Національна Академія наук України

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова

На правах рукопису

ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович

ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА СТАНІВ ЛІНІЙНИХ БАГАТОВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗМИТИХ ЕЛІПСОЇДАЛЬНИХ МНОЖИН

05.13.03 - системи та процеси керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ 1997

Роботу виконано в Інституті кібернетики НАН України ім. В.М. Глушкова

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
БАКАН Г.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
ГУБАРЕВ В. Ф.

кандидат технічних наук
ЖИТЕЦЬКИЙ Л. С.

Провідна організація: Національний університет ім. Т.Г. Шевченка

Захист відбудеться "1" квітня 1997 р. у 14 годин на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 01.39.03 при Інституті кібернетики НАН України за адресою:

252650 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічному архіві інституту.

Автореферат розіслано "28" лютого 1997 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Яковлєв О.С.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Задача оцінювання параметрів та фазових координат є невід'ємною частиною проблем синтезу систем керування, що характеризуються точністю, оптимальністю та адаптивністю. Традиційним під час вирішення задач ідентифікації вважається стохастичний підхід, який базується на гіпотезі про випадковий характер невизначеностей та шумів. Але використання стохастичого підходу в реальних умовах обмежене вимогою знання законів розподілу всіх неоднозначно заданих параметрів. На практиці така вимога часто не виконується (наприклад, коли недостатня повторюваність подій не дозволяє оцінити статистичні характеристики невизначених величин).

Останнім часом широке розповсюдження отримав новий напрямок вивчення проблеми оцінювання - теоретико-множинний підхід, що базується на нестохастичній трактовці невизначеності. В рамках цього підходу параметри задачі, що надають їй невизначений характер, задаються тільки множинами своїх можливих значень. Цей напрямок було розвинуто у роботах Красовського Н.Н., Куржанського А.Б., Черноусько Ф.Л., Кунцевича В.М., Пшеничного Б.М., Бакана Г.М., Schweppe F.C. та інших авторів.

Серед методів нестохастичного оцінювання визначне місце займають алгоритми гарантованого множинного оцінювання. Особливість цих методів полягає в тому, що в одночас з точковою оцінкою вектору на кожній ітерації будується ще й множинна оцінка. У випадку гарантованого еліпсоїдального оцінювання вона має вигляд багатовимірного еліпсоїда, що гарантовано містить невідомий роз'язок як свій елемент. Перевага використання еліпсоїда як множинної оцінки грунтується на наступних факторах. По-перше, еліпсоїдальна множина задається фіксованої кількістю параметрів: центром та матрицею, що визначає його конфігурацію. По-друге, за допомогою еліпсоїдів можна отримувати задовільну апроксимацію опуклих множин. По-третє, результат лінійного перетворення еліпсоїдів належить тому ж класу.

Недоліком методів гарантованого, в тому числі еліпсоїдального, оцінювання є необхідність апріорного визначення множини, яка повинна обов'язково містити в собі невідомий вектор. Неправильний вибір області допустимих значень або вибір її з великим запасом призводить до зменшення точності поточних оцінок, збільшення часу обчислень.

В зв'язку з цим зростає необхідність у нових підходах до математичного опису інформації, що характеризується високим рівнем невизначеності. Один з можливих підходів може базуватися на використанні нечітких множин як засобу формалізації невизначеностей невідомого походження. Якраз роз'язанню задач оцінювання на основі такого підходу присвячена ця робота. Тут замість гарантованих еліпсоїдальних оцінок пропонується використовувати розмиті множини (родини еліпсоїдальних оцінок з спільним центром симетрії). Для використання таких методів не треба по суті ніякої апріорної інформації про оцінюваний вектор.

Перевага такого підходу пов'язана також з можливістю створення робастних рекуррентних алгоритмів оцінювання параметрів та стану, що характеризуються грубістю або нечутливістю по відношенню до порушення прийнятих апріорних припущень. Як показано в роботі, алгоритми адаптації з використанням родин еліпсоїдальних множин можуть подолати випадки несумісності, що викликаються збоєм в роботі вимірювальної апаратури, та залишаються працездатними для нестаціонарних систем. Перелічені властивості алгоритмів оцінювання є дуже актуальними для роботи в промислових умовах.

<u>Мета роботи.</u> Постановка та роз'язання задач оцінювання параметрів та вектора фазових координат для багатовимірних об'єктів у дискретному часі при відсутності достовірної апріорної інформації про оцінюваний вектор з використанням розмитих еліпсоїдальних множин, а також використання розроблених методів та робастних алгоритмів у роз'язанні задач керування.

У відповідності до поставленої мети визначено наступні основні задачі роботи:

- теоретико-множинна постановка та роз'язок задачі оцінювання параметрів багатовимірного статичного об'єкту при відсутності апріорної інформації про оцінюваний вектор з використанням розмитих еліпсоїдальних множин та отримання робастного алгоритму оцінювання;
- розробка та аналіз робастного алгоритму спостереження лінійного динамічного багатовимірного об'єкта при відсутності апріорної інформації про невідомий вектор початкового стану;
- розробка та моделювання розмитого еліпсоїдального спостерігача зниженого порядку;

- синтез керування у динамічній системі з розмитим еліпсоїдальним спостерігачем у контурі зворотнього зв'язку;

- роз'язання задачі стабілізації лінійного багатовимірного динамічного об'єкту з використанням розроблених алгоритмів спостереження;

- розробка алгоритму адаптації параметрів математичної моделі для задачі оптимального приготування товарних бензинів.

Методи дослідження. Основні результати роботи отримано за допомогою використання теорії ідентифікації та дискретних систем керування, математичного аналізу, теорії нечітких множин, теорії стійкості, методів оптимізації та теорії матриць. Для ілюстрації ефективності отриманих теоретичних результатів використовувалось чисельне моделювання.

Наукова новизна роботи полягає в слідуючому:

- розроблено новий алгоритм перетину родини багатовимірних еліпсоїдів (розмитої еліпсоїдальної множини) та нерозмитого (детермінованого) лінійного многовиду, на основі використання якого у рамках теоретико-множинної трактовки невизначеності розроблено метод оцінювання параметрів багатовимірного статичного об'єкту при відсутності апріорної інформації про оцінюваний вектор;

- розроблено новий алгоритм оцінювання вектора фазових координат лінійного динамічного багатовимірного об'єкта з використанням розмитих еліпсоїдальних множин;

- роз'язано задачу побудови розмитого еліпсоїдального спостерігача зниженого порядку;

- в рамках теоретико-множинного підходу синтезовано алгоритм керування лінійною динамічною системою з розмитим еліпсоїдальним спостерігачем у зворотньому зв'язку;

- роз'язано задачу стабілізації лінійної динамічної системи з урахуванням множинної оцінки невідомого вектора стану;

- роз'язано задачу адаптації параметрів математичної моделі для оптимального приготування товарних бензинів з використанням розмитих еліпсоїдальних оцінок

Практична цінність. Розроблено та вивчено алгоритми оцінювання параметрів та вектору фазових координат для багатовимірних об'єктів з використанням розмитих еліпсоїдальних оцінок, прості в чисельному відношенні, працездатні в умовах нестаціонарності об'єктів та при відсутності апріорної інформації про оцінюваний вектор, а також стійкі до збоїв у роботі вимірювальної апаратури, що особливо важливо для конкретних прикладних задач. На базі цих алгоритмів побудовано алгоритм керування для лінійної багатовимірної динамічної системи з розмитим еліпсоїдальним спостерігачем у ланцюгу зворотнього зв'язку, та роз'язано задачу адаптації параметрів математичної моделі для оптимального приготування товарних бензинів з використанням розмитих еліпсоїдальних оцінок.

Реалізація результатів роботи. Дисертаційну роботу виконано у рамках теми ВГЕ 380.04 "Розробка наукових основ технології функціонування автоматичних та автоматизованих систем керування з широкими інтелектуальними можливостями", проекту 6.4.2./23-92 "Комп'ютерний комплекс програмних засобів оптимального планування неперервного виробництва в складі інформаційної мережі нафтопереробного заводу" та інших державних науково-технічних програм. Результати дисертаційної роботи у складі комплексу програм оптимального приготування товарних бензинів впроваджено на Новогорьковському НПЗ.

Додаток містить документи, що підтверджують реалізацію результатів роботи.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на засіданнях семінару "Дискретні системи керування" Наукової ради АН УРСР по проблемі "Кібернетика" (Київ, 1992-94 рр.), на симпозіумі "Питання оптимізації обчислень" (Київ, 1993 р.), на 1-й українській конференції "Автоматика-94" (Київ, 1994 р.), на 2-й українській конференції "Автоматика-95" (Львів, 1995 р.) та на 3-й українській конференції "Автоматика-96" (Севастополь, 1996 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 8 праць.

Структура та об'єм роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури, що включає 130 найменувань, та двох додатків. Загальний об'єм роботи складає 133 сторінки, з них основного тексту 120 сторінок, 14 малюнків.

СКЛАД РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність проведених досліджень, сформульовано мету та основні задачі роботи, відмічено наукову новизну, практичну цінність та реалізацію її основних результатів, наведено короткий зміст дисертації.

У першому розділі міститься огляд літератури по використанню нечітких множин у задачах керування та викладаються основні ідеї використання розмитих множин в постановці та розв'язанні задач теоретико-множинного оцінювання параметрів лінійного статичного об'єкту при відсутності апріорної інформації про оцінюваний вектор. Розглядається задача оцінювання вектора невідомих параметрів деякого багатовимірного статичного керованого об'єкту, рівняння математичної моделі якого має вигляд

$$y_k = U_k^T x^*, k = 1,2,..., \qquad (1)$$

де U_k - $(m \times n)$ - матриця $(m < n)$ керуючих дій з лінійно незалежними стовбчиками $(\text{rank}(U_k) = m)$; $y_k \in R^m$ - вихідна змінна; $x^* \in R^n$ - невідомий вектор параметрів об'єкта, k - дискретний час.

Потрібно за результатами поточних вимірів вхідної та вихідної змінних $\{(U_k, y_k), k = 1,2,\dots\}$ побудувати рекуррентний алгоритм оцінювання вектора невідомих параметрів x^* об'єкту у реальному часі при відсутності апріорної інформації про нього.

У відповідності з традиційними методами еліпсоїдального оцінювання для роз'язання поставленої задачі належить ввести апріорну множину, що обов'язково містить в собі невідомий розв'язок x^*. Але в зв'язку з відсутністю апріорної інформації про оцінюваний вектор в даному випадку цього зробити не можна. Тому з довільно заданим початковим вектором $\bar{x}_0$, а також з кожним вектором шуканої послідовності $\left\{\hat{x}_k \in R^n, k = 0,1,...\right\}$ зв'язується родина багатовимірних еліпсоїдів

$$L\left(\alpha;\alpha_k^*,\hat{x}_k,\overline{H}_k\right) = \left\{x \in R^n : \left(x - \hat{x}_k\right)^T \overline{H}_k^{-1}\left(x - \hat{x}_k\right) \le \varphi\left(\alpha;\alpha_k^*\right)\right\}, \qquad (2)$$

де $\hat{x}_k \in R^n$ - центр симетрії родини; $\overline{H}_k > 0$ - додатньо-визначена матриця;

$$\varphi_k(\alpha;\alpha_k^*) = \frac{\alpha_k^* - \alpha}{\alpha_k^* \alpha} \tag{3}$$

- числова функція, що залежить від змінної $\alpha \in \left(0, \alpha_k^*\right]$ та параметра $\alpha_k^* \in \left(0,1\right]$, фіксованого для кожного номера наближення.

Родину (2) можна розглядати як розмиту множину. Відповідну функцію належності можна знайти, нормуючи діапазон зміни параметра α.

Оскільки лінії рівню множини (4) утворюють еліпсоїди в просторі R^n, то ця множина названа розмитою еліпсоїдальною множиною та розглядається у ролі множинної оцінки невідомого вектора параметрів у k-й момент дискретного часу. Параметри початкової множинної оцінки призначаються довільно.

Покладаючи $\delta = \alpha / \alpha_k^*$, (2) можна представити у вигляді

$$L_k(\delta; \hat{x}_k, H_k) = \left\{ x \in R^n : (x - \hat{x}_k)^T H_k^{-1} (x - \hat{x}_k) \le \frac{1-\delta}{\delta} \right\}, \tag{4}$$

де

$$H_k = \overline{H}_k / \alpha_k^*. \tag{5}$$

Мірою точності наближення $\hat{x}_k$ служить «розмір» еліпсоїда родини (4) при $\delta = 0.5$. Для визначеності в ролі характеристики точності розмитої еліпсоїдальної оцінки будемо розглядати детермінант матриці H_k.

Для спрощення позначень родину виду (2) будемо позначати $L_k(\alpha)$, а родину вигляду (4) - $L_k(\delta)$.

Метою задачі є побудова послідовності родин

$$\left\{ L_k(\delta) \subset R^n,\ k = 0,1,\ldots \right\}, \tag{6}$$

послідовність центрів яких збігається до невідомого вектору параметрів. При цьому, починаючи з деякого скінченого значення $k = k^* < \infty$ має місце гарантована оцінка $x^* \in L_k(\delta)\big|_{\delta=0.5} \quad \forall k \geq k^*$.

Ідея запропонованого методу оцінювання зводиться до наступного.

Кожне з рівнянь в (1) визначає у просторі лінійний многовид

$$S_{k+1} = \left\{ x \in R^n : U^T_{k+1} x = y_{k+1} \right\}. \tag{7}$$

Припускається, що на k-ому кроці родину багатовимірніх еліпсоїдів виду (2) побудовано (для $k = 0$ це буде апріорна родина).

Параметри родини $L_{k+1}(\alpha)$ визначаються шляхом перетину родини множин $L_k(\alpha)$ з нерозмитою множиною S_{k+1}. Це можна зробити за допомогою наступної теоретико-множинної схеми

$$L_{k+1}(\alpha) \supseteq L_k(\alpha) \bigcap S_{k+1} \quad \forall \alpha \in (0, \alpha^*_{k+1}]. \tag{8}$$

Отримано алгоритм перетину розмитої еліпсоїдальної множини та детермінованого лінійного многовиду, з використанням якого розроблено рекурентний алгоритм побудови послідовності (6). Рівняння цього алгоритму мають вигляд:

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + H_k U_{k+1} (U^T_{k+1} H_k U_{k+1})^{-1} \Delta_{k+1}, \tag{9}$$

$$H_{k+1} = \left[H_k - (1-\beta^2_k) H_k U_{k+1} (U^T_{k+1} H_k U_{k+1})^{-1} U^T_{k+1} H_k \right] \gamma^2_k, \tag{10}$$

де

$$\gamma^2_k = 1 + \sigma^2_k,\ \sigma^2_k = \Delta^T_{k+1} \left(U^T_{k+1} H_k U_{k+1} \right)^{-1} \Delta_{k+1},\ \Delta_{k+1} = y_{k+1} - U^T_k \hat{x}_k.$$

Досліджено властивості отриманого алгоритма. При цьому запропоновано нову модифікацію алгоритму, що пов'язана з можливістю регулювати процеси уточнення або «розмивання» родини еліпсоїдальних оцінок. Це дозволяє відслідковувати заздалегідь непередбачені зміни вектора оцінюваних параметрів. В результаті алгоритм отримує властивість «робастності» або грубості по відношенню до апріорної гіпотези про незмінність оцінюваного вектору. Наведено результати чисельного моделювання отриманих алгоритмів.

<u>У другому розділі</u> розвивається методика використання розмитих множин у задачах оцінювання. Тут роз'язується задача оцінювання фазового стану лінійного багатовимірного динамічного об'єкту з використанням розмитих еліпсоїдальних оцінок.

Динаміка об'єкту керування описується у фазовому просторі станів рівнянням у дискретному часі

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k v_k. \tag{11}$$

Рівняння каналу вимірів має вигляд

$$y_k = U_k^T x_k. \tag{12}$$

У рівняннях (11), (12) $x_k \in R^n$ - вектор стану, $v_k \in R^l$ - вектор керування розмірності $l \le n$, $y_k \in R^m$ - спостережний вихід об'єкту, A_k - матриця динаміки розмірності $(n \times n)$, B_k - $(n \times l)$ - матриця, U_k - матриця розмірності $(n \times m)$.

Припускається, що система (11)-(12) задавольняє умові повної спостережності та для всіх моментів дискретного часу значення параметрів відомі.

Необхідно в умовах відсутності апріорної інформації про початковий вектор стану побудувати алгоритм типу спостерігача, що генерує послідовність оцінок $\hat{x}_k$ вектора фазових координат об'єкту.

Аналогічно з розділом 1 з кожним вектором шуканої послідовності оцінок зв'язується родина еліпсоїдальних множин вигляду (2). Параметри апріорної родини призначаються довільно.

Якщо родину $L_k(\alpha)$ побудовано (для $k=0$ це буде апріорна родина),то для побудови розмитої родини $L_{k+1}(\alpha)$ використовується наступна процедура.

Розглядається образ $\tilde{L}_{k+1}(\alpha) = L(\alpha; \hat{x}_{k+1}, \hat{H}_{k+1}, \tilde{\alpha}_{k+1})$ множини $L_k(\alpha)$ при його відображенні за допомогою лінійного перетворення (11)

$$\tilde{L}_{k+1}(\alpha) = \bigcup_{x_k \in L_k(\alpha)} \left\{ A_k x_k + B_k v_k \right\}, \tag{13}$$

параметри якого визначаються співвідношеннями

$$\widetilde{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k v_k, \tag{14}$$

$$\hat{H}_{k+1} = A_k \overline{H}_k A_k^T, \tag{15}$$

$$\widetilde{\alpha}_{k+1} = \alpha_k^*. \tag{16}$$

Рівняння каналу спостереження (12) визначає у просторі R^n лінійний многовид

$$S_{k+1} = \left\{ x \in R^n : U_{k+1}^T x = y_{k+1} \right\}. \tag{17}$$

Тому родина $L_{k+1}(\alpha)$ будується по схемі послідовних відтинів

$$L_{k+1}(\alpha) \supseteq \widetilde{L}_{k+1}(\alpha) \bigcap S_{k+1} \quad \forall \alpha \in (0, \alpha_{k+1}^*], \tag{18}$$

де α_{k+1}^* - максимальне значення параметру, при якому перетин у (18) непорожній. У позначеннях (4), (5) алгоритм спостереження має вигляд

$$\hat{x}_{k+1} = \widetilde{x}_{k+1} + \widetilde{H}_{k+1} U_{k+1} (U_{k+1}^T \widetilde{H}_{k+1} U_{k+1})^{-1} \cdot \Delta_{k+1}, \tag{19}$$

$$H_{k+1} = (\widetilde{H}_{k+1} - (1-\beta_k^2) \widetilde{H}_{k+1} U_{k+1} (U_{k+1}^T \widetilde{H}_{k+1} U_{k+1})^{-1} U_{k+1}^T \widetilde{H}_{k+1}) \cdot \gamma_k^2, \tag{20}$$

де

$$\Delta_{k+1} = y_{k+1} - U_{k+1}^T \widetilde{x}_{k+1},$$

$$\gamma_k^2 = 1 + \sigma_k^2,$$

$$\sigma_k^2 = \Delta_{k+1}^T \left(U_{k+1}^T \widetilde{H}_k U_{k+1} \right)^{-1} \Delta_{k+1}.$$

Встановлено достатню умову збіжності послідовності багатовимірних об'ємів еліасоїдів до нуля, що в свою чергу є необхідною умовою збіжності точкових оцінок до оцінюваного вектора.

<u>У третьому розділі</u> отримано розмитий еліпсоїдальний спостерігач з заздалегідь заданою динамікою. У його основі лежить ідея зниження порядку спостерігача, що вперше була запропонована Луєнбергером.

Рівняння об'єкту має вигляд

$$x_{k+1}=Ax_k+Bu_k,\ x_k\Big|_{k=0}=x_0, \tag{21}$$

$$y_k=c^T x_k, \tag{22}$$

де

$$A=\begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix},\quad B=\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix},\quad c=\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

При цьому припускається, що перша координата вектору стану вимірюється точно. Тому задача зводиться до оцінювання решти $(n-1)$ компонент.

За допомогою матриці перетворень

$$L=\begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & \cdots & 0 \\ -\beta_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\beta_{n-1} & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

де $\beta_1,\cdots,\beta_{n-1}$ - довільні дійсні числа, але $\beta_{n-1}\neq 0$,

рівняння об'єкту (21) можна переписати у вигляді

$$\begin{pmatrix} y_{k+1} \\ \hline z_{k+1} \end{pmatrix}=P\cdot A\cdot P^{-1}\begin{pmatrix} y_k \\ \hline z_k \end{pmatrix}+P\cdot B\cdot u_k, \tag{24}$$

або

$$\begin{cases} z_{k+1}=A_{zz}z_k+U_k \\ Y_{k+1}=e_{n-1}^T z_k, \end{cases} \tag{25}$$

переходячи таким чином до оцінювання вектора z розмірності $(n-1)$.

З кожним вектором шуканої послідовності оцінок $\hat{z}_k$ зв'яжемо родину

$$L_k(\delta)=L_k(\hat{z}_k,H_k;\delta)=\left\{z\in R^{n-1}:(z-\hat{z}_k)^T H_k^{-1}(z-\hat{z}_k)\le\frac{1-\delta}{\delta}\right\}. \quad (26)$$

Нове рівняння спостереження (25) задає у просторі R^{n-1} лінійний многовид

$$S_{k+1}=\left\{z\in R^{n-1}:y_{k+1}-e_{n-1}^T z=0\right\}. \quad (27)$$

Отримані за схемою послідовних відтинів рівняння спостерігача зниженого порядку мають вигляд

$$\hat{z}_{k+1}=A_{zz}\hat{z}_k+U_k+A_{zz}H_k e_{n-1}(e_{n-1}^T H_k e_{n-1})^{-1}\Delta_k,$$

$$H_{k+1}=A_{zz}(H_k-(1-\beta^2)H_k e_{n-1}^T(e_{n-1}^T H_k e_{n-1})^{-1}e_{n-1}H_k)\cdot A_{zz}^T\rho_k^2. \quad (28)$$

де $\Delta_k=y_{k+1}-e_{n-1}\hat{z}_k$, $\rho_k^2=1+\Delta_k^2\left(e_{n-1}^T H_k e_{n-1}\right)^{-1}$, $\beta\in(0,1)$ - коефіцієнт стиснення простору.

Шляхом вибору елементів $\beta_1,\cdots,\beta_{n-1}$ матриці перетворення (23) можна забезпечити довільну динаміку процесу спостереження. Запропонований алгоритм не потребує визначення власних чисел матриць, що є його перевагою порівняно з алгоритмом Луєнбергера. Отриманий спостерігач узагальнено на випадок багатовимірного об'єкту.

В кінці кожного розділу наведено результати чисельного моделювання роботи алгоритмів. Всі описані алгоритми не потребують ніякої апріорної інформації про оцінюваний вектор, а також працездатні у випадку порушення апріорних гіпотез про об'єкт.

У четвертому розділі розглядаються деякі аспекти практичного використання розмитих еліпсоїдальних алгоритмів оцінювання.

Спочатку розглядається задача синтезу керування у замкненій лінійній динамічній системі з розмитим еліпсоїдальним спостерігачем у ланцюгу зворотнього зв'язку.

Використання подібних оцінок у зворотньому зв'язку керованих динамічних систем звичайно зводиться до формальної заміни невідомого вектору стану на його точкову оцінку. При цьому властивості множинної оцінки практично не використовувались. Як наслідок, на початковому етапі роботи об'єкту, коли точність оцінок ще низька, виникають великі витрати енергії керування, а також пов'язані з цим значні зміни вектора стану. В даному розділі розглядається задача більш раціонального вибору керувань на початковому етапі роботи об'єкту керування з урахуванням множинних оцінок невідомого стану. Використання розмитого еліпсоїдального спостерігача у зворотньому зв'язку надає системі властивості робастності.

Розглядається багатовимірний об'єкт вигляду

$$x_{k+1} = Ax_k + Bv_k, \tag{29}$$

$$y_k = C^T x_k, \tag{30}$$

Починаючи з моменту часу N (N > n) задано бажану послідовність станів об'єкту виду

$$\left\{ x^*_N, x^*_{N+1}, \ldots, x^*_{N+j}, \ldots \right\}. \tag{31}$$

Необхідно побудувати послідовність керувань вигляду

$$\left\{ v_0, v_1, \ldots \right\}, \tag{32}$$

яка мінімізує витрати енергії на керування на початковому етапі роботи алгоритма відповідно до критерію

$$\sum_{j=0}^{N-1} v_j^T v_j \to \min \tag{33}$$

та забезпечує перехід системи до станів (31).

У контурі зворотнього зв'язку використовується еліпсоїдальний спостерігач з розділу 2.

Керування синтезуються наступним чином. Послідовно підставляючи x_k у рівняння (29), та приймаючи до уваги задану послідовність станів (31), після нескладних перетворень із (29) отримаємо рівняння

$$Q_N V_k = b_k - \xi_k, \tag{34}$$

де позначено

$$Q_N = \left[A^{N-1}B \mid A^{N-2}B \mid \ldots \mid B \right] \in R^{n\times(Nm)}, \quad \xi_k = A^N (x_k - \hat{x}_k)$$

$$V_k = \left[v_k^T \mid v_{k+1}^T \mid \ldots \mid v_{k+(N-1)}^T \right]^T \in R^{Nm}, \quad b_k = x^*_{k+N} - A^N \hat{x}_k. \tag{35}$$

Розв'язок рівняння (34) з мінімальною евклідовою нормою має вигляд

$$V_k = Q_N^{+}\left(b_k - \xi_k\right), \tag{36}$$

де Q_N^{+} - псевдообернена матриця.

Норма V_k мінімальна та дорівнює нулю, якщо $\xi_k = b_k$. Інакше V_k вибирається як вектор, що мінімізує витрати енергії. Таким чином, у ролі керуючого впливу на кроці k вибирається перша компонента вектора V_k, що визначається за формулою

$$V_k^{*} = \begin{cases} 0, & \text{як що} \quad \hat{x}_k^T H_k^{-1} \hat{x}_k \le 1, \\ -\left(1 - q_k\right) Q_N^{+} b_k, & \text{як що} \quad \hat{x}_k^T H_k^{-1} \hat{x}_k > 1. \end{cases} \tag{37}$$

де $q_k = \left(b_k^T L_{k,N}^{-1} b_k\right)^{-1/2}$, $L_{k,N} = A^N H_k \left(A^N\right)^T$.

Таким чином, на початку роботи алгоритму, коли точність керування ще мала, керуючі впливи синтезуються відповідно до алгоритму (37). При цьому мінімізуються витрати енергії на керування. Коли точність оцінок стає достатньою, переходимо до відомого алгоритму керування за оцінкою. Чисельне моделювання показало високу ефективність запропонованого алгоритму. Було проведено порівняльне моделювання запропонованого алгоритма та класичного алгоритма керування за оцінкою. Класичний алгоритм неможливо використовувати на перехідному етапі. Розроблений алгоритм виявився працездатним в цих умовах.

Використання розмитого спостерігача у контурі зворотнього зв'язку забезпечує властивість робастності алгоритму.

Отриманий у першій главі розмитий алгоритм оцінювання запропоновано використовувати у задачі оптимального приготування товарних бензинів.

Проблема оптимального компаундування нафтопродуктів з використанням сучаних засобів обчислювальної техніки є однією з основних задач, що виникають під час створення інтегрованих систем керування процесами нафторереробки.

Отримані на технологічних установках напівфабрикати (компоненти бензинів) z_i, $i = 1,2,\ldots,n$ поступають до товарного блоку нафтопереробного заводу та змішуються у визначених пропорціях S з метою отримання товарних бензинів

$$y = Sz, \tag{38}$$

де S - матриця пропорцій змішування напівфабрикатів.

Якість Φ_y товарних продуктів в загальному випадку є нелінійною функцією, що залежить від рецептури змішування S та якості Φ_z напівфабрикатів

$$\Phi_{yi} = f_i\left(S, \Phi_{zi}\right),\ i = 1 \cdots n_{\Phi},$$

де n_{Φ} - число якісних характеристик товарних продуктів, f_i - нелінійні вектор-функції невідомого вигляду.

Лінійна апроксимація вектор-функцій f_i в робочих діапазонах їх використання призводить до моделі адитивного процесу змішування

$$\Phi_{yi} = S\Phi_{zi}B_i,\ i = 1 \cdots n_{\Phi}, \tag{39}$$

де B_i - вектори параметрів (коефіцієнти регресії) математичної моделі, що, як правило, визначаються експериментально на нафтепереробних заводах у лабораторних умовах.

Під час роз'язання комплексу задач оптимального приготування бензинів використано лінійну модель виду (39).

Для визначення невідомих параметрів B_i застосовується розмитий еліпсоїдальний алгоритм оцінювання з першого розділу дисертаційної роботи вигляду

$$\hat{B}_{k+1} = \hat{B}_k + H_k U_{k+1} (U^{T}_{k+1} H_k U_{k+1})^{-1} \Delta_{k+1}, \tag{40}$$

$$H_{k+1} = \left[H_k - (1-\beta^2_k) H_k U_{k+1} (U^{T}_{k+1} H_k U_{k+1})^{-1} U^{T}_{k+1} H_k\right] \gamma^2_k, \tag{41}$$

Для спрощення запису індекс i при B_i випущено.

Кожний раз, при зміні складу вхідних компонентів, проводиться ряд експериментів по їх змішуванню в різних пропорціях та вимірюється якість отриманих товарних бензинів. На основі вимірів за допомогою алгоритму (40)-

(41) оцінюється невідомий вектор параметрів. Після цього роз'язується задача пошуку оптимальної рецептури змішування. Цю задачу роз'язано Долею В.І. за допомогою методів лінійного програмування.

На базі алгоритмів оптимізації за участю автора розроблено комплекс програм змішування бензинів, що використовується на Новогорковському нафтопереробному заводі під час планування виробництва у задачі розрахунку оптимальної рецептури змішування бензинів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. На основі нестохастичного підходу розроблено та досліджено алгоритм оцінювання параметрів багатовимірного статичного об'єкту з використанням розмитих эліпсоїдальних множин. Отриманий алгоритм є працездатним при відсутності апріорної інформації про оцінюваний вектор та у випадку порушення апріорних гіпотез про об'єкт керування.

2. Розроблено та досліджено робастний алгоритм оцінювання вектора фазових координат лінійного багатовимірного динамічного об'єкту. Отримано необхідні умови збіжності алгоритму.

3. З використанням розмитих еліпсоїдальних оцінок побудовано спостерігач зниженого порядку, що забезпечує довільну наперед задану динаміку процесу спостереження.

4. З використанням розмитого еліпсоїдального спостерігача у контурі зворотнього зв'язку побудовано алгоритм керування лінійним багатовимірним об'єктом з урахуванням множинних оцінок невідомого стану, що мінімізує витрати енергії на керувння на початковому етапі роботи об'єкту.

5. Отримано алгоритм стабілізації лінійного багатовимірного об'єкту керування з розмитим еліпсоїдальним спостерігачем у контурі зворотнього зв'язку.

6. Запропоновано алгоритм адаптації параметрів математичної моделі для задачі оптимального приготування товарних бензинів. Комплекс програм оптимального приготування бензинів працює на Новогорьковському НПЗ.

Основні положення дисертації викладено у наступних працях:

1. Бакан Г.М., Куссуль Н.Н., Нижниченко Е.А., Шелестов А.Ю. Размытый эллипсоидальный наблюдатель пониженного порядка.- Киев, 1996.- 13с.- (Препр./ ИК НАН Украины им. В.М. Глушкова; 96-7).
2. Бакан Г.М., Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Размытая эллипсоидальная идентификация параметров многомерных линейных статических объектов// Автоматика.- 1993.- № 5.- С.50-60.
3. Бакан Г.М., Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Метод решения систем нестационарных линейных алгебраических уравнений с использованием размытых множеств// Труды симп. «Питання оптимізації обчислень».- Киев.- 1993.- С. 12.
4. Доля В.И., Тютюнник Л.И., Шелестов А.Ю. Математические и программные средства решения на персональной ЭВМ комплекса задач оптимального приготовления товарных бензинов// Нефтепереработка и нефтехимия.- 1993.- № 8.- С. 19-23.
5. Доля В.И., Тютюнник Л.И., Шелестов А.Ю. Алгоритмическое и программное обеспечение комплекса задач оптимального планирования нефтеперерабатывающего производства// Тезисы первой украинской конф. «Автоматика-94», часть 2, с. 408.
6. Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Наблюдение состояния линейных многомерных динамических объектов с использованием размытых эллипсоидальных множеств// Труды второй укр. конф. "Автоматика-95",-Львов.-1995.- Т.1.-С. 28.
7. Куссуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Оценивание фазового состояния линейных многомерных динамических объектов с использованием размытых эллипсоидальных множеств// Проблемы управления и информатики.- 1995.- № 1.- С. 53-63.
8. Нижниченко Е.А., Шелестов А.Ю. Стабилизация линейного динамического объекта с эллипсоидальным наблюдателем в цепи обратной связи// Тезисы докл. третьей укр. конф. «Автоматика-96»,- Севастополь.- 1996.- Т.1.- С. 74.

Шелестов А.Ю. Оценивание параметров и состояний линейных многомерных объектов с использованием размытых эллипсоидальных множеств.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 — системы и процессы управления, Институт кибернетики НАНУ, Киев, 1997.

Защищается 8 научных работ, в которых содержатся теоретические и практические результаты по оцениванию параметров и состояний многомерных объектов с использованием размытых эллипсоидальных множеств, а также результаты численного моделирования разработанных алгоритмов. Использование размытых эллипсоидальных оценок обеспечивает свойство робастности полученных алгоритмов, что особенно актуально для работы алгоритмов оценивания в промышленных условиях. Полученные алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения.

Shelestov A.Yu. Parameter and state estimation for linear multidimensional objects using fuzzy ellipsoidal sets.

Dissertation for the candidate of technical sciences scientific degree on a speciality 05.13.03 - systems and processes of control, V.M. Glushkov's Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences, Kiev, 1997.

Eight publications are defended containing theoretical and practical results on parameter and state estimation for multidimensional objects using fuzzy ellipsoidal sets and results of digital modelling of developed algorithms. Use of fuzzy ellipsoidal estimates provides the robustness property of the algorithms, that is very important for work of estimation algorithms in industry conditions. Developed algorithms are realised in the software.

Ключові слова: алгоритм спостереження, керування, множинна оцінка, розмита множина, робастність.

Підписано до друку 26.02.97р. Формат 60х84 1/16.
Папір друкарський № 2. Друк офсетний.
Умов. друк. л. 1,16. Фіз. друк. л. 1,25.
Замовлення 250. Тираж 100.
Вул. Суворова, 4/6. КОС.