -(1 - \varepsilon_1) S_{11}^{-1} C_1^0 A^0 - (B_1^0)^+ L_1 C_1^0$$

при використанні ОДМ повного порядку та

$$\dot{\bar{x}}_C(t) = \bar{F}_1(\varepsilon_1, R_1) \bar{x}_C(t) + R_1 \Pi_1(\varepsilon_1) A^0 P_1 y_1^*(t) + R_1 H_1(\varepsilon_1) \dot{y}_1^*(t) + R_1 \Pi_1(\varepsilon_1) B_2^0 \omega(t),$$

$$u^*(t) = \bar{C}_1(\varepsilon_1, R_1) [C_1^0 A^0 Q_1 \bar{x}_C(t) + C_1^0 A^0 P_1 y_1^*(t) - \dot{y}_1^*(t) + S_{12} \omega(t)], \quad (23)$$

$$\bar{F}_1(\varepsilon_1, R_1) = R_1 \Pi_1(\varepsilon_1) A^0 Q_1, \quad \bar{C}_1(\varepsilon_1, R_1) = -(1 - \varepsilon_1) S_{11}^{-1} + \varepsilon_1 (B_1^0)^+ P_1,$$

де ε_1, L_1 та ε_1, R_1 - настроєчні параметри регуляторів, до того ж P_1, Q_1 відповідно (17) однозначно визначаються вибором R_1 .

За умови виконання вимог розв'язності задачі параметричного синтезу динамічні властивості компенсуючих регуляторів (22), (23), що визначаються спектрами матриць, можуть бути скоректовані потрібним чином шляхом вибору настроєчної матриці L_1 методом модального управління.

Для комбінованого закону управління $u = K_1 e + u^*$, де K - матриця коефіцієнтів посилення стабілізуючої компоненти, одержано рівняння для похибки регулювання

$$\begin{aligned}\dot{\Theta}_1(t) &= (A^0 - B_1^0 K_1 C_1^0) \Theta_1(t) + (B_1^0 K_1 - P_B L_1) \Theta_2(t), \\ \dot{\Theta}_2(t) &= -(C_1^0 L_1) \Theta_2(t) + \varepsilon_1 f_1(t), \quad e(t) = \Theta_2(t) - C_1^0 \Theta_1(t), \\ f_1(t) &= \dot{y}_1^*(t) - C_1 A^0 x_C(t) - S_{12}^0 w(t), \quad P_B = I_n - B_1 B_1^+, \end{aligned} \quad (24)$$

для системи з регулятором повного та

$$\begin{aligned}\dot{\Theta}_1(t) &= (A^0 - B_1^0 K_1 C_1^0) \Theta_1(t) + \varepsilon_1 P_1 \bar{f}_1(t), \quad e(t) = -C_1^0 \Theta_1(t), \\ \bar{f}_1(t) &= \dot{y}_1^*(t) - C_1^0 A^0 P_1 y_1^*(t) - C_1 A^0 \Theta_1 x_C(t) - S_{12}^0 w(t), \end{aligned} \quad (25)$$

для системи з регулятором зниженого порядку.

На основі аналізу динамічних властивостей похибки регулювання встановлено, що для мінімально-фазових по каналу управління ТОУ потенційно досяжна скільки завгодно висока точність управління, реально обмежена лише точностними характеристиками вимірювальних та регулюючих засобів, у той час як для немінімально-фазових по управлінню ТОУ існує принципове обмеження досяжної межі точності, що визначається локалізацією передаточних нулів об'єкту $\{s_i^0\}$. В роботі запропоновано для оцінювання досяжної точності управління по збуренню використовувати поняття "ступеня немінімально-фазовості" $\eta^0 = \max \{s_i^0\}$.

У випадку відсутності повної поточної інформації про збурення (непрямі вимірювання) запропонована методика аналітичного конструювання комбінованих систем включає в себе побудову спостерігачів збурень на основі ОДМ каналу збурення ТОУ, які не використовують апріорних моделей збурень. В роботі одержано рівняння спостерігачів повного і зниженого порядків. Так, у випадку

$$\begin{aligned}\beta_2 = 1, \quad m_2 \leq q_2 \text{ спостерігач збурення повного порядку має вигляд} \\ \dot{\hat{x}}(t) &= F_2(\varepsilon_2, L_2) \hat{x}(t) + L_2 y_2(t) + H_2(\varepsilon_2) \dot{y}_2(t) + \Pi_2(\varepsilon_2) B_1 u(t) \\ \hat{w}(t) &= C_2(\varepsilon_2) \hat{x}(t) + B_2^+ L_2 y_2(t) + (1 - \varepsilon_2) S_{22}^+ (\dot{y}_2(t) - S_{21} u(t)), \end{aligned} \quad (26)$$

і ε , по суті, узагальненням схеми "диференціальної виделки" на багатовимірний випадок. Характерною особливістю запропонованої мето-

дики є можливість корекції динамічних властивостей спостерігача (26) за рахунок вибору настроєчних параметрів ϵ_2, L_2 , що дозволяє при виконанні умов розв'язності задачі параметричного синтезу $\text{rank } S_{22} = m_2$, $\text{rank } K_n[\Pi_2(\epsilon_2)A, C_2] = n$ забезпечити стійке відновлення збурень і для немінімально-фазових по збуренню ТОУ.

В роботі одержано також алгебраїчні критерії структурної невиврожденості, виконання яких гарантує можливість виключення проміжних оцінок збурень та одержання рівнянь розв'язуючого компенсатору розмірності $2n - q_1 - q_2$.

Встановлено також, що в системах класу, що розглядається, має місце узагальнений принцип розділюваності, оскільки динаміка похибки відновлення

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) &= F_2(\epsilon_2 L_2) e_x(t) + \epsilon_2 B_2 w(t), \\ e_w(t) &= -(1 - \epsilon_2) S_{22}^+ C_2 A + B_2^+ L_2 C_2 e_x(t) + \epsilon_2 w(t) \end{aligned} \quad (27)$$

не залежить від динамічних властивостей контуру регулювання.

Таким чином, встановлені властивості багатовимірних комбінованих систем з ОДМ дозволили обґрунтувати можливість декомпозиції задачі їх структурно-параметричного синтезу і звести їх до послідовності традиційних задач модального управління по стану та по виходу менших розмірностей.

Запропонована методика аналітичного конструювання багатовимірних комбінованих систем включає в себе:

- перевірку умов розв'язності задач синтезу на основі критеріїв оберненості, функціональної спостерігаємості по входу та структурної невиврожденості;
- формування параметризованої структури КР, СЗ та РК на основі ОДМ відповідних каналів ТОУ;
- параметричний синтез КР та СЗ методами модального управління з одержанням проміжних розв'язків в параметричній формі, відповідній послідовному зв'язуванню параметрів проектування;

- *параметричний синтез замкнутої системи* методами модального управління за умови структурних обмежень з отриманням параметризованих розв'язків;

- *оптимізація настроєчних параметрів* шляхом мінімізації узагальненого показника точності керування, який враховує наявну інформацію про збуджуючі дії та похибки вимірювання.

В роботі розглянуто також особливості задач синтезу комбінованих систем з ОДМ з урахуванням нелінійності характеристик виконавчих пристроїв (характеристики з насиченням та релейні закони управління). Обґрунтовано можливість вібраційної лінеаризації нелінійних регулюючих органів в системах з ОДМ шляхом введення в структуру системи внутрішніх допоміжних автоколивних контурів, які утворюють вібраційні регулятори. Розроблена методика їх синтезу, виходячи з умов стійкості несиметричних автоколивань та ефективного заглушення швидкої вібраційної складової інерційною частиною ГОУ. Одержані рівняння для повільних складових сигналів управління (рівняння гармонічно лінеаризованих виконавчих підсистем), що дозволяють використовувати і в даному випадку розроблену методику синтезу комбінованих систем з ОДМ.

Докладно розглянуто задачі та методи синтезу комбінованих систем з розривними управліннями шляхом використання ковзних режимів із спеціальними властивостями. Використання ковзних режимів дозволяє синтезувати як виконавчі підсистеми з обмеженими управліннями, так і компенсуючі регулятори і спостерігачі збурень, що пов'язано з формальною подібністю вироджених рівнянь руху на ковзних режимах і проєкційними рівняннями динаміки обернених моделей. При цьому виникає надзвичайно важлива в практичному відношенні можливість виключення необхідності використання спеціальних диференціюючих фільтрів, оскільки повільні компоненти сигналів на ви-

ході розривних елементів включають в себе складові, пропорційні необхідним похідним.

П'ята глава присвячена розгляду синтезу децентралізованих систем з оберненими моделями. Традиційний підхід до розв'язування зазначених задач їх синтезу (А.Тітлі, Д.Шилак, М.Вукобратович) полягає в незалежному конструюванні локальних регуляторів з наступною оцінкою стійкості багатозв'язної системи, при цьому з метою зменшення дестабілізуючої дії взаємозв'язків вводять глобальний регулятор.

В роботі запропоновано та досліджено новий підхід до розв'язування задач синтезу децентралізованих систем, що ґрунтується на реалізації принципу компенсації взаємозв'язків. При цьому трактовка сигналів взаємозв'язків між підсистемами як еквівалентних збурень дозволила використати метод ОДМ для їх відновлення і компенсації.

З використанням моделі структурно-складного ТОУ, що складається з локальних підсистем

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_{ii}^0 x_i(t) + B_{ii}^0 u_i(t) + B_{2i}^0 z_i(t), \quad z_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \bar{C}_j^0 y_{ij}(t), \\ y_{ii}(t) &= C_{1j}^0 x_i(t), \quad y_{2i}(t) = C_{2j}^0 x_i(t), \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (28)$$

де $z_i(t)$ - сигнали взаємозв'язків, здобуто рівняння глобальних компенсуючих регуляторів та локальних розв'язуючих компенсаторів, встановлено умови їх існування і розв'язності відповідних задач параметричного синтезу.

Встановлено, що вектор похибок регулювання в структурно-складній системі описується системою рівнянь

$$\dot{\Theta}_i(t) = \Phi_{ii}^0 \Theta_i(t) + \varepsilon_{li} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \Phi_{ij}^0 \Theta_{ij}(t) + \varepsilon_{li} \Psi_i^0 \xi_i(t), \quad e_i = \Gamma_i^0 \Theta_i(t), \quad i = \overline{1, N} \quad (29)$$

де Φ_{ij}^0, Ψ_i^0 - певні матриці, що обчислюються по наведеним в роботі формулам, ε_{li} - настроєчні параметри локальних компенсуючих

регуляторів, а еквівалентні збурення $\xi_i(t)$ залежать від векторів змінних командних $y_{i1}^*(t)$ та їх похідних.

Наведено, що для мінімально-фазових локальних підсистем параметри ϵ_{i1} можуть бути обрані скільки завгодно малими, а рівняння похибки (29) відповідає системі із слабкими зв'язками, що в значному ступені полегшує виконання умов глобальної стабілізуємості. В загальному випадку у просторі настроєчних параметрів $\{\epsilon_{i1}\}$ виділяється область $D(\epsilon_{11}, \dots, \epsilon_{1N})$ стійкості структурно-складної багатозв'язної системи, а досяжний ступінь компенсації взаємозв'язків визначається раціональним вибором параметрів з цієї області.

З метою оцінки динамічних властивостей структурно-складної системи з ОДМ в роботі на основі методу векторних функцій Ляпунова одержано систему порівняння

$$\begin{aligned} \dot{\bar{v}} &= \Lambda \bar{v} + \epsilon M \bar{\xi}, \\ \bar{\xi} &= \text{colon}(\|\bar{\xi}_1\|, \dots, \|\bar{\xi}_N\|), \quad \epsilon = \max\{\epsilon_{i1}\}, \quad M = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_N), \quad \Lambda = \|\lambda_{ij}\|, \\ \lambda_{ij} &= \begin{cases} -\frac{1}{2} \eta_i, & i = j, \\ \epsilon \sigma_M(\Phi_{ij}^0), & i \neq j, \end{cases} \quad \mu_i = \sigma_M(\Psi_{ij}^0), \end{aligned} \quad (30)$$

де σ_M - максимальне сингулярне число відповідної матриці, η_i - ступінь стійкості локальних підсистем.

Характерні риси та особливості запропонованої методики компенсації взаємозв'язків проілюстровані в роботі на прикладі задачі автономного управління багатовимірними багатоканальними об'єктами $\dot{x}(t) = A^0 x(t) + B_1^0 u_1(t) + B_2^0 u_2(t)$, $y_1(t) = C_1 x(t)$, $y_2(t) = C_2 x(t)$, (31) що не втратила своєї актуальності. Необхідно підкреслити, що застосування на практиці відомої методики синтезу розв'язуючих компенсаторів в частотній області (У.Рей) наштовхується на істотні труднощі, пов'язані з необхідністю обернення багатовимірних передаточних матриць, втратою гнучкості та можливою нестійкістю системи.

В роботі одержано рівняння розв'язуючого компенсатору з ОДМ,

що забезпечує компенсацію взаємного впливу каналів за умови виконання умов структурної невивроженості. Показано, що матриця динаміки компенсатору $A^d(\varepsilon, L)$, яка залежить від настроєчних параметрів $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$ і $L = \{L_1, L_2\}$, може бути зображена у вигляді $A^d(\varepsilon, L) = A_1^d(\varepsilon) + A_2^d(\varepsilon, L)$, де елементи матриці $A_2^d(\varepsilon, L)$ є лінійними функціями елементів матриць L . Аналогічні рівняння здобуто також для компенсатора зниженого порядку $2n - q_1 - q_2$.

Показано, що при використанні комбінованих законів управління рівняння похибок регулювання у замкненій системі автономного управління можуть бути зображені у вигляді

$$\dot{\Theta}(t) = A^0 \Theta(t) + B_1^0 y^*(t) + B_2^0 \dot{y}^*(t), \quad e(t) = C^0(t) \Theta(t),$$

$$A^0 = \left(\begin{array}{c|c} A_{11}^0(K, L, \varepsilon) & A_{12}^0 \\ \hline A_{21}^0(\varepsilon) & A^d(L, \varepsilon) \end{array} \right), \quad (32)$$

де $A_{11}^0(K, L, \varepsilon) = A_1^0(K) - A_2^0(\varepsilon, L)$, елементи матриці $A_1^0(K)$ є лінійними функціями матриць коефіцієнтів стабілізуючих зворотніх зв'язків $K = \{K_1, K_2\}$, а матриці $A_{21}^0(\varepsilon), A_2^0(\varepsilon, L)$ лінійно залежать від настроєчних параметрів $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. В роботі доведено, що абсолютна автономність каналів досяжна лише у випадку виконання умов стійкості нескоректованого компенсатору при $\varepsilon = 0, L = 0$, інакше на площині настроєчних параметрів існує межа області стійкості компенсатора і виникає задача його параметричного синтезу виходячи з умов компромісу між ступенем компенсації взаємного впливу каналів та динамічною якістю сепаратних каналів. Відмітною рисою запропонованої методики є можливість оцінки на етапі проектування потенційно досяжного ступеню компенсації впливу каналів, який визначається параметрами об'єкту, а також можливість декомпозиції процедури настройки розв'язуючого компенсатору та локальних регуляторів. Зазначена процедура формалізована у вигляді наступного алгоритму, що включає послідовне розв'язування трьох оптимізаційних задач.

Задача параметричної оптимізації компенсатора. На цьому етапі здійснюється вибір матриць $L = \{L_1, L_2\}$ параметрів, що варіюються, шляхом розв'язання оптимізаційної задачі

$$J_d = J(A^d) \rightarrow \min \{L_i\}, \quad l_m^i \leq \|L_i\|^2 \leq l_M^i, \quad (33)$$

де $J(A) = \max_i \{\operatorname{Re} s_i(A)\}$, що відповідає методиці синтезу систем максимального ступеню стійкості, яка прийнята в інженерній практиці.

Розв'язок задачі визначає алгоритмічно задані функції $L^*(\epsilon)$, $J_d^*(\epsilon)$ настроєчих параметрів.

Задача параметричної оптимізації замкненої системи. На другому етапі здійснюється вибір матриць параметрів стабілізуючих зворотніх зв'язків $K = \{K_1, K_2\}$ з умов одержання максимального ступеню стійкості замкненої системи при від'єднаній динамічній частині розв'язуючого компенсатора.

$$J_\theta = J(A_{11}^\theta) \rightarrow \min \{K_i\}, \quad k_m^i \leq \|K_i\|^2 \leq k_M^i, \quad (34)$$

Розв'язок задачі (34) також визначає алгоритмічно задані залежності $K_i^*(\epsilon)$, $J_\theta^*(\epsilon)$.

Задача оптимізації настроєчих параметрів ϵ . На цьому етапі здійснюється побудова області припустимих значень настроєчих параметрів ϵ_1, ϵ_2 , що забезпечують стійкість замкненої системи з розв'язуючим компенсатором. З використанням методу векторних функцій Ляпунова область припустимих значень $D(\epsilon_1, \epsilon_2)$ здобуто у вигляді

$$\begin{aligned} J_d^*(\epsilon_1, \epsilon_2) &\leq -\eta_d^*, \quad J_\theta^*(\epsilon_1, \epsilon_2) \leq -\eta_\theta^*, \\ J_d^*(\epsilon_1, \epsilon_2) J_\theta^*(\epsilon_1, \epsilon_2) &\geq \sigma_M(A_{12}^\theta) \sigma_M(A_{21}^\theta), \end{aligned} \quad (35)$$

де η_d^*, η_θ^* - додаткові параметри проектування, вибором яких можна досягнути раціонального узгодження вимог до швидкодії та стійкості

замкненої системи автономного управління, забезпечив сумісність системи нерівностей (35).

Остаточно оптимальні значення настроєчних параметрів знаходяться шляхом розв'язування оптимізаційної задачі

$$J_e(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \|\bar{g}_{EY}(s)\|_{\infty} \rightarrow \min, \quad (\varepsilon_1, \varepsilon_2) \in D(\varepsilon_1, \varepsilon_2),$$

$$\bar{g}_{EY}(s) = \frac{(s + J_d^*)\sigma_M(B_{(1)}^{\theta}) - \sigma_M(A_{12}^{\theta})\sigma_M(B_{(2)}^{\theta})}{(s + J_d^*)(s + J_{\theta}^*) - \sigma_M(A_{12}^{\theta})\sigma_M(A_{21}^{\theta})}. \quad (36)$$

де $B_{(1)}^{\theta}, B_{(2)}^{\theta}$ - блочні строки матриці $B^{\theta} = (B_1^{\theta} \mid B_2^{\theta})$.

Показник якості $J_e(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ характеризує точність відтворення командних дій в усталеному режимі.

Здобуті в результаті розв'язання задачі (36) оптимальні значення настроєчних параметрів ε^* дозволяють одержати на стадії проектування кількісні оцінки досяжної точності відтворення командних впливів та ступеню компенсації взаємного впливу каналів за умови заданих вимог для стійкості і швидкодії замкненої системи шляхом обчислення відповідних матричних коефіцієнтів похибок для передаточної матриці $G_E(s) = C^{\theta}(sI - A^{\theta})^{-1}(B_1^{\theta} + sB_2^{\theta})$.

В шостій главі розглянуто питання практичної реалізації основних результатів роботи. Розроблені методи синтезу комбінованих систем на основі обернених моделей реалізовані в спільних з НДІОХІМ (м.Харків) розробках по створенню принципів побудови інваріантних децентралізованих систем управління аміачним циклом содового виробництва, а також елементів математичного та програмного забезпечення підсистем управління температурними режимами процесів абсорбції та дистиляції.

Метою управління процесом абсорбції є стабілізація температури амонізованого розсолу на виході абсорберу та концентрації аміаку у ньому шляхом зміни витрат розсолу, що надходить в абсорбер, з корекцією по збуренням параметрів парогазової суміші, яка надходить від відділення дистиляції та залежить від витрат фільтрової рідини.

На основі одержаних експериментально передаточних функцій об'єкту по каналам управління та збурення отримано дискретні моделі ТОУ, які включають саме керуємий процес та виконавчу підсистему стабілізації витрат. Встановлено, що модель є немінімально-фазовою по каналу управління. Із застосуванням запропонованої методики здійснено синтез дискретного регулятора, що компенсує збурення. Наведені приклади розрахунків, що виконані за допомогою пакету СС для автоматизованого проектування САУ. Знайдено межові значення настроєчних параметрів, які гарантують стійкість компенсатора для різних значень інтервалів дискретизації. Показано суттєве збільшення точності стабілізації за рахунок застосування синтезованого компенсатора.

Наведені також результати розв'язання задач автономного управління температурою парогазової суміші і температурою фільтрової рідини на виході теплообмінника дистиляції.

Розроблені методи, алгоритми і програми використано НДІОХІМ при розробці технічного проекту АСУ ТП відділень абсорбції-дистиляції на базі засобів мікропроцесорної техніки для Славянського ПО "Хімпром" та Кримського содового заводу. Упровадження розробок дозволило забезпечити збільшення продуктивності та економію паливно-енергетичних ресурсів (електроенергії та пара на дистиляцію), а також зменшити виброс аміаку в атмосферу за рахунок скорочення витрат аміаку, що рециркулює, шляхом стабілізації режимів його абсорбції і регенерації.

Запропоновані методи синтезу розв'язуючих компенсаторів за умови неповної інформації про збурення реалізовані при розробці нових типів алгоритмів цифрового управління рівнем рідини в парогенераторах енергоблоків ТЕС і АЕС. Особливістю реалізованої методики є відновлення і компенсація недоступних безпосередньому вимірюванню збурень, що обумовлені зміненням витрат та тиску пара і ефектів "набрякання" рівня. Наведено алгоритми цифрової обробки

інформації і управління, а також чисельні результати їх моделювання для різних характеристик збурень та значень настроєчних параметрів за допомогою спеціально розробленого діалогового програмного комплексу. Результати моделювання переконливо свідчать про ефективність запропонованої методики, що була реалізована в Інституті надійності та безпеки технологічних систем.

Далі розглянуто задачі автоматизації теплофізичного експерименту на основі запропонованої методики розв'язання обернених нестационарних задач теплопровідності за допомогою інваріантних спостерігачів, що синтезуються. Розв'язано важливу практичну задачу відновлення нестационарних потоків теплового випромінювання та корекції динамічних характеристик теплоприймачів. З цією метою розроблені математичні моделі приймачів високоінтенсивних потоків теплового випромінювання, які враховують неоднорідні умови теплообміну, рекурентні алгоритми ідентифікації параметрів моделі і відновлення нестационарних теплових потоків по вимірюванням вихідних сигналів теплоприймачів та комплекс прикладних програм, що їх реалізує, а також спеціалізований мікропроцесорний пристрій, що програмується, для обробки вихідних сигналів теплоприймачів.

Перелічені розробки реалізовані в ДНПО "Метрологія" (м.Харків) під час створення комплексу засобів метрологічного забезпечення вимірювань потоків теплового випромінювання до $2 \cdot 10^6$ Вт/м² та устаткування найвищої точності для відтворення одиниць щільності теплового радіаційного потоку в діапазоні високих значень щільності, що дозволяє підвищити ефективність та якість дослідження метрологічних характеристик і точність динамічних вимірювань.

Запропоновані методи комбінованого управління реалізовані також при розв'язанні ряду задач автоматизації діагностики і випробувань елементів та вузлів авіаційних двигунів. Викладено результати розв'язання задачі управління нагріванням дисків газотурбінних дви-

гунів під час випробувань на термоміцність. Метою управління є імітація на стенді термонапруженого стану дисків, яке має місце в умовах реальної експлуатації, шляхом використання безконтактних джерел нагріву та спеціальних систем охолодження. Запропоновано методику математичного моделювання процесів нагрівання - охолодження дисків ГТД у процесі випробувань на основі поєднання методу часткового усереднення і спеціальної модифікації методу кінцевих елементів. Розроблено алгоритми оптимального циклічного управління температурним полем, алгоритми відновлення недосяжних безпосередньому вимірюванню нестационарних граничних умов теплообміну, які обумовлені контактом диску з елементами розривної машини, та алгоритми стабілізації температурних режимів в процесі випробувань в умовах наявності збурень, які не контролюються.

Розроблені алгоритми реалізовані у вигляді пакету прикладних програм, який використано на ЗПО "Моторобудівник" (м. Запоріжжя) при проектуванні системи управління стендом для випробувань гарячих дисків ГТД на малоциклову утому.

Розроблені методи обробки вимірювальної інформації на основі теорії обернених моделей реалізовані також при розробці системи автоматизованої діагностики для промислових випробувань повітряно-реактивних двигунів. Алгоритми і програми відновлення полів температур, коефіцієнтів поглинання та випромінювання, а також концентрацій продуктів згорання по характеристикам власного випромінювання, яке реєструється за допомогою тепловізору, впроваджено на ТМКБ "Союз" (м. Москва). Реалізовані методи дозволили скоротити кількість виробів, необхідних для стендового опрацювання та виробити рекомендації по проектуванню дослідних зразків.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основний результат дисертаційної роботи полягає в теоретичному узагальненні та обґрунтуванні методу обернених моделей, розв'язанні на його основі наукової проблеми комбінованого управління складними системами в умовах неповної інформації про збурення, створенні інженерної методики оптимального проектування багатовимірних систем та її застосування для розв'язання практичних задач комбінованого управління технологічними процесами.

Одержані наукові і практичні результати можна сформулювати у вигляді наступних висновків.

1. На основі аналізу типових задач управління технологічними процесами в умовах підвищених вимог до точності стабілізації заданих технологічних режимів виділені їх характерні особливості, які пов'язані з наявністю інтенсивних збурень невизначеної структури, що повільно змінюються, істотним дефіцитом апріорної (відсутність адекватних моделей збурень) і поточної (відсутність можливості безпосередніх вимірювань) інформації, наявністю взаємозв'язків між змінними, що регулюються.

2. Показано, що відтворення недоступних безпосередньому вимірюванню збурень та їх компенсація можливі за допомогою динамічних спостерігачів і регуляторів, що мають структуру обернених моделей каналів ТОУ, до того ж вимірність та порядки відповідних реалізацій у просторі станів однозначно обумовлюються основними структурними параметрами каналів ТОУ, а саме їх відносними порядками та індексами спостерігаємості по входу.

3. Виявлено, що умовою існування розв'язуючого компенсатора, "поглинаючого" збурення без явного формування їх оцінок, який має структуру багатовимірного ПІД-регулятора, є структурна невиродженість ТОУ. Здобуті алгебраїчні критерії виконання указаних умов зво-

дяться до обчислення рангів так званих структурних матриць і можуть трактуватися як узагальнення принципу двоканальності.

4. Показано, що ефективні процедури параметризації та регуляризації рівнянь обернених моделей можуть бути отримані на основі теорії спостерігачів для систем з невимірюваними вхідними сигналами (метод інваріантного оцінювання), до того ж умови розв'язності задач структурно-параметричного синтезу обернених моделей, що здобуто у роботі, зв'язані з важливою структурною властивістю ТОУ - функціональною спостерігаємостю по входу.

5. Одержано рівняння оптимальних дискретних обернених моделей з врахуванням похибок вимірювань і показано, що вони є узагальненням рівнянь фільтру Калмана та мінімаксних фільтрів, виявлено умови існування оптимальних стаціонарних фільтрів і запропоновано методику їх регуляризації з врахуванням апріорної інформації.

6. Сформульовано та обґрунтовано узагальнений принцип алгебраїчної відокремлюваності для багатовимірних комбінованих систем зі спостерігачами збурень, що забезпечує можливість декомпозиції задач їх параметричного синтезу.

7. Виявлено, що потенційно досяжна точність управління в умовах дії невимірюваних збурень обумовлюється властивостями передаточних нулів ТОУ і може бути оцінена за допомогою запровадженого в роботі показника ступеню немінімально-фазовості.

8. Отримано умови стійкості фізично реалізуємих комбінованих систем з диференціюючими фільтрами та обмеженнями на керуючі дії за допомогою методів розподілення рухів і вібраційної лінеаризації.

9. Виявлено структурну подібність вироджених рівнянь обернених моделей (системи з проекційною динамікою) і ковзних режимів в релейних системах зі спеціальним чином сформульованим нестаціонарним многовидом ковзання, що дозволило сформувати структури спостерігачів з допоміжними розривними керуваннями.

10. Показано можливість використання методу обернених моделей для розв'язання задач децентралізованого та автономного управління, за допомогою методу векторних функцій Ляпунова побудовано агрегатні системи порівняння, знайдено області стійкості складних систем з оберненими моделями у просторі параметрів, що настроюються, запропоновано ітераційну процедуру їх параметричної оптимізації.

11. Показано ефективність розроблених методів при розв'язанні складних задач динамічних вимірювань в умовах неповної інформації на прикладі обернених задач теплопровідності (відтворення нестационарних теплових течій та межових умов теплообміну), а також задач управління температурними режимами при наявності невимірюваних межових збурень з використанням запропонованого в роботі методу спрощення багатовимірних математичних моделей процесу теплопереносу (метод часткового просторового усереднення).

12. Розроблені в роботі методи та алгоритми використано при створенні елементів математичного забезпечення і програмних модулів, що використовуються при автоматизації процесів випробувань та діагностики елементів та вузлів повітряно-реактивних і газотурбінних двигунів; автоматизованому управлінні температурними режимами та режимами концентрацій аміачного циклу содового виробництва, регулюванні рівня рідини в елементах технологічного устаткування енергоблоків АЕС, контролю стану оточуючого середовища в системах екологічного моніторингу.

Основні положення роботи відображені в публікаціях:

1. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Методы оптимизации замкнутых систем обслуживания: Учеб.пособие. - Харьков: ХПИ, 1984. - 68с.

2. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Методы решения обратных задач автоматического управления: Учеб. пособие. - Киев: УМК ВО, 1988. - 48с.

3. Любчик Л.М., Позняк А.С. Обучающиеся автоматы в задачах управления стохастическими объектами // Автоматика и телемеханика. - 1975. - N 1. - С.88-103.

4. Кельманс Г.К., Любчик Л.М., Позняк А.С. Метод "переменного базиса" в задаче адаптивного управления линейными системами // Автоматика и телемеханика. - 1976. - N 10. - С.78-93.

5. Любчик Л.М., Позняк А.С. Черницер А.В. Адаптивные алгоритмы оптимизации дисциплины обслуживания системы динамических объектов // Автоматика и вычислительная техника. - 1977. - N 4. - С.39-46.

6. Кельманс Г.К., Любчик Л.М., Позняк А.С. Адаптивное управление замкнутыми приоритетными системами массового обслуживания // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. - 1978. - N 4. - С.81-93.

7. Олефиренко В.И., Любчик Л.М. Исследование математической модели автоматизированного комплекса оборудования // Труды ВНИИТЭлектромаш. - М.: Энергия, 1979. - Вып.16. - С.125-132.

8. Никонов А.И., Любчик Л.М. Математические методы исследования технологических операций // Новая технология и средства автоматизации электромашиностроительного производства. - М.: Энергия, 1981. - С.79-90.

9. Лагунов А.А., Любчик Л.М., Павлов Л.М., Стасюк Н.С. Исследование агрегатных обмоточно-изолировочных комплексов методом имитационного моделирования // Исследование и автоматизация специальных технологических процессов электромашиностроения. - М.: Энергоиздат, 1982. - С.11-13.

10. В.М.Таубе, Г.А. Шифрин, Н.А. Нестеренко, М.Д. Гинзбург, Л.М. Любчик, В.А. Малоштан. Применение методов теории управле-

ния к расчету оптимальных дозировок лекарственных средств в кибернетической системе индивидуальной интенсивной терапии // Проблемы бионики. - Харьков : Вища школа, 1983. - Вып.30. - С.68-74.

11. Любчик Л.М. Квазиоптимальные алгоритмы минимаксной фильтрации и управления // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.4. - Харьков: Вища школа, 1984. - N 209. - С.11-13.

12. Любчик Л.М. Градиентные алгоритмы оптимизации марковских процессов при неполной информации // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.5. - Харьков : Вища школа, 1985. - N 220. - С.6-10.

13. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Управляемость линейных динамических систем при наличии ограничений // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил.-Вып.6.-Харьков : Вища школа, 1986. - N 229. - С.3-6.

14. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М., Мазманишвили А.С. Построение производящей функции функционала качества переходных процессов в стохастических распределенных системах // Доклады АН УССР. - 1986. - Сер.А. - N 10. - С.59-61.

15. Кириченко А.И., Любчик Л.М. Синтез дискретных нестационарных регуляторов температурных полей // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.7. - Харьков : Вища школа, 1987. - N 240. - С.6-8.

16. Любчик Л.М., Мазманишвили А.С. Статистика интегральных функционалов, содержащих квадратичные формы от компоненты гармонического стохастического сигнала // Радиотехника. - Харьков : Вища школа, 1987. - Вып.82. - С.54-62.

17. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М., Воронин А.В. Рекуррентное оценивание состояний распределенных систем с применением моделей

пониженного порядка // Адаптивные системы автоматического управления. - Киев : Техника. - Вып.15. - С.73-77.

18. Любчик Л.М., Толстопятова С.В. Оптимальное оценивание входных сигналов дискретных стохастических систем // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.8. - Харьков : Вища школа, 1988. - N 252. - С.5-7.

19. Любчик Л.М. К задаче синтеза регуляторов, компенсирующих возмущения // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.9. - Харьков : Вища школа, 1989. - N 262. - С.14-17.

20. Любчик Л.М. Анализ метрологических свойств алгоритмов статистической обработки косвенных динамических измерений // Автоматизация средств метрологического обеспечения народного хозяйства. - Тбилиси : НПО "Исари". - 1989. - С.310-315.

21. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М., Незнамова Е.В. Модификация метода конечных элементов для расчета температурных полей, усредненных по одной из координат // Инженерно-физический журнал. 1989. - т.57. - N 6. - С.1016-1022.

22. Любчик Л.М. Синтез обратных динамических систем методом инвариантного оценивания // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее применение. - Вып.10. - Харьков: Основа, 1990. - N 277. - С.5-9.

23. Любчик Л.М. Применение обратных систем в задаче воспроизведения заданных законов движения при наличии возмущений // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.10. - Харьков : Основа, 1990. - N 277. - С.9-12.

24. Lyubchik L.M. Adaptive system with identifier synthesis for dynamic plants with incomplete measurements // Evaluation of adaptive

control strategies for industrial applications. - IFAC Workshop Series.- Pergamon Press, 1990. - N 7. - pp.171-176.

25. Любчик Л.М., Харченко О.Ю. Применение скользящих режимов для решения обратных задач динамики управляемых систем // Актуальные проблемы фундаментальных наук.- т.11. - М.: Издательство МГТУ, 1991. - С.93-96.

26. Любчик Л.М., Харченко О.Ю. Синтез высокоточных следящих систем на основе обратных динамических моделей // Системы управления, следящие приводы и их элементы. - М.: НТИЦ "Информтехника", 1991. - С.64-65.

27. Kostenko Yu.T., Lyubchik L.M. Multivariable invariant system design via the inverse model principle // Proc. of IEEE Region 10 Intern. Conf. of Energy, Communication and Control System.- New-Delhi, India.- 1991.- v.4. - pp. 30-34.

28. Любчик Л.М., Дорофеев Ю.И. Двухуровневая стабилизация сложных динамических систем // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее прил. - Вып.11. -Харьков : ХПИ, 1992.- N 2. - С.7-11.

29. Любчик Л.М. Рекуррентные алгоритмы оптимальной инвариантной фильтрации // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів та полів : Збірка наукових праць.-Ч.2.-Харків, 1992.-С.80-85.

30. Kostenko Yu.T., Lyubchik L.M. Model matching adaptive control of robot manipulator motion via inverse dynamic approach // Proc. of the 2-nd IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, Nagoya, Japan. - 1992. - pp.195-206.

31. Lyubchik L.M., Kostenko Yu.T., Kharchenko O.Yu. Sliding mode method in inverse motion control problem // Prep. of IFAC Workshop on Motion Control for Intelligent Automation, Perugia, Italy.-1992.

32. Любчик Л.М. Функциональная управляемость и наблюдаемость дискретных динамических систем // Вестник Харьк. политехн. ин-та. Техническая кибернетика и ее применение.-Вып.12.- Харьков : ХПИ, 1993.- N 17. - С.17-21.

33. Kostenko Yu.T., Lyubchik L.M. The inverse systems theory and applications in data and signal processing and control // Proc. Int. Congress Information Technology Vision, New-Delhi, India.- 1993. -pp.75-82.

34. Lyubchik L.M., Kostenko Yu.T. The output control of multivariable systems with unmeasurable arbitrary disturbances : The inverse model approach // Proc. of the European Control Conf., Groningen, Netherlands. - 1993. - v.2. - pp.1160-1165.

35. Любчик Л.М. Управление выходом линейных многомерных дискретных систем при наличии неизмеряемых возмущений // Кибернетика и вычислительная техника.- 1994.- Вып. 101.- С. 31-38.

36. Lyubchik L.M. Dynamic sensors distortion compensation by means of input estimation algorithms // Prepr. of the IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, Budapest, Hungary. - 1994. - pp.229-234. (Reprinted in IFAC Post Print Volume by Elsevier Science Ltd., Oxford, England, 1995).

37. Lyubchik L.M., Kostenko Yu.T. Discrete inverse model-based invariant systems design // Proc. of the Asian Control Conf., Tokyo, Japan, 1994. - pp. 241-244.

38. А.С. N 1505140 СССР : Способ измерения температуры плазмы МГД-генератора на твердом топливе/Назаренко Л.А., Лейкин В.А., Гарбузов В.Н., Любчик Л.М., Бернштам В.А.

39. Костенко Ю.Т., Кудряш А.П., Любчик Л.М., Мазманишвили А.С. Метод Карунена-Лоэва и статистика интегральной квадратичной оценки распределенного стохастического объекта // Препринт -234.-Харьков : ИПМаш АН УССР, 1986. - 51с.

40. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Синтез оптимальных стохастических наблюдателей для систем с неизмеряемым входом // X Всес. Собрание по проблемам управления: Тезисы докладов. - М.: ИПУ АН СССР, 1986. - С.231-232.
41. Любчик Л.М. Алгоритмы оптимального восстановления входных сигналов измерительных преобразователей // Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии / Всесоюзный симпозиум: Тезисы докладов. - Новосибирск, 1989. - С.245-246.
42. Любчик Л.М. Синтез инвариантных многосвязных систем на основе обратных динамических моделей // Управление многосвязными системами / VI Всес. собрание: Тез. докладов. - М.; 1990. - С.16-17.
43. Любчик Л.М. Метод обратных динамических моделей в задачах координирующего управления // Координирующее управление в технических и природных системах / I Всесоюзная научная конференция : Тезисы докладов. ч.1. - Харьков, 1991. - С.25-26.
44. Любчик Л.М., Дорофеев Ю.И. Синтез децентрализованных регуляторов с обратными моделями // Там же. - С.73-74.
45. Lyubchik L.M. Motion control synthesis via the inverse model principle // Methods and software for automatic control system / IMACS-IFAC Intern. Workshop, Abstracts of papers. - Irkutsk, 1991. - pp.80-81.
46. Любчик Л.М., Никитин Ю.В., Скворцов А.В. Синтез цифровых инвариантных регуляторов уровня жидкости в технологических установках // MicroCAD-System'93 / Intern. Computer Science Conf. Ч.1. - Харьков-Мишколец, 1993. - С.139.
47. Любчик Л.М. Синтез дискретных квазиинвариантных систем с обратными динамическими моделями // I-а Українська конференція з автоматичного керування Автоматика-94: Тези доповідей. - Ч.І. - Київ, 1994. - С. 106.

48. Любчик Л.М., Дорофеев Ю.И. Компенсация взаимосвязей в сложных децентрализованных системах на основе обратных моделей // Там же. - С. 54.

Abstract

Lyubchik L.M. Combined processes control based on the inverse models method under incomplete information condition. The dissertation (in the manuscript form) for the doctoral degree in the speciality 05.13.07 - processes and manufacturing automation. State Polytechnic University of Kharkov. Kharkov, 1995.

The basis of theory and design methods are developed for the multivariable combined processes control systems. The concept of inverse model control was substantiated for the problem of setpoint tracking and unmeasurable disturbances rejection under the incomplete information. The inverse models based decoupling compensators parametrisation and design methods are proposed using the unknown-input observer theory. The method is proved to be successfully used for nonminimum-phase plants and arbitrary nonstationary disturbances.

The results of proposed methods practical implementation under the processes automation in chemical and power industry as well as products testing are presented.

Аннотация.

Любчик Л.М. Комбинированное управление технологическими процессами на основе метода обратных моделей в условиях неполной информации. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация технологических процессов и производств. Харьковский государственный политехнический университет. Харьков, 1995.

Разработаны основы теории и методы проектирования многомерных комбинированных систем управления технологическими процессами. Обоснована концепция управления на основе обратных моделей для задач слежения и компенсации неизмеряемых возмущений в условиях неполной информации. Предложены методы параметризации и синтеза развязывающих компенсаторов с обратными моделями с использованием теории наблюдателей для систем с неизвестными входами. Показана эффективность метода для неминимально-фазовых объектов и нестационарных возмущений.

Приводятся результаты практической реализации предложенных методов при автоматизации технологических процессов в химической промышленности, энергетике, а также испытаний продукции.

Ключові слова: динамічні спостерігачі, інваріантність, компенсація збурень, обернені моделі.

Підп. до друку 22.05.95. Формат 60x84/16. Папір друк.
Ум. друк. арк. 2.2. Ум. фарбо-відб. 2.2. Обл.-вид. арк. 2.0.
Тираж 100. Зам. 12-01.

Редакційно-видавничий відділ
Харківського Державного політехнічного університету
310002, м.Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21.

453226

Ab 32.636

AB 32.636