

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

На правах рукопису

ЗАПОРОЖЕЦЬ Олег Васильович

**СИНТЕЗ АДАПТИВНИХ РЕГУЛЯТОРІВ
ЗНИЖЕНОГО ПОРЯДКУ, ЩО
ПАРАМЕТРИЧНО ОПТИМІЗУЮТЬСЯ**

05.13.03 — Системи та процеси керування

АВТОРЕФЕРАТ

*дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук*

Харків – 1996

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Є.В. Бодяньський.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Е.Г. Петров,
доктор технічних наук, професор
Л.М. Любчик.

Провідна організація: Національний науковий центр Харківський фізико-технічний інститут.

Захист відбудеться "30" листопада 1996 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 02.25.06 в Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки за адресою: 310726, м. Харків, пр. Леніна, 14, fax: (0572) 40-91-13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Автореферат розіслано "29" вересня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Е.О. Дедіков

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00760435 (P)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна теорія управління має в своєму розпорядженні достатньо потужний арсенал алгоритмів і процедур, які дозволяють ефективно керувати об'єктами різноманітної структури. Реалізація оптимальних регуляторів на ЕОМ не викликає суттєвих ускладнень, проте їх технічне втілення пов'язане із значними труднощами. Річ у тому, що більшість промислових об'єктів управління обладнані регуляторами, структура яких відрізняється від структури оптимальних регуляторів, а порядок, як правило, нижчий, ніж це потрібно для реалізації оптимального управління.

Найбільшого поширення в промислових системах здобули регулятори зниженого порядку, в основному ПІ- і ПІД-структури, а також їх модифікації. Використання регуляторів цього класу пояснюється недостатньою вивченістю технологічних процесів, їх нелінійністю і нестационарністю, а також тією обставиною, що регулятори зниженого порядку дешевші порівняно з оптимальними. Разом з тим, теоретичні питання синтезу регуляторів зниженого порядку недостатньо вивчені в працях вітчизняних та зарубіжних авторів.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки адаптивних алгоритмів управління зниженого порядку, які зможуть забезпечити потрібну якість керування в умовах невизначеності. Саме це і визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

Метою роботи є розробка адаптивних алгоритмів оперативно-го настроювання регуляторів зниженого порядку, які дозволяють враховувати різноманітні обмеження, що накладаються на змінні стану процесу.

Задачі дослідження:

– аналіз існуючих підходів до вирішення задачі синтезу регуля-

торів зниженого порядку;

- розробка одно- і багатокрокових адаптивних процедур настроювання регуляторів зниженого порядку для ARX-моделі, заснованих на оптимізації прийнятого критерія якості керування;

- розробка одно- і багатокрокових алгоритмів настроювання регуляторів зниженого порядку для ARX-моделі, які дозволяють реалізувати довільний закон регулювання, що визначається поза контуром управління;

- синтез адаптивних регуляторів зниженого порядку, що параметрично оптимізуються, для ARMAX-моделі;

- синтез адаптивних регуляторів зниженого порядку в системах екстремального управління;

- програмна реалізація синтезованих алгоритмів управління, проведення машинних експериментів;

- впровадження запропонованих алгоритмів керування в промисловому виробництві.

Методи дослідження. Проведені в роботі дослідження засновані на комплексному використанні методів сучасної теорії управління, адаптивної ідентифікації, регресійного аналізу, математичного програмування і теорії багатовимірних матриць. Працездатність синтезованих алгоритмів підтверджується результатами імітаційного моделювання на ЕОМ та результатами стендових випробувань роботи запропонованих процедур в системі управління теплоенергетичним обладнанням АЕС.

На захист виносяться:

- методика синтезу адаптивних регуляторів зниженого порядку, що параметрично оптимізуються;

- одно- і багатокрокові алгоритми адаптивного настроювання регуляторів зниженого порядку, засновані на оптимізації вибраного

критерія якості керування;

– одно- і багатокрокові алгоритми настроювання регуляторів зниженого порядку по оптимальному закону управління;

– алгоритми адаптивного екстремального управління квадратичними об'єктами.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що

1) розроблено одно- і багатокрокові адаптивні процедури настроювання регуляторів, що дозволяють враховувати різноманітні обмеження на фазові змінні, працюють в реальному масштабі часу і збігаються на обчислювальному рівні з відомими алгоритмами точної ідентифікації;

2) запропоновано підхід, що дозволяє в реальному часі здійснювати настроювання параметрів регулятора зниженого порядку таким чином, щоб якість керування наближалась до деякого оптимального закону управління, що визначається поза контуром регулювання; синтезовано відповідні одно- і багатокрокові процедури настроювання;

3) запропоновано схему адаптивної системи управління з використанням блока універсальних процедур настроювання, що застосовуються як для ідентифікації параметрів об'єкта управління, так і для настроювання регулятора;

4) синтезовано алгоритми ідентифікації квадратичних об'єктів, що є аналогами відомих алгоритмів ідентифікації лінійних систем;

5) розроблено адаптивні екстремальні регулятори для квадратичних об'єктів.

Практична цінність роботи полягає в тому, що синтезовані адаптивні алгоритми дозволяють успішно вирішувати широке коло задач управління як для лінійних динамічних об'єктів, так і для деяких нелінійних статичних і динамічних систем. Розглянуто основні особливості синтезованих алгоритмів, надано рекомендації по їх практич-

ному застосуванню і раціональному вибору параметрів. По результатах проведених досліджень розроблено комплекс програм, у якому реалізовано запропоновані алгоритми.

Реалізація результатів роботи. Робота виконана в рамках держбюджетної теми "Розробити нові принципи адаптивного керування технічними об'єктами в умовах апріорної невизначеності з урахуванням різного типу обмежень та ранньої діагностики несправностей", яка є складовою частиною програми 40 Міносвіти України "Методи побудови і створення інтегрованих комп'ютеризованих систем і технологій". Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертації, були використані при підготовці курсів "Математичне забезпечення АСУ реального часу", "Програмне і технічне забезпечення АСУ реального часу" на кафедрі технічної кібернетики Харківського державного технічного університету радіоелектроніки. Синтезовані і досліджені в дисертації алгоритми були використані під час розробки системи адаптації регуляторів вузла живлення парогенераторів для Південноукраїнської АЕС.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах Інституту кібернетики НАН України "Математичні методи в хімії та хімічній технології" (Харків, 1994), II-й Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика-95" (Львів, 1995), Міжнародній конференції "Теорія і техніка передачі, прийому та обробки інформації" (Туапсе, 1995), XXII-й Всеросійській молодіжній науковій конференції "Гагарінські читання" (Москва, 1996).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 7 друкованих роботах.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку посилань з 95 найменувань, до-

датку, вміщує 24 рисунка. Загальний обсяг дисертації становить 175 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, яка розглядається в роботі, показано загальну структуру дисертації та короткий зміст кожного розділу.

У першому розділі розглянуто загальні принципи та методологію проектування цифрових систем управління, основні підходи до вирішення проблеми синтезу регуляторів зниженого порядку. Здійснено постановку задачі дослідження, обґрунтовано вибір критеріїв управління та методів синтезу.

Другий розділ присвячено синтезу адаптивних алгоритмів настроювання регуляторів зниженого порядку для випадку, коли об'єкт управління описується ARX-моделлю:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + w(t), \quad (1)$$

де $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{N_A}q^{-N_A}$,

$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{N_B}q^{-N_B}$, $b_1 \neq 0$,

q^{-1} — оператор зсуву назад,

$y(t)$ — вихід об'єкта,

$u(t)$ — керуюча дія,

$w(t)$ — випадкова завада типу білого шуму з обмеженим другим моментом така, що $M\{w(t)\} = 0$ і $M\{w^2(t)\} = \sigma_w^2 < \infty$,

$M\{\bullet\}$ — символ математичного сподівання,

$t = 0, 1, 2, \dots$ — дискретний час.

Коефіцієнти поліномів $A(q^{-1})$ і $B(q^{-1})$ невідомі апіорі і можуть бути відновлені за допомогою тих чи інших ідентифікаційних процедур.

Узагальнений регулятор зниженого порядку описується рівнян-

ням

$$u(t) = g^T U(t), \quad (2)$$

де g — вектор невідомих параметрів регулятора,

$U(t)$ — вектор стану.

Запропоновано два підходи до вирішення задачі синтезу алгоритмів настроювання регулятора (2). Перший підхід базується на оптимізації вибраного критерія якості керування. Вводиться критерій

$$J_t = (y^*(t+1) - \hat{y}(t+1))^2 + \lambda_1 u^2(t) + \lambda_2 (u(t) - u(t-1))^2 + \lambda_3 \|g(t) - g(t-1)\|^2, \quad (3)$$

де $\hat{y}(t)$ — вихід адаптивної моделі, що настроюється, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — невід'ємні вагові коефіцієнти, які вибираються емпірично і є штрафами на величину керуючої дії, її динаміку та стрибки параметрів регулятора відповідно. Мінімізація (3) веде до однокрокового адаптивного алгоритму управління

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = g^T(t)U(t), \\ g(t) = g(t-1) + \frac{\hat{U}(t)}{\hat{\mu}(t)\lambda_3(t-1) + \|\hat{U}(t)\|^2} \times \\ \quad \times \left(\hat{\mu}(t) \left(\hat{v}(t+1) + \frac{\lambda_2(t-1)}{\hat{b}_1(t)} u(t-1) \right) - \right. \\ \quad \left. - g^T(t-1)\hat{U}(t) \right), \\ \hat{\mu}(t) = \frac{\hat{b}_1^2(t)}{\hat{b}_1^2(t) + \lambda_1(t-1) + \lambda_2(t-1)}, \quad \hat{U}(t) = \hat{b}_1(t)U(t), \\ \hat{v}(t+1) = y^*(t+1) + \hat{a}_1(t)y(t) + \dots + \hat{a}_{N_A}(t)y(t - N_A + 1) - \\ \quad - \hat{b}_2(t)u(t-1) - \dots - \hat{b}_{N_B}(t)u(t - N_B + 1), \end{array} \right. \quad (4)$$

що є аналогом відомого алгоритму Качмажа.

Запропоновано використовувати також багатокроковий критерій

управління

$$J_t = \sum_{i=1}^t (y^*(i+1) - \hat{y}(i+1))^2 + \lambda_1 u^2(i) + \lambda_2 (u(i) - u(i-1))^2, \quad (5)$$

мінімізація якого дає алгоритм настроювання

$$\begin{cases} g(t) = g(t-1) + \frac{P(t-1)\hat{U}(t)}{1 + \hat{U}^T(t)P(t-1)\hat{U}(t)} \times \\ \quad \times \left(\hat{\mu}(t) \left(\hat{v}(t+1) + \frac{\lambda_2}{\hat{\delta}_1(t)} u(t-1) \right) - \right. \\ \quad \left. - g^T(t-1)\hat{U}(t) \right), \\ P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)\hat{U}(t)\hat{U}^T(t)P(t-1)}{1 + \hat{U}^T(t)P(t-1)\hat{U}(t)}. \end{cases} \quad (6)$$

Неважко помітити, що вираз (6) є різновидом рекурентного методу найменших квадратів (РМНК).

Однокроковий алгоритм (4) має добрі слідкуючі властивості, однак є доволі критичним до дії завад. Багатокроковий алгоритм (6), як і класичний РМНК, характеризується фільтруючими властивостями і забезпечує мінімальні сумарні втрати по всій траєкторії процесу. Проте оптимальне по всій часовій вибірці значення вектора g може призводити до низької якості управління в поточний момент часу, якщо має місце дрейф параметрів об'єкта. Компроміс між слідкуючими та фільтруючими властивостями алгоритму настроювання досягається за допомогою механізму "забування" застарілої інформації. Розглянемо критерій управління

$$\begin{aligned} J_t = & \sum_{i=1}^t \alpha^{t-i} \left[(y^*(i+1) - \hat{y}(i+1))^2 + \right. \\ & \left. + \lambda_1 u^2(i) + \lambda_2 (u(i) - u(i-1))^2 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

де α — коефіцієнт дисконтування, $0 < \alpha \leq 1$. Мінімізація виразу (7) з використанням рекурентного обернення матриць веде до алгоритму

настроювання

$$\left\{ \begin{array}{l} g(t) = g(t-1) + \frac{P(t-1)\hat{U}(t)}{\alpha + \hat{U}^\top(t)P(t-1)\hat{U}(t)} \times \\ \quad \times \left(\hat{\mu}(t) \left(\hat{v}(t+1) + \frac{\lambda_2}{b_1(t)}u(t-1) \right) - \right. \\ \quad \left. - g^\top(t-1)\hat{U}(t) \right), \\ P(t) = \frac{1}{\alpha} \left(P(t-1) - \frac{P(t-1)\hat{U}(t)\hat{U}^\top(t)P(t-1)}{\alpha + \hat{U}^\top(t)P(t-1)\hat{U}(t)} \right), \end{array} \right. \quad (8)$$

який є аналогом "експоненційно зваженого" РМНК.

Вводиться також критерій з скінченною пам'яттю

$$J_t = \sum_{i=t-N+1}^t (y^*(i+1) - \hat{y}(i+1))^2 + \lambda_1 u^2(i) + \lambda_2 (u(i) - u(i-1))^2, \quad (9)$$

тобто оптимізація йде не по всій часовій вибірці, а лише для N її останніх тактів, що веде до алгоритму типу поточного регресійного аналізу

$$\left\{ \begin{array}{l} g(t) = P(t)H(t), \\ P(t) = \tilde{P}(t-1) - \frac{\tilde{P}(t-1)\hat{U}(t)\hat{U}^\top(t)\tilde{P}(t-1)}{1 + \hat{U}^\top(t)\tilde{P}(t-1)\hat{U}(t)}, \\ \tilde{P}(t-1) = P(t-1) + \\ \quad + \frac{P(t-1)\hat{U}(t-N)\hat{U}^\top(t-N)P(t-1)}{1 - \hat{U}^\top(t-N)P(t-1)\hat{U}(t-N)}, \\ H(t) = H(t-1) - \hat{U}(t-N)\hat{\mu}(t) \times \\ \quad \times \left(\hat{v}(t-N+1) + \frac{\lambda_2}{b_1(t)}u(t-N-1) \right) + \\ \quad + \hat{U}(t)\hat{\mu}(t) \left(\hat{v}(t+1) + \frac{\lambda_2}{b_1(t)}u(t-1) \right). \end{array} \right. \quad (10)$$

З метою забезпечення стійкості системи управління в цілому вводяться додаткові обмеження на енергетику та динаміку керуючої

дії і стрибки параметрів регулятора

$$\begin{cases} u^2(t) = (g^T(t)U(t))^2 \leq V^2, \\ (u(t) - u(t-1))^2 = (g^T(t)U(t) - u(t-1))^2 \leq W^2, \\ \|g(t) - g(t-1)\|^2 \leq Z^2. \end{cases}$$

Щоб перейти до задачі безумовної мінімізації, формується функція Лагранжа

$$L(g, \lambda) = (y^*(t+1) - \hat{y}(t+1))^2 + \lambda_1(u^2(t) - V^2) + \lambda_2((u(t) - u(t-1))^2 - W^2) + \lambda_3(\|g(t) - g(t-1)\|^2 - Z^2), \quad (11)$$

де λ_1, λ_2 — невизначені невід'ємні множники Лагранжа. Оптимізація (11) за допомогою процедури Ерроу-Гурвіца-Удзави веде до адаптивного регулятора

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = g^T(t)U(t), \\ g(t) = g(t-1) + \frac{\hat{U}(t)}{\hat{\mu}(t)\lambda_3(t-1) + \|\hat{U}(t)\|^2} \times \\ \quad \times \left(\hat{\mu}(t) \left(\hat{v}(t+1) + \frac{\lambda_2(t-1)}{\hat{b}_1(t)} u(t-1) \right) - \right. \\ \quad \left. - g^T(t-1)\hat{U}(t) \right), \\ \lambda_1(t) = [\lambda_1(t-1) + \gamma_1(t)((g^T(t)U(t))^2 - V^2)]_+, \\ \lambda_2(t) = [\lambda_2(t-1) + \gamma_2(t)((g^T(t)U(t) - u(t-1))^2 - \\ \quad - W^2)]_+, \\ \lambda_3(t) = [\lambda_3(t-1) + \gamma_3(t)(\|g(t) - g(t-1)\|^2 - Z^2)]_+, \\ \hat{\mu}(t) = \frac{\hat{b}_1^2(t)}{\hat{b}_1^2(t) + \lambda_1(t-1) + \lambda_2(t-1)}, \quad \hat{U}(t) = \hat{b}_1(t)U(t), \end{array} \right. \quad (12)$$

де $\gamma_1(t), \gamma_2(t), \gamma_3(t)$ — кроки пошуку алгоритму. Додатковий контур настроювання невизначених множників Лагранжа дає можливість "стягувати" обмеження в процесі функціонування, забезпечує жорсткий контроль за стійкістю системи управління і запобігає виникненню недопустимо великих керуючих дій.

Таким чином, синтезовано цілу групу стохастично еквівалентних адаптивних регуляторів зниженого порядку, що базуються на оптимізації вибраного критерія якості управління.

Другий підхід до вирішення задачі синтезу регулятора (2) полягає в настроюванні вектора параметрів g таким чином, щоб керуюча дія $u(t)$ наближалась деяким чином до оптимального значення $u^*(t)$, яке обчислюється поза контуром регулювання. Критерієм оптимальності в цьому випадку служить вираз

$$J_t = (u^*(t) - g^T(t)U(t))^2 + \lambda \|g(t) - g(t-1)\|^2, \quad (13)$$

де λ — невід'ємний ваговий множник, який вводить для обмеження різких стрибків параметрів регулятора. Мінімізація (13) веде до алгоритму настроювання

$$g(t) = g(t-1) + \frac{u^*(t) - g^T(t-1)U(t)}{\lambda + \|U(t)\|^2} U(t), \quad (14)$$

який є модифікацією алгоритма Качмажа.

Розглянуто також багатокроковий критерій

$$J_t = \sum_{i=1}^t (u^*(i) - g^T U(i))^2, \quad (15)$$

оптимізація якого дає регулятор

$$\begin{cases} g(t) = g(t-1) + \frac{P(t-1)(u^*(t) - g^T(t-1)U(t))}{1 + U^T(t)P(t-1)U(t)} U(t), \\ P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)U(t)U^T(t)P(t-1)}{1 + U^T(t)P(t-1)U(t)}. \end{cases} \quad (16)$$

Процес настроювання можна уявити собі як ідентифікацію невідомих параметрів оптимального регулятора. Проте, якщо порядок оптимального регулятора вищий, ніж порядок реального, алгоритм (16) не зможе забезпечити потрібну якість керування. Тому в роботі розглянуто також багатокрокові алгоритми із "забуванням" застарілої

інформації і синтезовано відповідні процедури настроювання. Таким чином, отримано групу алгоритмів настроювання регулятора зниженого порядку, які дозволяють реалізувати будь-який довільний закон регулювання. При цьому всю відповідальність за якість керування несе оптимальний регулятор, під який підстроюються параметри реального регулятора.

Показано, що всі синтезовані алгоритми настроювання є структурно близькими до рекурентних алгоритмів оперативної ідентифікації, що дозволяє використовувати одні й ті ж обчислювальні процедури як для ідентифікації об'єкта, так і для настроювання регулятора. Запропоновано схему адаптивної системи управління з використанням блоку універсальних процедур настроювання.

Третій розділ присвячено розробці адаптивних регуляторів зниженого порядку для керування об'єктами з кольоровими завадами. Зокрема, розглядається так звана ARMAX-модель

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})w(t), \quad (17)$$

де $C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{N_C}q^{-N_C}$. Показано, що всі алгоритми настроювання регулятора, які були синтезовані в розділі 2, цілком придатні для керування об'єктом (17), якщо для ідентифікації невідомих параметрів об'єкта використовувати розширений РМНК. При цьому вектор фазових змінних розширюється за рахунок введення оцінок минулих значень білого шуму $\epsilon(t-1), \dots, \epsilon(t-N_C)$, $\epsilon(i) = y(i) - \hat{y}(i)$, а вектор параметрів об'єкта — за рахунок коефіцієнтів полінома $C(q^{-1})$. Таким чином, можливість "відбілити" кольорову заваду дозволяє значно розширити область застосування запропонованих регуляторів.

В четвертому розділі розглядаються задачі синтезу регуляторів зниженого порядку в системах управління нелінійними об'єктами. Річ у тім, що в технічних системах часто зустрічаються об'єкти з суттєво

нелінійними характеристиками. В таких випадках лінеаризація не дає переконливих результатів. Тому останнім часом увагу дослідників все більше привертають квадратичні моделі. Пов'язано це також з тим, що практично будь-яку гладку нелінійну функцію можна привести до квадратичної форми розкладанням її в ряд Тейлора і відкиданням членів, степінь яких більше двох.

До розгляду вводиться квадратична модель, що настроюється, вигляду

$$\hat{y}(t) = X^T(t)G(t-1)X(t) = (X(t) \otimes X(t))^T \overset{\dagger}{G}(t-1), \quad (18)$$

де $\hat{y}(t)$ — вихід моделі, $X(t) = (x^T(t), 1)^T$ — розширений вектор входів, $x(t)$ — $(n \times 1)$ -вектор входів моделі і об'єкта,

$$G(t-1) = \left(\begin{array}{c|c} c(t-1) & 0.5b(t-1) \\ \hline - & - \\ \hline 0.5b^T(t-1) & a(t-1) \end{array} \right) \text{ — блочна матриця,}$$

$a(t-1)$, $b(t-1)$, $c(t-1)$ — відповідно скаляр, $(n \times 1)$ -вектор і симетрична $(n \times n)$ -матриця коефіцієнтів, що настроюються, \otimes — символ тензорного добутку, $\overset{\dagger}{G}(t-1)$ — векторизована матриця $G(t-1)$. Настроювання матриці $G(t)$ здійснюється шляхом послідовної мінімізації критерія ідентифікації

$$J_t = M \left\{ (y(t) - (X(t) \otimes X(t))^T \overset{\dagger}{G}(t-1))^2 \right\} \quad (19)$$

за допомогою градієнтної процедури

$$\overset{\dagger}{G}(t) = \overset{\dagger}{G}(t-1) + \Gamma(t)(y(t) - (X(t) \otimes X(t))^T \overset{\dagger}{G}(t-1))(X(t) \otimes X(t)), \quad (20)$$

де $y(t)$ — вихід об'єкта, $\Gamma(t)$ — матричний коефіцієнт підсилення алгоритму. Оптимальне значення $\Gamma(t)$ визначається із умови мінімізації функції

$$\psi(t) = \text{Tr} M \left\{ \overset{\dagger}{\theta}(t) \overset{\dagger}{\theta}^T(t) \right\} = \text{Tr} P(t), \quad (21)$$

де $\hat{\theta}(t) = \hat{G} - \check{G}(t)$ — поточна помилка визначення коефіцієнтів,
 G — невідомі "істинні" значення параметрів об'єкта.

Для скалярного коефіцієнта підсилення $\gamma(t)$ маємо:

$$\gamma(t) = \frac{(X(t) \otimes X(t))^T P(t-1) (X(t) \otimes X(t))}{\|X(t) \otimes X(t)\|^2 ((X(t) \otimes X(t))^T P(t-1) (X(t) \otimes X(t)) + \sigma_w^2)},$$

а для матричного

$$\Gamma(t) = \frac{P(t-1)}{(X(t) \otimes X(t))^T P(t-1) (X(t) \otimes X(t)) + \sigma_w^2}.$$

Синтезовані адаптивні процедури є узагальненням на квадратичний випадок відомих алгоритмів ідентифікації Хоге-Захарова-Кульчицького і Калмана-Мейна.

Запропонований підхід до вирішення задачі ідентифікації дозволяє відшукувати екстремальні режими функціонування квадратичного об'єкта

$$y(t) = X^T(t)G(t-1)X(t) + w(t), \quad (22)$$

де $X(t) = (x_u^T(t), x_z^T(t))^T$, $x_u(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ — вектор керування входів, $x_z(t) = (x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n, 1)^T$ — розширений вектор зовнішніх збурень, $w(t)$ — завада типу білого шуму з $M\{w(t)\} = 0$ і $M\{w^2(t)\} = \sigma_w^2 < \infty$,

$$G(t-1) = \begin{pmatrix} c_{uu}(t-1) & | & 0.5b_{uz}(t-1) \\ \hline 0.5b_{uz}^T(t-1) & | & a_{zz}(t-1) \end{pmatrix}.$$

Нехай метою управління є мінімізація виходу об'єкта з урахуванням обмежень на енергетику і динаміку керуючих дій

$$J_{t+1} = \hat{y}(t+1) + \|x_u(t+1) - x_u(t)\|_{\tilde{\Lambda}}^2 + x_u^T(t+1)Qx_u(t+1), \quad (23)$$

де $\tilde{\Lambda} = \text{diag}(\tilde{\lambda}_1, \dots, \tilde{\lambda}_m)$ — діагональна, а Q — симетрична невід'ємно визначені $(m \times m)$ -матриці вагових коефіцієнтів відповідно. У випад-

ку, коли використовується алгоритм ідентифікації з скалярним коефіцієнтом підсилення, оптимізація критерія (23) приводить до адаптивного екстремального регулятора

$$\left\{ \begin{array}{l} V_I(t) = y(t) - X^T(t)G(t-1)X(t), \\ G(t) = G(t-1) + \gamma(t)V_I(t)X(t)X^T(t), \\ h(t) = (c_{uu}(t) + \tilde{\Lambda} + Q)^{-1} = h(t-1) - \\ \quad - \gamma(t)V_I(t) \frac{h(t-1)x_u(t)x_u^T(t)h(t-1)}{1 + \gamma(t)V_I(t)x_u^T(t)h(t-1)x_u(t)}, \\ S(t+1) = b_{uz}(t)x_z(t+1) - 2\tilde{\Lambda}x_u(t), \\ x_u(t+1) = -0.5h(t)S(t+1) + \xi(t), \end{array} \right. \quad (24)$$

де $\xi(t)$ — зондуючі збурення, які забезпечують збіжність процесу ідентифікації в замкненому контурі.

Окрім цього, розглянуто різноманітні обмеження на вектор керуючих дій (прямі обмеження у вигляді нерівностей, у вигляді системи лінійних рівнянь, у вигляді системи лінійних нерівностей) і синтезовано відповідні адаптивні алгоритми екстремального керування.

Вирішено задачу адаптивного екстремального керування об'єктом класу Вінера із застосуванням регулятора зниженого порядку. Суть підходу полягає в тому, що на першому етапі розв'язується задача адаптивного екстремального управління квадратичною безінерційною частиною за допомогою одного з синтезованих екстремальних регуляторів. Результат розв'язання цієї задачі є бажаною траєкторією процесу для регулятора зниженого порядку, який здійснює керування динамічною лінійною частиною. Параметри регулятора настроюються за допомогою одного з адаптивних алгоритмів, синтезованих в другому розділі.

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням синтезованих алгоритмів. З цієї метою розроблено комплекс програм моделювання на алгоритмічній мові C++. Дано короткий опис логіч-

ної структури комплексу і інтерфейсу користувача. Приведено результати моделювання у вигляді графіків. Проведено порівняльний аналіз з традиційним ПІД-регулятором, надано рекомендації по використанню запропонованих алгоритмів. Результати моделювання підтвердили цілковиту працездатність синтезованих процедур.

У шостому розділі розглянуто синтез адаптивного ПІ-регулятора в системі управління вузлом живлення парогенераторів АЕС. Результати машинного моделювання показують, що в режимі скидання навантаження запропонований адаптивний ПІ-регулятор забезпечує вищу якість керування порівняно з традиційним регулятором, що підвищує надійність системи управління в цілому і знижує витрати на дроселювання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Розглянуто основні підходи до розв'язання задачі синтезу регуляторів зниженого порядку. Здійснено постановку задачі дослідження, обгрунтовано вибір методів дослідження і критеріїв оптимізації.

2. Розроблено і досліджено одно- і багатокрокові адаптивні регулятори зниженого порядку для ARX-моделі, засновані на оптимізації прийнятого критерія якості керування. Синтезовані алгоритми дозволяють враховувати обмеження на енергетику і динаміку управління і співпадають на обчислювальному рівні з відомими процедурами поточної ідентифікації.

3. Запропоновано методику синтезу, яка дозволяє здійснювати оперативне настроювання регулятора таким чином, щоб якість керування при цьому наближалась до деякого оптимального закону управління, який визначається поза контуром регулювання. Синтезовано і проаналізовано відповідні одно- і багатокрокові процедури настроювання, які є аналогами відомих алгоритмів оперативної ідентифікації.

4. Запропоновано схему адаптивної системи управління з використанням блоку універсальних процедур настроювання, які служать як для ідентифікації параметрів об'єкта управління, так і для настроювання регулятора зниженого порядку. При цьому скорочується обсяг потрібної пам'яті, а існуюча схема регулювання не потребує суттєвих змін, що дозволяє значно знизити вартість такої системи.

5. Показано принципову можливість використання синтезованих адаптивних регуляторів зниженого порядку для керування лінійними динамічними об'єктами з кольоровими шумами, розглянуто характерні особливості таких алгоритмів.

6. Синтезовано процедури ідентифікації квадратичних об'єктів, які використовують апіорну інформацію про характеристики діючих збурень і є аналогами алгоритмів Качмажа, Хогє-Захарова-Кульчицького і Калмана-Мейна для оцінювання параметрів лінійних систем. Показано, що синтезовані алгоритми доволі просто реалізуються в програмному вигляді, характеризуються незначним обсягом обчислювальних операцій і працюють в реальному масштабі часу.

7. Розроблено адаптивні екстремальні алгоритми управління квадратичними об'єктами, які використовують рекурентне обернення матриць і дозволяють враховувати різноманітні обмеження на вектор керуючих дій.

8. Запропоновано систему адаптивного екстремального управління об'єктом класу Вінера з використанням регулятора зниженого порядку. Показано, що даний підхід дає проектувальнику більшу свободу вибору алгоритмів ідентифікації і управління і не вимагає корінної перебудови існуючої схеми регулювання, що дозволяє значно знизити затрати на етапі технічної реалізації системи управління.

9. Проведено машинне моделювання, результати якого повністю підтверджують працездатність синтезованих алгоритмів. Проведено

порівняльний аналіз роботи запропонованих адаптивних регуляторів з традиційними, надано рекомендації по їх практичному застосуванню.

10. Синтезовані алгоритми ідентифікації і управління були використані при розробці системи управління вузлом живлення парогенераторів для Південноукраїнської АЕС. Розроблено математичне і програмне забезпечення системи регулювання продуктивності живлячого турбонасоса, що дозволило знизити взаємний вплив регуляторів рівня парогенераторів і регулятора турбонасоса, підвищити якість управління і надійність системи в цілому, зменшити втрати на дрослювання.

Економічний ефект, зумовлений впровадженням алгоритмів ідентифікації і управління, склав 370 млн. крб. (в цінах 1993 року). Частка економічного ефекту, зумовленого впровадженням результатів роботи автора, склала 30% від означеної суми, або 111 млн. крб.

ПУБЛІКАЦІ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бодянский Е.В., Запорожец О.В. Адаптивная настройка регуляторов пониженного порядка. - Харьков, 1994. - 32 с. - Деп. в ГНТБ Украины 02.03.95, N 593 - Ук95.

2. Бодянский Е.В., Запорожец О.В. Синтез процедур адаптивной настройки регуляторов пониженного порядка // Праці Другої української конференції з автоматичного керування "Автоматика-95". - Львів, 1995. - Т.1. - с. 105-106.

3. Запорожец О.В. Адаптивные алгоритмы многошаговой настройки ПИД-регуляторов // Тезисы докладов международной конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". - Туапсе, 1995. - с. 261.

4. Гнусов Ю.В., Запорожец О.В. Оптимизация прогнозов в условиях неопределенности. - Харьков, 1996. - 6 с. - Деп. в ГНТБ Украины 21.02.96, N 605 - Ук96.

5. Запорожец О.В., Полянская Ж.Н. Алгоритмы настройки ПИД-регуляторов по оптимальному закону управления // Тезисы докладов молодежной научной конференции "XXII Гагаринские чтения". - М., 1996. - Ч.4. - с. 56-57.

6. Бодянский Е.В., Запорожец О.В. Адаптивные алгоритмы для идентификации квадратичных объектов при наличии случайных шумов. - Харьков, 1994. - 13 с. - Деп. в ГНТБ Украины 01.08.94, N 1464 - Ук94.

7. Бодянский Е.В., Запорожец О.В. Об одном алгоритме адаптационной оптимизации. - Харьков, 1995. - 12 с. - Деп. в ГНТБ Украины 01.12.95, N 2597 - Ук95.

АНОТАЦІЇ

Запорожец О.В. Синтез адаптивных параметрически оптимизируемых регуляторов пониженного порядка. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 — системы и процессы управления. Харьковский государственный технический университет радиозлектроники. Харьков, 1996. Предложены одно- и многошаговые адаптивные алгоритмы настройки регуляторов пониженного порядка для линейных динамических объектов с белыми и цветными шумами. Синтезированы алгоритмы адаптивного экстремального управления квадратичными объектами с использованием настраиваемых регуляторов пониженного порядка. Разработанные процедуры совпадают на вычислительном уровне с известными алгоритмами текущей идентификации. Приводятся результаты практического применения предложенной методики

для разработки системы управления узлом питания парогенераторов АЭС.

Zaporozhets O.V. Synthesis of adaptive parameter optimal reduced order controllers. Dissertation for candidate degree of technical sciences on speciality 05.13.03 — control systems and processes. Kharkov State technical University of Radioelectronics. Kharkov, 1996. One-step and multistep adaptive algorithms for reduced order controllers tuning for linear dynamic objects with white and coloured noise were proposed. Adaptive extremal control algorithms using tuned reduced order controllers for quadratic objects were synthesized. Proposed procedures are computationally equal to well-known on-line identification algorithms. The results of the proposed method practical application to the control system development for steam generator water feeding system of NPS were presented.

Ключові слова: ідентифікація, адаптивний регулятор, алгоритм настроювання, регулятор зниженого порядку, квадратична модель, екстремальне управління.



Підписаний за підписом О.В. Запорожця

ЗАПОРОЖЕЦЬ Олег Васильович

СИНТЕЗ АДАПТИВНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЗНИЖЕНОГО
ПОРЯДКУ, ЩО ПАРАМЕТРИЧНО ОПТИМІЗУЮТЬСЯ

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Відповідальний за випуск Е.О. Дедіков

Підписано до друку 21.09.96 р. Формат 60 x 84/16. Папір друкарський.
Різографія. Умовн. друк. арк. 1,3. Умовн. фарб.-відб. 1,3. Тираж 100.

Замовлення N 286. Замовлене.

Різографія ООО "Кіпі-РІЗО", м. Харків, пр. Леніна 17^а, тел. 45-21-33

AR. 22.045

U39117

