

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

Малько Максим Миколайович

УДК 621.311.22-52

**СИНТЕЗ БАГАТОВИМІРНИХ ДИНАМІЧНИХ КОМПЕНСАТОРІВ
ЗБУРЕНЬ ДЛЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Спеціальність 05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2004

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Любчик Леонід Михайлович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри комп'ютерної математики і математичного моделювання

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Єфімов Олександр В'ячеславович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри парогенераторобудування.

кандидат технічних наук, доцент
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин

Провідна установа: Науково-виробнича корпорація "Київський інститут автоматики"
Міністерства промислової політики України, м. Київ.

Захист відбудеться "25" березня 2004 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий "23" лютого 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Є. Голоскоков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення ефективності, надійності і безпеки функціонування атомних електростанцій (АЕС) в значній мірі пов'язано з удосконаленням систем управління технологічними процесами енергоблоків. Впровадження на АЕС цифрових автоматизованих систем управління супроводжується також розширенням їх можливостей, у тому числі введенням додаткових інформаційних каналів. Розробка та впровадження нових типів цифрових регуляторів вимагає переходу від емпіричних методів їх проектування, налагоджування і випробування безпосередньо на АЕС до науково-обґрунтованих інженерних методик синтезу регуляторів з використанням сучасних інструментальних програмних засобів автоматизованого моделювання і проектування систем управління.

На сучасному етапі розвитку автоматизації теплоенергетичних процесів на АЕС на передній план висуваються вимоги підвищення точності регулювання технологічних параметрів в умовах постійно діючих збурень, обумовлених зміною навантаження і умов експлуатації, нестабільністю характеристик технологічних об'єктів управління, взаємним впливом змінних, які регулюються. Підвищення точності управління технологічними процесами в свою чергу забезпечує можливість підвищення якості функціонування енергоблоків в стаціонарних і перехідних режимах, зниження частоти їх зупинок внаслідок спрацьовування блокувань та захистів, підвищення надійності і безпеки експлуатації АЕС. Суттєвий вклад в удосконалення систем управління енергоблоками АЕС внесено роботами В.Я. Ротача, Ю.К. Тодорцева, М.А. Дуеля, В.А. Демченко, М.А. Ястребенського.

В теперішній час системи автоматичного регулювання енергоблоків АЕС в своїй більшості будуються на основі локальних ПІД-регуляторів і реалізують класичний принцип управління по відхиленню. При наявності глибоких внутрішніх та зовнішніх збурень подібні системи не завжди забезпечують стабілізацію змінних, які регулюються, в допусках, обумовлених умовами нормальної експлуатації. Суттєвого підвищення точності регулювання можна досягнути шляхом переходу к комбінованим системам, які використовують інформацію о збуреннях в законі управління. Методи синтезу вказаних систем розроблені здебільшого для систем з одномірними входами і виходами, у той час як для задач управління теплоенергетичними процесами енергоблоків АЕС, зокрема, систем управління живленням парогенераторів, характерна наявність великої кількості керуючих впливів і взаємозв'язаних змінних, які регулюються, що значно ускладнює вирішення задачі синтезу. Таким чином, задача створення науково обґрунтованих методів синтезу дискретних багатовимірних комбінованих систем з динамічними компенсаторами збурень для АСУ ТП енергоблоків АЕС систем є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі системного аналізу та управління Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" відповідно до плану науково-дослідних робіт в рамках держбюджетних тем М-7213 "Розробка теорії і методів синтезу складних робастних систем управління з адаптивними оберненими та прогнозуючими моделями в умовах невизначеності" (№ ДР 0100U001080) та М-7214 "Розробка теоретичних основ, математичних методів та алгоритмів розв'язання обернених задач обробки сигналів і управління в умовах невизначеності" (№ ДР 0102U000975). В зазначених науково-дослідних роботах автор приймав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів синтезу комбінованих систем управління з багатовимірними динамічними компенсаторами збурень та їх використання для вирішення задачі управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС. Відповідно до зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Розробка та обґрунтування методики побудови багатовимірних динамічних компенсаторів збурень з оберненими та прогнозуючими моделями.
2. Розробка метода структурного синтезу обернених динамічних моделей з застосуванням теорії інваріантних спостерігачів.
3. Аналіз умов розв'язності задачі параметричного синтезу обернених динамічних моделей і розробка методів регуляризації обернених моделей та динамічних компенсаторів.
4. Аналіз динамічних властивостей розімкнено-замкнених комбінованих систем управління з багатовимірними динамічними компенсаторами збурень та розробка методики оцінки досяжної точності управління.
5. Розробка методів параметричного синтезу і оптимізації розімкнено-замкнених комбінованих систем управління з динамічними компенсаторами збурень при наявності вимірювальних завад.
6. Розробка цифрових алгоритмів комбінованого управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС.
7. Імітаційне моделювання розроблених комбінованих систем управління з динамічними компенсаторами збурень та оцінка їх якості.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС в умовах постійно діючих збурень.

Предметом дослідження є методи синтезу комбінованих систем управління з багатовимірними динамічними компенсаторами збурень.

Методи дослідження. При вирішенні задач роботи застосовувались методи теорії систем і теорії автоматичного управління, у тому числі методи простору станів, обернених задач динаміки,

теорії динамічних спостерігачів, методі параметричного синтезу і оптимізації систем управління, а також методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. В ході вирішення поставлених задач отримані наступні наукові результати:

1. Дістав подальшого розвитку метод обернених динамічних моделей стосовно задачі структурно-параметричного синтезу багатовимірних динамічних компенсаторів збурень.
2. Вдосконалена методика регуляризації обернених динамічних моделей з метою забезпечення можливості їх стабілізації для немінімально-фазових об'єктів у випадках невиконання умов розв'язності задачі параметричного синтезу.
3. Вперше отримані параметризовані рівняння багатовимірних динамічних регуляризованих компенсаторів збурень мінімального порядку.
4. Вперше отримані кількісні показники точності регулювання в розімкнено-замкнених комбінованих системах управління з динамічними компенсаторами збурень при наявності вимірювальних завод.
5. Дістали подальшого розвитку обчислювальні методи та алгоритми параметричного синтезу та оптимізації багатовимірних комбінованих системах управління з динамічними компенсаторами збурень.
6. Вдосконалено алгоритми цифрового комбінованого управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС на основі реалізації розробленого методу динамічної компенсації збурень.

Практичне значення одержаних результатів обумовлена створенням інженерної методики синтезу та налагоджування багатовимірних комбінованих систем управління, розробкою комплексу алгоритмів та програмного забезпечення для автоматизованого синтезу багатовимірних комбінованих систем управління та розв'язанням практичних задач компенсації збурень в системах управління живленням парогенераторів АЕС.

Результати роботи реалізовані у Харківському Інституті комплексної автоматизації та на Запорізькій АЕС при модернізації системі управління рівнем живлячої води у парогенераторах (акт впровадження від 29.10.2002 р.) та у Державному науково-дослідному центрі ядерної та радіаційної безпеки при розробці методики та математичного забезпечення для верифікації цифрових алгоритмів управління технологічними процесами енергоблоків АЕС (акт впровадження від 18.11.2002 р.). Результати дисертаційній роботі було використано у навчальному процесі НТУ "ХПІ" при викладанні дисциплін "Теорія управління" та "Математичне моделювання динамічних систем" на кафедрі системного аналізу та управління (довідка о використанні від 17.04.2003 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У роботах, виконаних у співавторстві, автором запропоновано та розроблено метод компенсації параметричних збурень із застосуванням динаміч-

ної оберненої моделі та метод компенсації збурень у двоканальних немінімально-фазових системах, обґрунтована методика параметризації обернених моделей, що забезпечує можливість корекції їх динамічних властивостей, вдосконалено метод регуляризації обернених динамічних моделей, розроблена методика синтезу динамічного компенсатора з розривним управлінням, обґрунтовано використання прогнозуючих моделей для компенсації збурень, розроблено метод ідентифікації параметричних збурень із застосуванням інваріантних спостерігачів, запропонована методика синтезу компенсаторів збурень при наявності випадкових завад, отримані рівняння похибки регулювання для комбінованих систем з компенсаторами збурень, розроблені алгоритми комбінованого управління рівням рідини у парогенераторах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: II Української конференції з автоматичного керування "Автоматика-95" (м. Львів, 1995 р.); Міжнародній конференції "MicroCAD-System" (м. Харків, 1997 р.); Міжнародній конференції ASI-98 "Life Cycle Approaches to Production Systems: Management, Control and Supervision" (м. Бремен, Німеччина, 1998 р.); VI Української конференції з автоматичного керування "Автоматика-99" (м. Харків, 1999 р.); Міжнародному симпозиумі ІФАК "Manufacturing, Management, Modeling and Control" (м. Патри, Греція, 2000 р.); 5-й Міжнародному молодіжному форумі "Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі" (м. Харків, 2001 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 14 робіт, з них 8 статей у наукових виданнях, що входять до Переліку ВАК України як фахові, 6 доповідей на наукових конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатку. Повний обсяг дисертації складає 142 сторінки. Робота містить 25 рисунків по тексту, 2 таблиці, 1 додаток на 3 сторінках, 104 найменування використаних літературних джерел на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність досліджень, сформульована мета та визначені основні завдання роботи, надана характеристика наукової новизни і практичної значимості отриманих результатів, наведені відомості про апробацію та практичну реалізацію основних результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуто проблеми, що обумовлюють необхідність модернізації й удосконалення систем автоматизованого управління енергоблоками АЕС, проведено аналіз сучасних тенденцій модернізації існуючих та розробки нових систем. Виконано аналіз питань, пов'язаних з автоматичним управлінням процесом живлення парогенераторів (ПГ) енергоблоків АЕС, визначені основні структурні елементи технологічного об'єкта і системи управління. Виділено основні контури регулювання технологічного об'єкта управління, а саме, контур регулювання рівня рі-

дини в ПГ з регулятором рівня (РР), контур регулювання продуктивності живлячих турбонасосів (ЖТН) з регулятором продуктивності (РП), розглянуті принципи і режими їхнього функціонування.

Проаналізовано вплив технологічних збурень, у тому числі збурень витратою пара на турбіну і тепловою потужністю реактора, на якість процесів управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС. Обґрунтовано необхідність зниження рівня впливу збурень на основі реалізації принципу комбінованого управління з метою підвищення якості регулювання.

Виконано огляд методів побудови дискретних комбінованих систем управління з компенсацією збурень для об'єктів зі скалярними входом та виходом. Відзначено, що в структуру регуляторів, які компенсують збурення (динамічних компенсаторів), входять обернені і прогнозуючі моделі об'єктів управління. Розглянуто і проаналізовано класичні та сучасні методи синтезу комбінованих систем управління для об'єктів зі скалярними входами і виходами з використанням теорії поліноміального синтезу дискретних систем. Встановлено, що основні труднощі, що перешкоджають безпосередньому застосуванню відомих методів управління по збуренню у задачах управління теплоенергетичними процесами, є велика розмірність та немінімальна фазовість технологічних об'єктів управління.

Обґрунтовано, що теоретичною основою для розв'язання задач синтезу багатовимірних комбінованих систем управління може служити теорія обернених динамічних моделей. Відзначено, що реалізація зазначеного підходу відповідно до вибраної моделі об'єкту управління включає формування "незмінної" частини параметризованих рівнянь компенсаторів збурень (аналітичного конструювання компенсатора) з подальшим застосуванням чисельних методів параметричного налагоджування і оптимізації систем управління, підкріплених широкими можливостями сучасних спеціалізованих програмних засобів.

Наприкінці розділу приведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи і сформульовані основні задачі дослідження.

Другий розділ присвячене розв'язанню задач структурного синтезу багатовимірних динамічних компенсаторів збурень. В роботі запропонована процедура синтезу динамічного компенсатора у вигляді послідовного з'єднання багатовимірних прогнозуючої моделі каналу збурення та оберненої моделі каналу управління технологічного об'єкту. Процедура синтезу складається з етапу *структурного синтезу*, а саме, отримання мінімальних реалізацій рівнянь компенсатора у просторі станів, які містять набір вільних налагоджувальних параметрів, і етапу *параметричного синтезу*, на якому здійснюється вибір зазначених параметрів з метою забезпечення заданих динамічних характеристик компенсатора або оптимізації обраних показників якості. При цьому параметризовані реалізації динамічних систем, що відповідають оберненим моделям, знаходяться в роботі з застосуванням теорії інваріантних динамічних спостерігачів.

Попереднє отримано розв'язання задачі структурного синтезу оберненої динамічної моделі каналу управління:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad y_k = Cx_k, \quad (1)$$

де $x_k \in \mathbf{R}^n$ – вектор станів об'єкту, $u_k \in \mathbf{R}^m$ – вектор вхідних сигналів, $y_k \in \mathbf{R}^q$ – вектор вихідних сигналів. На основі умов інваріантності похибки оцінювання вектора станів відносно вхідного сигналу

$$(I_n - HC)A - F(I_n - HC) - GC = 0, \quad (I_n - HC)B = 0, \quad (2)$$

рівняння оберненої динамічної моделі об'єкту (1) отримано у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= F\hat{x}_k + (G - FH)y_k + Hy_{k+1}, \\ \hat{u}_k &= B^+[(F - A)\hat{x}_k + (G - FH)y_k + Hy_{k+1}] \end{aligned} \quad (3)$$

де $F = PA - LC$, $G = PAH + L\Omega$, $H = BS^+$, $S = CB$, $\Pi = I_n - HC$, $\Omega = I_q - SS^+$ – проєкційні матриці, "+" – знак матричного псевдообернення. Елементи довільної матриці $L \in \mathbf{R}^{n \times q}$ трактуються як налагоджувальні параметри оберненої моделі.

Встановлено, що реалізація запропонованого методу еквівалентна введенню до структури оберненої моделі (3) додаткових зворотних зв'язків по стану та виходу з матричними коефіцієнтами підсилення, які налагоджуються, що дає можливість зміни її динамічних властивостей.

Аналогічно отримані рівняння оберненої моделі зніженого порядку з агрегованим вектором стану $\bar{x}_k = R\hat{x}_k \in \mathbf{R}^{n-q}$:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{k+1} &= \bar{F}\bar{x}_k + (\bar{G} - \bar{F}\bar{H})y_k + \bar{H}y_{k+1}, \\ u_k &= B^+[(Q\bar{F} - AQ)\bar{x}_k + [Q(\bar{G} - \bar{F}\bar{H}) - AP]y_k + (P + Q\bar{H})y_{k+1}] \end{aligned} \quad (4)$$

де $\bar{F} = RPAQ$, $\bar{G} = RPA(H + P\Omega)$, $\bar{H} = RBS^+ = RH$, $R \in \mathbf{R}^{n-q \times n}$ – матриця агрегування, така, що $\text{rank } R = n - q$, а допоміжні матриці визначаються як

$$(P \quad Q) = \begin{pmatrix} C \\ R \end{pmatrix}^{-1}, \quad \begin{aligned} CP &= I_q, & RQ &= I_q, & PC + QR &= I_n, \\ CQ &= 0_{q \times n-q}, & RP &= 0_{n-q \times q}, \end{aligned}$$

Задача параметричного синтезу обернених моделей складається у виборі матриць налагоджувальних параметрів, що забезпечують їх задані динамічні властивості. У роботі показано, що сформульована задача в термінах модального управління є розв'язною при виконанні умови спостережності пари матриць (PA, C) для системи повного порядку, або пари матриць $(\tilde{A}_{22}, \Omega_{B_1}A_{12})$ для системи зніженого порядку. Зазначені умови напевно не виконуються в найбільш важливому в практичному відношенні випадку рівності числа вхідних і вихідних змінних об'єкта, тобто коли, що має місце для більшості реальних задач управління технологічними об'єктами. Для забезпечення можливості розв'язання задачі параметричного синтезу у цьому випадку в роботі запропо-

новано використовувати квазірозв'язок рівнянь структурного синтезу (2), що допускають інваріантність стосовно вхідного сигналу з точністю до деякої малої величини $\varepsilon > 0$

$$\|B - HCB\|^2 + \varepsilon\|H\|^2 \rightarrow \min_H, \quad \|RB - HCB\|^2 + \varepsilon\|H\|^2 \rightarrow \min_H. \quad (5)$$

Розв'язання регуляризованої задачі структурного синтезу (5) для оберненої моделі зниженого порядку отримано у вигляді:

$$\bar{F}(\varepsilon) = R\Pi(\varepsilon)AQ, \quad \bar{G}(\varepsilon) = R\Pi(\varepsilon)A(\bar{H}(\varepsilon) + P\Omega(\varepsilon)), \quad \bar{H}(\varepsilon) = RBS^+(\varepsilon), \quad H(\varepsilon) = BS^+(\varepsilon),$$

$$\text{де } \Pi(\varepsilon) = I_n - H(\varepsilon)C, \quad \Omega(\varepsilon) = I_q - SS^+(\varepsilon), \quad S^+(\varepsilon) = S^T(\varepsilon I_q + SS^T)^{-1}.$$

Задача параметричного синтезу регуляризованої оберненої моделі щодо матриці динаміки виявляється розв'язною при виконанні умови повної спостерігаємості пари матриць $(\tilde{A}_{22}(\varepsilon), A_{12})$. Доведено також, що для стійких і немінімально-фазових об'єктів завжди буде існувати таке граничне значення параметра регуляризації ε^* , для якого матриця $\bar{F}(\varepsilon^*)$ також буде стійкою.

З використанням запропонованої методики для багатовимірної дискретної динамічної об'єкта управління, що зазнає дію збурень

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + B_f f_k, \quad y_k = Cx_k, \quad (6)$$

з застосуванням оберненої та прогнозуючої моделей відповідних каналів об'єкта управління (6) отримано рівняння динамічного компенсатора зниженого порядку, який забезпечує компенсацію збурень та слідкування за сигналом завдання:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{k+1}^c &= \bar{F}(\varepsilon)\bar{x}_k^c + \bar{L}(\varepsilon)y_k^* + \bar{H}(\varepsilon)y_{k+1}^* + R\Pi(\varepsilon)B_f f_k, \\ u_k^c &= \bar{B}(\varepsilon)[y_{k+1}^* - CAQ\bar{x}_k^c - CAPy_k^* - CB_f f_k], \end{aligned} \quad (7)$$

де $\bar{L}(\varepsilon) = R\Pi(\varepsilon)AP$, $\bar{B}(\varepsilon) = B^+(H(\varepsilon) + P\Omega(\varepsilon))$. Рівняння (7) завдають, фактично, розв'язання задачі структурного синтезу багатовимірної динамічної компенсатора збурень зниженого порядку з матрицею налагоджуваних параметрів, який є складовою комбінованої системи управління.

У **третьому розділі** розглядаються розв'язання задач параметричного синтезу та оптимізації комбінованих систем управління з багатовимірними динамічними компенсаторами збурень.

Постановка задачі параметричного синтезу динамічного компенсатора збурень включає сукупність вимог як безпосередньо до компенсатора, так і до перехідних процесів у комбінованій розімкнено-замкненої системі, до якої він входить, а також точності регулювання, що визначається ступенем компенсації збурень. У роботі доведено, що для мінімально-фазових за каналом управління об'єктів синтезовані компенсатори будуть стійкими при скільки завгодно малому значенні параметра ε , а для стійких немінімально-фазових об'єктів існує таке $\varepsilon^* > 0$, при якому компенсатор виходить на границю стійкості. Відповідне значення може бути знайдено, наприклад, методом кореневих годографів.

Для визначення налагоджувального параметра доцільно скористуватися простими достатніми умовами стійкості багатовимірної дискретної системи:

$$\lambda(\varepsilon) = \|\bar{F}(\varepsilon)\|_2 = \lambda_{\max}^{1/2}(\bar{F}^T(\varepsilon)\bar{F}(\varepsilon)) \leq \lambda^*, \quad (8)$$

де $\|\cdot\|_2$ – спектральна норма матриці, $0 \leq \lambda^* \leq 1$ – константа проектування, що вибирається із умов забезпечення заданої швидкості згасання перехідних процесів в динамічному компенсаторі.

В найбільш загальній постановці задача параметричного синтезу зводиться до отримання заданого спектра матриці F або \bar{F} . Для цього в роботі запропоновано вдосконалену методику синтезу динамічного компенсатора з застосуванням узагальнення методу модального управління.

Задачу синтезу системі с динамічним компенсатором збурень розглянуто стосовно закону комбінованого управління у вигляді $u_k = -K \cdot y_k + u_k^c$, в якому компонента управління u_k^c , що компенсує збурення, формується за допомогою динамічного компенсатора (7), при $y_k^* = 0$.

В роботі запропоновано розподілити задачу параметричного синтезу комбінованої системі на дві незалежні задачі:

- синтезу замкненого контуру управління із умов забезпечення його стійкості та якості перехідних процесів шляхом вибору матриці зворотного зв'язку;

- синтезу компенсатора шляхом вибору налагоджувальних параметрів з умов забезпечення максимальної точності компенсації збурень при обмеженнях по якості перехідних процесів в динамічному компенсаторі.

В роботі отримані рівняння похибки регулювання для комбінованої системи управління з синтезованим компенсатором в умовах наявності випадкових завад вимірювання збурень ξ_k :

$$x_{k+1}^0 = (A - BKC)x_k^0 + \bar{\Lambda}(\varepsilon)\bar{f}_k - \bar{\Gamma}(\varepsilon)\xi_k, \quad e_k = -Cx^0, \quad (9)$$

$$\bar{\Lambda}(\varepsilon) = (I - BB^+)P\Omega(\varepsilon), \quad \bar{\Gamma}(\varepsilon) = (I_n - (I_n - BB^+)P\Omega(\varepsilon)C)B_f,$$

де x_k^0 – вектор станів замкненої системи, $\bar{f}_k = -CB_f f_k + CAQ\bar{x}_k^c$ – еквівалентне збурення. Таким чином встановлено, що реалізація комбінованого управління з застосуванням компенсаторів з оберненими моделями еквівалентно відповідно до (9) деякому перетворенню збурень та вимірювальних завад динамічними фільтрами з матричними передаточними функціями, які в свою чергу залежать від налагоджувальних параметрів компенсатора.

За допомогою отриманих співвідношень задача параметричного синтезу компенсатора може бути формалізована на основі компромісу між вимогами точності компенсації збурень та вимогами до якості перехідних процесів у компенсаторі, зокрема його стійкості. Встановлено, що для об'єктів, немінимально-фазових по каналу управління, існує гранично досяжна точність компенсації збурень, яка може бути оцінена на етапі проектування за наведеною методикою.

Якщо апріорна інформація задається матрицями спектральних щільностей збурень і завад, то задача параметричної оптимізації компенсатора за критерієм потужності сигналу похибки регулювання, при обмеженнях на тривалість та перерегулювання перехідних процесів в компенсаторі формалізується у вигляді:

$$J_e(\varepsilon, P_2) = \sigma_f^2 \|H_f(z)\|_2^2 + \sigma_\xi^2 \|H_\xi(z)\|_2^2 \rightarrow \min, \quad T_{\Pi}(\varepsilon) \leq T_{\Pi}^*, \quad \sigma(\varepsilon) \leq \sigma^*, \quad (10)$$

де $H_f(z) = G_f(z)\Phi_f(z)$, $H_\xi(z) = G_\xi(z)\Phi_\xi(z)$, а $T_{\Pi}(\varepsilon, P_2) \leq (\ln(\lambda^{-1}(\varepsilon)))^{-1} \ln(\Delta^{-1})$, $\sigma(\varepsilon, P_2) \leq (\beta - 1) \cdot (\beta + 1)^{-1}$, $\beta = \lambda_1(\varepsilon)(1 - \lambda(\varepsilon))$, $\lambda_1(\varepsilon) = \|\bar{F}(\varepsilon) - I_{n-m}\|_2$, $\lambda(\varepsilon)$ визначається формулою (8).

В роботі за допомогою методів аналізу стохастичних систем у просторі станів отримано також еквівалентну до (10) формалізацію задачі параметричної оптимізації у вигляді задачі нелінійного програмування, яка забезпечує реалізацію ефективної обчислювальної процедури.

У **четвертому розділі** приводяться результати застосування розробленої методики синтезу системи комбінованого управління для розв'язання практичної задачі управління технологічними процесами живлення парогенераторів другого контуру енергоблоку АЕС. Система управління живленням повинна підтримувати у нормальних експлуатаційних умовах заданий рівень рідини у парогенераторах а також здійснювати регулювання продуктивності живлячих турбонасосів (ЖТН) в залежності від теплової потужності реактора з метою стабілізації тиску води на регулюючому живлячому клапані (РЖК).

Функціональна структурна схема запропонованої системи комбінованого управління живленням ПГ енергоблоку АЕС, яка містить три основних структурних елемента:

- узагальнений технологічний об'єкт управління другого контуру;
- багатомірний компенсатор збурень;
- контур регулювання потужності реактора.

Враховуючи потреби спрощення технічної реалізації комбінованої системи управління її структура вибрана у вигляді багатовимірної каскадної схеми, де компенсуючи впливи подаються на входи ПД-регуляторів РР і РП локальних контурів, що не потребує модифікації існуючих систем регулювання, не впливає на їх стійкість і не знижує досягнутого рівня надійності та безпеки.

З метою реалізації запропонованої методики синтезу комбінованих систем управління у роботі було розроблено спрощену лінеарізовану математичну модель технологічного об'єкту та системи управління живленням з локальними контурами регулювання на базі цифрових ПД-регуляторів у вигляді структурної схеми з'єднань передаточних функцій елементів моделі. Синтезовано також багатовимірний динамічний компенсатор, який має забезпечити зниження впливу найважливіших технологічних збурень, а саме витрати пара на турбину і теплової потужності реактора на зміни і, що регулюються.

Оцінка якості синтезованої комбінованої системи управління виконувалась шляхом моделювання перехідних процесів в системі при стрибкоподібним збуренням витратою пара і тепловою потужністю реактора. Вважалось, що РР працює у режимі підтримання рівня, РП – у режимі підтримання перепаду тиску води на РЖК и тиску пару в ГПК, а АРП – в режимі підтримки тиску пару у ГПК.

Для реалізації задачі моделювання була створена програмна імітаційна модель комбінованої системи управління живленням парогенераторів. На основі запропонованої методики синтезу розроблені і реалізовані обчислювальні процедури та створено необхідне програмне забезпечення для автоматизованого синтезу багатовимірних динамічних компенсаторів збурень.

Порівняний аналіз результатів моделювання процесів автоматизованого управління живленням для зазначених варіантів побудови системи з використанням традиційних показників якості перехідних процесів свідчить о підвищенні якості процесів управління, що проявляється у суттєвим зниженні величини перерегулювання і в зменшенні тривалості перехідних процесів. Результати імітаційного моделювання підтверджують працездатність і ефективність запропонованого методу синтезу багатовимірних комбінованих систем з динамічними компенсаторами збурень і можливість їх застосування для вирішення практичних задач автоматизованого управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС.

ВИСНОВКИ

Основний результат роботи полягає в розробці і обґрунтуванні методики побудови багатовимірних динамічних компенсаторів збурень на основі обернених і прогнозуючих моделей та її застосування для вирішення задач синтезу комбінованих систем управління, призначених для автоматизації теплоенергетичних процесів в енергоблоках АЕС. В процесі виконання роботи отримані наступні основні результати:

1. Показано, що відомим методам синтезу комбінованих систем управління з компенсаторами збурень, що основані на застосуванні апарата передаточних функцій і частотних характеристик, при їх використанні в задачах управління багатовимірними технологічними об'єктами притаманна низка суттєвих недоліків, пов'язаних зі складністю обернення багатовимірних матричних передаточних функцій, відсутністю в їх структурі вільних налагоджувальних параметрів і нестійкістю компенсаторів для немінимально-фазових об'єктів.

2. На основі метода обернених динамічних моделей запропоновано методику структурного синтезу багатовимірних компенсаторів збурень, отримані параметризовані рівняння динамічних компенсаторів повного і зниженого порядку та встановлені алгебраїчні критерії розв'язності задач їх структурного і параметричного синтезу.

3. Доведено, що у найбільш важливому в практичному відношенні випадку рівності числа змінних, що регулюються, і управляючих впливів, умови розв'язності задачі синтезу багатовимірних компенсаторів не виконуються. Для забезпечення можливості параметричного налагодження компенсаторів у цьому випадку запропонована методика регуляризації обернених динамічних моделей і отримані відповідні рівняння регуляризованих динамічних компенсаторів.

4. Запропонована та обґрунтована методика стабілізації і параметричного синтезу багатовимірних регуляризованих динамічних компенсаторів збурень за вимогами до якості перехідних процесів на основі застосування методів кореневого годографа та модального управління, що забезпечило можливість застосування синтезованих компенсаторів для управління за збуренням багатовимірними немінімально-фазовими об'єктами.

5. Отримані рівняння динаміки похибки регулювання в багатовимірних розімкнено-замкнених комбінованих системах управління з динамічними компенсаторами збурень, на основі яких встановлені кількісні характеристики показників точності управління і запропонована методика оптимізації багатовимірних комбінованих систем в умовах присутності випадкових завад вимірювань.

6. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованого синтезу багатовимірних динамічних компенсаторів збурень і імітаційного моделювання комбінованих систем управління, зокрема систем управління живленням парогенераторів енергоблоків АЕС.

7. На основі проведеного імітаційного моделювання комбінованої системи управління живленням парогенераторів встановлено, що застосування розроблених багатовимірних динамічних компенсаторів забезпечує значне зниження тривалості перехідного процесу та перерегулювання по змінним, що регулюються, в умовах впливу технологічних збурень.

8. З застосуванням отриманих результатів розроблені алгоритми цифрового комбінованого управління для автоматизованих систем управління живлячою водою парогенераторів АЕС. Розроблені алгоритми використані у процесі проведення робіт щодо удосконалення цифрових систем управління живленням парогенераторів, що привело до підвищення стійкості та надійності функціонування і безпеки експлуатації технологічного устаткування енергоблоків АЕС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М., Малько М.Н. Синтез регуляторів пониженого порядку для распределенных систем с учетом дестабилизирующего влияния остаточных мод // Механіка і машинобудування. - Харків: ХДПУ, 1998. - №2. - С. 190-195.

Здобувачем запропоновано методику синтезу скінченномірних регуляторів для розподілених систем в умовах параметричних збурень.

2. Любчик Л.М., Костюк О.В., Малько М.Н. Синтез селективно-инвариантных систем с обратными моделями // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 35.- С. 17-22.

Здобувачем запропоновано метод компенсації збурень у двоканальних не мінімально-фазових системах.

3. Костенко Ю.Т., Малько М.Н. Приближенная компенсация параметрических возмущений в неминимально-фазовых системах // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 51.- С. 32-35.

Здобувачем розроблено метод компенсації параметричних збурень із застосуванням динамічної оберненої моделі.

4. Любчик Л.М., Малько М.Н. Структурный синтез регуляризованных обратных систем пониженного порядка // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 72.- С. 165-168.

Здобувачем запропоновано вдосконалений метод регуляризації обернених динамічних моделей зниженого порядку.

5. Любчик Л.М., Малько М.Н. К задаче компенсации возмущений в системах с разрывным управлением // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 73.- С. 182-185.

Здобувачем розроблена методика синтезу динамічного компенсатора збурень з розривним управлінням.

6. Любчик Л.М., Малько М.Н. Синтез адаптивных инвариантных регуляторов уровня жидкости в технологическом оборудовании АЭС // Механіка і машинобудування. - Харків: ХДПУ, 1999. - №2. - С. 82-86.

Здобувачем запропоновані алгоритми комбінованого управління рівням рідини у парогенераторах АЕС.

7. Малько М.Н. Синтез дискретных комбинированных систем управления уровнем воды в парогенераторах с косвенным измерением возмущений // Вісник Харківського державного політехнічного університету. - Харків: ХДПУ, 2000.- Вип. 97.- С. 190-193.

8. Малько М.Н. Исследование комбинированной системы управления питательной водой энергоблоков АЭС с динамическими компенсаторами возмущений // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - Харьков: НТУ ХПИ, 2003. - № 6. - Т. 1. - С. 23-28.

9. Любчик Л.М., Дорофеев Ю.И., Малько М.Н. Синтез комбинированных систем управления многомерными неминимально - фазовыми объектами // Труды Другої української конференції з автоматичного керування "Автоматика-95". - Львів: НВЦ "ІТІС", 1995.- Т.1.- С. 113.

Здобувачем обґрунтована методика параметризації обернених моделей, що забезпечує можливість корекції їх динамічних властивостей.

10. Любчик Л.М., Малько М.Н. Идентификация параметрических возмущений в многомерных системах // Труды міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. "MicroCAD'97". - Харків, Мішкольц, Магдебург: ХДПУ, - 1997. - С. 262-264.

Здобувачем розроблено метод ідентифікації параметричних збурень з застосуванням інваріантних спостерегачів.

11. L.M. Lyubchik, M.N. Malko. Inverse model-based predictive control of industrial plant // Advanced Summer Institute '98, The Annual Conference of ICIMS-NOE, Bremen, Germany, 1998. - pp. 288-289.

Здобувачем запропоновано методика синтезу динамічних компенсаторів з використанням обернених моделей щодо управління технологічними процесами.

12. L.M. Lyubchik, O.V. Kostyuk, M.N. Malko, A.S. Rivtис. Advanced model-based control techniques for disturbance rejection // Праці Міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика-2000". - Львів: Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2000.- Т.2. - С. 172 - 176.

Здобувачем отримані рівняння похибки регулювання для багатовимірних комбінованих систем з компенсаторами збурень.

13. L.M. Lyubchik, M.N. Malko. Optimal Inventory-Production Control in Discrete Manufacturing Systems // Prep. IFAC Symposium "Manufacturing, Modeling, Control and Control", Patras, Greece, 2000. - Pp. 184-189.

Здобувачем запропонована методика синтезу та оптимізації компенсаторів збурень при наявності випадкових завад.

14. Любчик Л.М., Костюк О.В., Малько М.Н. Алгоритмы оценивания и компенсация возмущений в управляющих системах // Сб. научных трудов 5-го Международного молодежного форума "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке". - Харьков: ХТУРЭ, 2001.- Ч.1.- С. 300-301.

Здобувачем обґрунтовано використання прогнозуючих моделей для компенсації збурень.

АНОТАЦІЇ

Малько М.М. Синтез багатовимірних динамічних компенсаторів збурень для комбінованих систем управління теплоенергетичними процесами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

В роботі вирішено наукову задачу розробки методики побудови багатовимірних динамічних компенсаторів збурень на основі обернених і прогнозуючих моделей та розглянуто їх застосування для синтезу комбінованих систем управління, призначених для автоматизації теплоенергетичних процесів. З застосуванням теорії інваріантних спостерігачів для систем з невідомим входом та обернених динамічних моделей обґрунтовано метод структурного синтезу багатовимірних компенсаторів, отримані параметризовані рівняння динамічних компенсаторів повного і зниженого порядку та встановлені критерії розв'язності задач їх структурного і параметричного синтезу. Запропоновано методику регуляризації розглянутої задачі синтезу з метою забезпечення її розв'язності. Проаналізовано динаміку похибки регулювання у розімкнено-замкнених комбінованих систем управління з компенсаторами збурень, розроблено методику стабілізації і параметричного синтезу багатовимірних компенсаторів для немінимально-фазових об'єктів, а також їх оптимізації в умовах дії випадкових завад. Розроблені та досліджені шляхом комп'ютерного моделювання алгоритми цифрового комбінованого управління для автоматизованих систем управління живлячою водою парогенераторів енергоблоків АЕС, встановлені їх переваги відносно існуючих систем.

Ключові слова: інваріантні спостерігачі, комбіновані системи управління, компенсатори збурень, обернені моделі, управління енергоблоками.

Малько М.Н. *Синтез многомерных динамических компенсаторов возмущений для комбинированных систем управления теплоэнергетическими процессами.* – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2004.

В работе решена задача разработки методики построения многомерных динамических компенсаторов возмущений на основе обратных и прогнозирующих моделей и рассмотрены вопросы их применения для решения практических задач синтеза комбинированных систем управления, предназначенных для автоматизации теплоэнергетических процессов энергоблоков АЭС, в частности, системы управления питанием парогенераторов.

Предложена и обоснована двухэтапная процедура синтеза компенсаторов возмущений, включающая в себя этап структурного синтеза, обеспечивающий получение неизменной части уравнений компенсатора с точностью до набора свободных настроечных параметров, и этап параметрического синтеза, на котором осуществляется выбор указанных параметров из условий обеспечения устойчивости и заданного качества переходных процессов в компенсаторе. С использованием теории инвариантных наблюдателей и обратных динамических моделей получены параметризованные уравнения компенсаторов полного и пониженного порядков, установлены критерии разрешимости задачи их параметрического синтеза и предложена методика регуляризации обратных моделей при нарушении условий разрешимости. Разработаны методы стабилизации и параметрического синтеза динамических компенсаторов для неминимально - фазовых объектов.

Проведен анализ динамических процессов в разомкнуто-замкнутых комбинированных системах управления с многомерными динамическими компенсаторами. Получены уравнения для ошибки регулирования при наличии случайных погрешностей измерения возмущений. Установлено, что для объектов, неминимально-фазовых по каналу управления, существует предельно достижимая точность компенсации возмущений, зависящая как от характеристик объекта, так и от выбранных настроечных параметров, и предложена методика ее оценки на этапе проектирования системы управления.

Приведены результаты решения практической задачи синтеза системы комбинированного управления питающей водой парогенераторов энергоблока АЭС. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизированного синтеза многомерных динамических компенсаторов возмущений и имитационного моделирования комбинированных систем управления узлом питания парогенераторов энергоблоков АЭС. На основе анализа результатов моделирования показано снижение длительности переходных процессов и уровня перерегулирования по основным регулируемым переменным в синтезированных комбинированных системах управления

Ключевые слова: инвариантные наблюдатели, комбинированные системы управления, компенсаторы возмущений, обратные модели, управление энергоблоками.

Malko M.N. *Multivariable dynamic disturbance compensator's design for combined heat-energy processes control systems.* – Manuscript.

Thesis for candidate's degree by specialty 05.13.07 – Technological Processes Automation. National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv, 2004.

In the dissertation, the problem of multivariable dynamic disturbances compensator design method development based on inverse and predictive models is solved and its application for combined heat-energy process automation control systems synthesis is considered. Using invariant unknown-input observer and inverse dynamic models theory the method of multivariable dynamic compensators structural synthesis is proved, the parameterized full and reduced order compensator equations are obtained and criteria of both structural and parametric design problems solvability are founded. The method of considered design problem regularization is proposed which ensure the parametric design problem solvability. The error dynamics of feedback-feedforward combined control systems with multivariable dynamic compensator is also analyzed; the methods of regularization, stabilization and parametric design for nonminimum-phase plants along with the optimization in noise condition are proposed. Digital control algorithms of combined control for automated systems of steam generators water supply control of NPP power-generating unit are developed and investigated by means of computer simulation and it's advantages towards existing control systems are proved.

Keywords: combined control systems, disturbance compensators, invariant observers, inverse models, power-generating unit control.