

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

На правах рукопису

ГРИЦЮК ВІРА ІЛЛІВНА

УДК 681.5.015:519.6

**ФАКТОРИЗОВАНІ МЕТОДИ І
АЛГОРИТМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ
ПРИ КОРРЕЛЬОВАНИХ ВИМІРЮВАННЯХ**

05.13.01 — Управління в технічних системах

**Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**



00777934 (.)

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі систем техніки Харківського державного технічного університету радіоелектроніки.

Науковий керівник:

— доктор технічних наук, професор Петров Е. Г.

Офіційні опоненти:

— доктор технічних наук, професор Руденко О. Г.;

— кандидат технічних наук, доцент Гребенник В. Д.

Провідна організація — Київський політехнічний інститут.

Захист відбудеться 29 березня 1995 року
о 14 годині на засіданні спеціалізованої ради К 068.037.01
в Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки за адресою: 310726, Харків — 726, пр. Леніна, 14

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного технічного університету радіоелектроніки.

Автореферат розіслано 28 лютого 1995 року.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук,
професор

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Е. О. ДЕДІКОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В зв'язку з пред'явленням все більших вимог до якості процесів управління і прогнозування у різних галузях науки і техніки проблема ідентифікації стає надзвичайно важливою. Побудування моделі з достатньою точністю визначає потенційно досягну ефективність системи управління в цілому. Характерними особливостями моделей складних реальних об'єктів є виродженість, погана обумовленість інформаційної матриці.

В зв'язку з цим є актуальною розробка стійких методів і алгоритмів синтезу моделі, які дозволяють збільшити точність оцінювання параметрів, і ефективних методів параметричної ідентифікації динамічних об'єктів.

Відмінність реальних процесів від процесів, які описують моделі, може приводити до розбіжності процесів рекурентного оцінювання, коли фактичні похибки оцінювання наростають. В зв'язку з цим виникає необхідність створення нових методів, які дозволяють дістати стійкі оцінки за рахунок введення факторизацій і модифікацій.

Ціль дисертаційної роботи - розробка, дослідження і практична реалізація методів і алгоритмів оптимізації моделі при корельованих входних змінних, які дозволяють підвищити точність оцінювання параметрів моделі, а також побудування стійких методів і алгоритмів параметричної ідентифікації динамічних об'єктів.

Задачі дослідження. У відповідності до викладеної цілі в роботі вирішуються такі задачі дослідження:

- на основі порівняльного аналізу класифікувати відомі

методи і алгоритми вибору структури моделі із заданого класу, проаналізувати методи і алгоритми параметричної ідентифікації в умовах неточності задання моделі системи, виявити переваги і недоліки цих методів;

- розробити методи і алгоритми оптимізації складності моделі при коррельованих змінних, які мають високу точність і стійкість;

- розробити обчислювально ефективні модифіковані методи і алгоритми параметричної ідентифікації динамічних об'єктів, які дозволяють дістати більш точні і стійкі оцінки.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі використано методи регресійного аналізу, теорії матриць і матричного аналізу, математичної статистики. Експериментальна перевірка отриманих результатів здійснювалась на основі математичного моделювання роботи алгоритмів на ЕОМ.

На захист виносяться розробка, дослідження і практична реалізація методів і алгоритмів оптимізації моделі при коррельованих входних діяннях, які підвищують точність оцінювання параметрів моделі, а також побудування стійких методів і алгоритмів параметричної ідентифікації динамічних об'єктів.

Наукова новизна роботи. 1. Розроблено алгоритм оптимізації моделі, який дозволяє дістати краще обумовлені матриці, заснований на ортогональному розкладанні. 2. Побудовано факторизований алгоритм оцінювання, заснований на ортогональних перетвореннях і його модифікації, мінімізуючі обчислювальні витрати. 3. Доведені нові співвідношення, узагальнюючі результати, одержані для рекурентного перелічення матричних факторизацій при одноранговій модифікації. 4. Розроблені

нові рекурентні факторизовані алгоритми модифікованого методу найменших квадратів для оцінки параметрів, які змінюються за часом. Здійснені дослідження абіжності розроблених алгоритмів. 5. Побудовано рекурентний факторизований алгоритм декомпозиції для вирішення загальної задачі оцінювання параметрів. 6. Запропонована методика вибору конкретного алгоритму з указаних при вирішенні реальних задач.

Практична цінність роботи. Розроблені методи і алгоритми дозволяють успішно вирішувати широке коло задач ідентифікації, як для статичних так і для динамічних об'єктів. Визначені особливості застосування модифікованих алгоритмів факторизації дозволяють одержати більш точні і стійкі оцінки. Одержані нові перспективні для застосування алгоритми, мінімізуючі обчислювальні витрати. Розроблені алгоритми реалізовані у вигляді програмного комплексу (ПК). Застосування його на практиці доцільно для вирішення задач ідентифікації, планування і управління і дозволяє підвищити експлуатаційно-технічні характеристики, надійність, якість прогнозування і управління процесами різної природи.

Реалізація результатів роботи. Програмний комплекс, який реалізує розроблені методи і алгоритми використано при проектуванні промислових систем випробувань при виробництві дизельних двигунів у СПКТІ АС м. Харкова. Результати впровадження програмного комплексу підтвердили можливість використання в практиці теоретичних розробок, які одержані в даній дисертаційній роботі.

Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використані при підготовці курсів "Модельовання систем", "Програмне забезпечення САПР", "Цифрова

обробка інформації" на кафедрі системотехніки Харківського державного технічного університету радіоелектроніки.

Апробація роботи. Основні положення і висновки дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 4-ій Всесоюзній школі "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" (Туапсе, 1990), Міжнародній науково-технічній конференції "Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях" (м. Львів, 1991), Міжнародній школі "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" (Туапсе, 1992), на семінарах Наукової ради АН України з проблеми "Кибернетика" "Системы автоматического контроля и управления" (м. Харків, 1990-1991).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 9 друкованих роботах.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав і закінчення, двох додатків, містить 9 малюнків, 1 таблицю, включає бібліографію з 105 використаних джерел. Загальний обсяг дисертації 165 сторінок.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми і необхідність розробки методів і алгоритмів стійкої ідентифікації об'єктів управління, сформульовані цілі і задачі дослідження, відзначена наукова новизна і практична цінність роботи, стисло викладені одержані результати.

В першій главі проведено аналіз існуючих методів вибору моделі, виявлені їх переваги і недоліки. Проаналізовані

проблеми вирішення задач параметричної ідентифікації об'єктів управління. Проведений огляд підтвердив актуальність розробки нових стійких алгоритмів.

Необхідність визначення структури і параметрів моделей складних систем за даними спостережень виникає майже в усіх галузях наукової і практичної діяльності, таких як техніка, фізика, хімія, економіка та ін. Тому розглядені в даній роботі методи ідентифікації можна використати у галузях, де здійснюється моделювання по входній і вихідній інформації.

Вибір структури моделі істотно відбивається як на якості одержаної моделі, так і на її ціні. Якість відновленої моделі може бути оцінена по критерію похибки, який є функціоналом від виходу системи і виходу моделі. Зусилля по розрахунку моделі, які визначають її ціну, дуже залежать від структури моделі, котра арештою визначає можливість отримання jednoznacznich обґрунтованих оцінок вектора параметрів, а також обчислювальну складність алгоритму. Найкраща структура моделі є компромісом між гнучкістю, яка виражається у використанні структур моделей, описуючих самі різні системи, і економією, яка вимагає не використовувати занадто великої кількості параметрів. В результаті задача структурної ідентифікації полягає в шуканні мінімуму критерію якості моделі

$$\hat{\mu} = \arg \min_{\mu \in \Omega} W(y_n, \mu(X_n, \hat{\beta}_n^{\mu})), \quad (1)$$

де $\hat{\beta}_n^{\mu} \in D_{\mu} \subset \mathbb{R}^m$ вектор параметрів моделі, який оцінюється тим чи іншим методом по даним спостережень, матриця $X_n (n \times m)$ і вектор $y_n (n \times 1)$ представляють результати спостережень за об'єктом. Шукана модель належить множині Ω . Проведений

аналіз основних критеріїв структурної ідентифікації показав, що вони спрямовані на відшукання такого опису системи, котрий дає найменшу середньоквадратичну похибку. Обмеження ускладнень моделей, які вибрані, забезпечується присутністю штрафу за складність. Застосування методів відшукання оптимальної структури може бути ускладнено рядом проблем. До них належать проблема зсунення і нестійкості оцінок при сильній кореляції між незалежними змінними. Вибір змінних в рівнянні регресії, побудований на статистиці, яка залежить і.д. зсунення і випадкової похибки оцінки опису має ряд недоліків: необхідно обчислювати 2^m коефіцієнтів регресії, де m - кількість регресорів в повному рівнянні, оцінки коефіцієнтів всіх рівнянь, крім повного, зсунені. Регресійний аналіз на головних компонентах дозволяє скоротити кількість незсунено оцінених коефіцієнтів до m .

Але кількість головних компонент, які використовуються, звичайно не оптимізується, через те що вона визначається вибраною часткою дисперсії виходу або інформаційних характеристик об'єкта. Отже, необхідно розробити метод побудови оптимальної моделі при корельованих змінних, який дозволяє збільшити точність оцінювання параметрів моделі.

Багато моделей (ARX, ARMAX, ARARX) можна описати різнцевим рівнянням

$$A(q^{-1})y_k = B(q^{-1})x_k + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2)$$

де y_k - вихід, x_k - вхід, $\varepsilon_k = C(q^{-1})\xi_k / D(q^{-1})$ - корельо-

вана завада, $E[\xi_k] = 0$, $E[\xi_k^2] = \sigma^2$, ξ_k - білий шум, q^{-1} оператор зсуву, A, B, C, D - поліноміальні оператори такого вигляду:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}; \quad (3)$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m}; \quad (4)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_l q^{-l}; \quad (5)$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_e q^{-e}; \quad (6)$$

Задача параметричної ідентифікації системи, яка описана моделлю (2)-(6), складається в визначенні в кожний момент часу по реалізаціям $-y_{k-1}, \dots, -y_{k-n}, x_{k-1}, \dots, x_{k-m}$ вектора невідомих параметрів $\bar{\beta}_k = (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m)^T$.

Якщо позначити

$$y^k = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix}; \quad \varepsilon^k = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{pmatrix}; \quad F^k = \begin{pmatrix} f_1^T \\ \vdots \\ f_k^T \end{pmatrix},$$

де $f_k = (-y_{k-1}, \dots, -y_{k-n}, x_{k-1}, \dots, x_{k-m})^T$, то маємо

$$y^k = F^k \bar{\beta}_k + \varepsilon^k. \quad (7)$$

Для одержання оцінок параметрів моделі (2) часто використовується метод найменших квадратів (МНК), через те що він вимагає мінімум апріорної інформації. Але застосування

класичних схем методу НК може бути ускладнено рядом проблем. Відомі модифікації МНК, які дозволяють одержати неасу-нені оцінки параметрів, є обчислювально нестійкими. Це ав'я-вано з тим, що якщо матриця коваріацій погано обумовлена, то малі зміни у вхідних і вихідних змінних сильно впливають на результати оцінювання параметрів. У випадку оцінювання пара-метрів, які змінюються за часом в умовах невимірних завад і неточності завдання моделі системи також необхідно побуду-вання методів, маючих збіжність і точність. В ав'язку з цим в даній роботі розроблені модифіковані факторизовані ме-тоди параметричної ідентифікації, які дозволяють дістати стійкі оцінки. Для розв'язання цих задач необхідно розробити ефективний метод оптимізації моделі, побудований на ортогональному розкладанні, довести нові співвідношення для рекурентного перелічення факторизованої оновленої коваріаційної матриці, а потім на їх основі розвинути нові факторизовані алгоритми ідентифікації об'єктів, котрі будуть мати обчислювальну стійкість.

Друга глава присвячена синтезу моделі при корельо-ваних змінних з використанням методу ортогоналізації. На основі здобутих результатів розробляється алгоритм оптиміза-ції моделі при виродженій інформаційній матриці за допомогою сингулярного розкладання.

Мається на увазі, що опис задається P -мірною вектор-функцією $\theta(x, \beta)$ у вигляді

$$\theta(x, \beta) = X(x)\beta, \quad (8)$$

де $X(x)$ - матриця розміру $(p \times m)$, елементами якої служать

відомі функції $h_{kr}(x)$, визначені на області \mathcal{X} , яка нас цікавить, β - невідомий вектор параметрів розміру m . Потрібно способом проведення n рівноточних експериментів над кожною складовою вектора $\theta(x, \beta)$ в точках x_1, x_2, \dots, x_n відновити значення $\theta(x, \beta)$ в області \mathcal{X} , припускаючи, що виконуються всі передумови регресійного аналізу, включаючи адекватність опису (8). В кожній точці x_i виміряні значення мають вигляд

$$Y(x_i) = \theta(x_i, \beta) + \varepsilon(x_i), \quad (9)$$

де $Y(x_i)$ і $\varepsilon(x_i)$ - стовпці розміром p виміряних значень і випадкових похибок, останні - статистично незалежні по i та слідуєть p -мірному нормальному закону розподілу з нульовим математичним сподіванням і матрицею коваріацій $\sigma^2 \bar{I}_p$. У випадку корельованості похибок ($D[\varepsilon(x_i)] = \sigma^2 V$, де V - відома додатна визначена матриця розміру $p \times p$) відомими перетвореннями приходимо до даного випадку. Виразимо

$\hat{Y}(x) = X(x) \hat{\beta}$ (10). За критерій вибору $\hat{Y}^{(e)}(x)$ прийемо

$$J_e = \sigma^{-2} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}(x_i) - \hat{Y}^{(e)}(x_i))^T (\hat{Y}(x_i) - \hat{Y}^{(e)}(x_i)) + \sigma^{-2} E \left[\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_2^{(e)}(x_i))^T \hat{Y}_2^{(e)}(x_i) \right] \cong \quad (11)$$

$$\cong \sigma^{-2} E \left[\sum_{i=1}^n (\hat{Y}^{(e)}(x_i) - \theta(x_i, \beta))^T (\hat{Y}^{(e)}(x_i) - \theta(x_i, \beta)) \right],$$

де $\hat{Y}_2^{(e)}(x) = \hat{Y}^{(e)}(x) - E[\hat{Y}^{(e)}(x)]$.

Ортогоналізуємо систему функцій $h_{kr}(x)$, використовуюючи матрицю ортогоналізації T розміру $(m \times m)$, яка складається з

стовпців, котрими є ортонормовані властиві вектори інформаційної матриці Γ розміру $(m \times m)$

$$\Gamma = \sigma^{-2} \sum_{i=1}^n (X(x_i))^\top X(x_i).$$

Тоді (10) має вигляд $\hat{Y}(x) = X(x)T\hat{G}; \hat{G} = T^\top \hat{\beta}$. Матрицю ортогоналізації T подамо у вигляді

$$T = m \begin{pmatrix} \hat{P} & \hat{P}_0 \\ \hat{P}_0 & \hat{P} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

де \hat{P}_0 ортонормований базис для ядра \bar{X}

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} X(x_1) \\ \vdots \\ X(x_n) \end{bmatrix}$$

- матриця розміру $(n \times m)$, \hat{P}_0 ортонормований базис для ортогонального доповнення ядра \bar{X} . Для вирішення задачі оптимізації опису пропонується використати сингулярне розкладання матриці $\bar{X} = QL^\top P^\top$, де P і Q матриці розміру $m \times m$ і $n \times n$ відповідно, L - діагональна матриця розміру $n \times n$, яка складається з ненульових властивих значень матриці $\bar{X}^\top \bar{X}$.

Виразимо

$$\hat{Y}(e^*) (x_i) = X(x_i) P(e^*) \hat{G}_1(e^*) = \bar{V}(e^*) (x_i) \hat{G}_1(e^*),$$

$$\text{де } \hat{G}_1(e^*) = (P(e^*))^\top \hat{\beta},$$

вектори $\bar{V}_\nu(x_i) = X(x_i) p_\nu$, $\nu = 1, 2, \dots, e^*$

Ортонормовані властиві вектори p_1, \dots, p_{e^*} відповідають лівим сингулярним векторам, розставленим в порядку незростання чисел

$$(\bar{q}_1 \bar{Y})^2 \geq (\bar{q}_2 \bar{Y})^2 \geq \dots \geq (\bar{q}_n \bar{Y})^2, \quad (14)$$

де $\bar{Y}^T = ((Y(x_1))^T, \dots, (Y(x_n))^T)$. Оптимальне число членів e^* визначимо із умови

$$\rho_{e+1} = J_{e+1} - J_e = 1 - \sigma^{-2} (\bar{q}_{e+1} \bar{Y})^2. \quad (15)$$

Число стовпців матриці $P(e^*)$ дорівнює кількості чисел в (14), для котрих адійснюється $\sigma^{-2} (\bar{q}_i \bar{Y})^2 > 1$ (16), тому статистично неаначущих серед знайдених коефіцієнтів немає. Вектор $\hat{G}_1 \in \mathbb{R}^r$ - псевдорозв'язок, який має мінімальну евклідову довжину, задачі відшукання вектора $\hat{G} \in \mathbb{R}^m$, мінімізуючого евклідову довжину np - мірного вектора відхилення $\bar{E} - \bar{Y} - \bar{X}TG$. В главі розглянуті способи використання одобутого опису, порівняння методів розв'язання задачі найменших квадратів. Застосування даного алгоритму дозволяє, ефективно враховуючи похибки заданої інформації, похибки заокруглення і лінійної залежності, зменшити вимірність опису до межі, при котрій устанавлюється доцільне співвідношення між детальністю опису і існуючою інформацією.

В кінці глави зводяться результати моделювання і порівняльного аналізу стійкості і точності оцінювання за допомогою сингулярного розкладання і спектрального аналізу. Результати досліджень показали, що алгоритм з використанням сингулярного розкладання більш стійкий до матриць з поганою обумовленістю, збільшенню кількості оцінених параметрів і дозволяє дістати більш точні оцінки, ніж алгоритм на основі спектрального аналізу.

Третя глава присвячена побудуванню модифікованих факторизованих алгоритмів оцінювання параметрів динамічних об'єктів, які мають високу чисельну стійкість. В главі адійснюється модифікація чисельно нестійких алгоритмів псевдорозв'язків способом побудови факторизованих алгоритмів, які ґрунтуються на ортогональних перетвореннях. Ці методи засновані на використанні співвідношень модифікованого методу Гівенса. На основі одержаних результатів розробляються факторизований алгоритм оцінювання параметрів динамічних об'єктів з обмеженнями і рекурентний факторизований алгоритм оцінювання на основі ортогональних перетворень. Застосовуючи модифікацію чисельно нестійких рекурентних алгоритмів псевдорозв'язків, розвиваємо рекурентний факторизований алгоритм декомпозиції для розв'язку задачі оцінювання параметрів. Для оцінки параметрів, які змінюються за часом, розробляються нові факторизовані рекурентні модифікації. Ці модифікації ґрунтуються на використанні доведених нових співвідношень, узагальнюючих результати, установлені для перебудови матричних факторизацій вигляду UDU^T при одноранговій модифікації. На основі одержаних результатів розробляються рекурентний факторизований алгоритм з постійним слідом і рекурентний факторизований алгоритм, сполучаючий експоненціальну оцінку даних з коваріаційною модифікацією, маючий високу точність і стійкість. Проведено дослідження абіжності розроблених алгоритмів.

Основою чисельних алгоритмів обчислення псевдорозв'язку, задовольняючого сумісній системі обмежень $C\beta = \gamma$, (16) де $C - n, \times m$ матриця, $\gamma - n$ -вектор, e співвідношення

$$\begin{aligned} \hat{\beta}^L &= [(I_M - (F^* \tilde{P})^+ F^*) C^+; (F^* \tilde{P})^+] \left[\begin{array}{c} \underline{y} \\ \underline{y}^* \end{array} \right]; \\ \tilde{P} &= I_M - C^+ C, \end{aligned} \quad (17)$$

яке визначає єдиний розв'язок мінімальної довжини. Для побудови чисельно стійкого алгоритму обчислення псевдорозв'язку проводиться ортогональна факторизація обмежень а цілдо поліпшення стійкості і скорочення обчислень. Для цієї мети використовуються співвідношення чисельно-стійкого модифікованого методу Гівенса. Зобразимо A_1 - $2 \times M$ матрицю як $A_1 = D^{1/2} B_1$, де $D = \text{diag}(\underline{d}_1, \underline{d}_2, \dots, \underline{d}_M)$, $\underline{d}_i > 0$, B_1 - $2 \times M$ матриця; $B_1 = [(b_{ij})]$. у випадку $b_{2,1} \neq 0$ наступні перетворення матриці можна дістати після застосування модифікованого методу Гівенса

$$D_1 = \begin{bmatrix} \underline{r}^2 & 0 \\ 0 & \underline{d}_1 \underline{d}_2 / \underline{r}^2 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & \underline{d}_2 & \underline{d}_3 & \dots & \underline{d}_M \\ 0 & \tilde{\alpha}_2 & \tilde{\alpha}_3 & \dots & \tilde{\alpha}_M \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де $\underline{\alpha}_i = (\underline{d}_1 b_{1,i} b_{1,i} + \underline{d}_2 b_{2,1} b_{2,i}) / \underline{r}^2$;

$\tilde{\alpha}_i = b_{2,i} b_{1,1} - b_{2,1} b_{1,i}$; $\underline{r}^2 = \underline{d}_1 b_{1,1}^2 + \underline{d}_2 b_{2,1}^2$.

В цьому випадку матриця Гівенса не будується, а матриця B_2 - верхня трикутна з одиницями на головній діагоналі.

У випадку перетворення довільної матриці для елементів а

$b_{j,i} \neq 0, j > 0$ використовуємо рівняння

$$\underline{r}^{*2} = \underline{r}^2 + \underline{d}_j b_{j,1}^2 \quad (20)$$

$\underline{d}_i \tilde{\alpha}_i$ для j рядка обчислімо:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= (b_{j,i} \Gamma^2 + d_j b_{j,i} + b_{j,i}) / \Gamma^{2j}, \\ \tilde{\alpha}_i &= b_{j,i} - b_{j,i} + b_{j,i}. \end{aligned} \quad (21)$$

Для запису рекурентного алгоритму оцінювання для випадку, коли результати кожного спостереження становлять корельовані вимірювання, використовуємо рекурентні формули перелічення $\hat{\beta}_{k+1}$ по існуючим попереднім значенням $\hat{\beta}_k$, допоміжній матриці $\bar{P}_k \triangleq \left(\sum_{k'=1}^k F_{k'}^T \Lambda_{k'}^{-1} F_{k'} \right)^{-1} = \bar{R}_k^{-1}$ і даним значенням p -мірного вектора Y_{k+1} . В результаті, коли \bar{R}_k оборотна, ранг $F_k = m + n_a = M$ виходить рекурентний алгоритм обчислення псевдорозв'язку, котрий можна інтерпретувати за допомогою фільтра Калмана

$$\hat{\beta}_{k+1} = \hat{\beta}_k + L_{k+1} (Y_{k+1} - F_{k+1} \hat{\beta}_k); \quad (22)$$

$$L_{k+1} = \bar{P}_k F_{k+1}^T (\Lambda_{k+1} + F_{k+1} \bar{P}_k F_{k+1}^T)^{-1}; \quad (23)$$

$$\bar{P}_{k+1} = \bar{P}_k - \bar{P}_k F_{k+1}^T (\Lambda_{k+1} + F_{k+1} \bar{P}_k F_{k+1}^T)^{-1} F_{k+1} \bar{P}_k, \quad (24)$$

де F_{k+1} - $p \times M$ матриця, $\Lambda_k = \mathcal{E}[\varepsilon_k \varepsilon_k^T]$, шум вимірювань ε_k - незалежний гауссівський стохастичний процес з нульовим середнім. Рекурентне рівняння по \bar{P} чисельно нестійке, через те, що похибки заокруглення, до яких воно чутливо, можуть нагромаджуватися. Щоб усунути розбіжність методу і робити з краще обумовленими матрицями впроваджується факторизація $\bar{P}_k = U_k D_k U_k^T$ де U_k - верхня трикутна матриця з одиницями на діагоналі, а $D_k = \text{diag}(d_{1k}, \dots, d_{mk})$. Зобразимо $\bar{P}_{k+1} = U_k U_{k+1}' D_{k+1}' U_{k+1} U_k^T$. Тоді визначення L_{k+1} для рекурентного перелічення матриць U_{k+1}' і D_{k+1}' робиться

згідно в таких перетвореннях

$$D_{k+1}^{-1/2} U_{k+1}^T \bar{G}_{k+1}^T \left(\begin{array}{cc} D_k^{1/2} & 0 \\ 0 & i D_{k+1}^{-1/2} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} I \\ S_{k+1}^{-1} F_{k+1} U_k D_k \end{array} \right); \quad (25)$$

$$D_{k+1}^{1/2} S_{k+1}^T = \bar{G}_{k+1}^T \left(\begin{array}{cc} I & 0 \\ 0 & D_k^{-1/2} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \tilde{V}_{k+1}^T \\ U_k^T F_{k+1}^T \end{array} \right); \quad (26)$$

де $L_{k+1} = \tilde{V}_{k+1} \tilde{V}_{k+1}^T \bar{G}_{k+1}^T$ - перетворення Гівенса згідно алгоритму (18) - (21). Для вибору початкових значень матриць пропонується, у випадку розв'язку задач з матрицями, маючими обумовленість вище, ніж 10^8 , використати ортогональну факторизацію згідно алгоритму (18) - (21), яка дозволяє знизити обумовленість матриці \bar{P}_k на основі таких співвідношень,

$$\bar{Q}_k^T \bar{Q}_k = \Phi_k^T \bar{G}_k^T \bar{G}_k \Phi_k = \bar{R}_k; \quad U_k D_k^{1/2} = \bar{Q}_k^{-1},$$

де \bar{G}_k - ортогональна ($n \times n$) матриця, Φ_k - матриця ($n \times m$), \bar{Q}_k - верхня трикутна. Запропонований рекурентний факторизований алгоритм обчислення псевдорозв'язку (22) - (25), (26) складається в тому, що L_{k+1} обчислюється із застосуванням формул (25), (26), на відміну від (23) є чисельно стійким і дозволяє скоротити час обчислення.

В даній главі проводиться побудова чисельно-стійкого рекурентного алгоритму декомпозиції для розв'язання загальної задачі оцінювання параметрів шляхом побудови рекурентно-

до факторизованого алгоритму, побудованого на симетричній UDU^T факторизації.

Важливою особливістю рекурентних алгоритмів ідентифікації є їх здібність відстежувати нестационарність системи. Запропоновані нові факторизовані рекурентні алгоритми оцінювання параметрів динамічних об'єктів ґрунтуються на використанні нових співвідношень для рекурентного перелічення об'єкту модифікованої матриці коваріацій, представленої в факторизованій формі. Такі модифікації МНК: алгоритм з постійним фактором забування, алгоритм з коректирою сліду матриці коваріацій, алгоритм з поверненням матриці коваріацій до заданої чи залежної від останніх даних матриці, алгоритм з модифікацією матриці коваріацій, дозволяють досягнути деяких необхідних властивостей для оцінки змінних за часом параметрів. Проведено дослідження умов збіжності алгоритму з постійним слідом матриці коваріацій. Показано, що якщо загублена додатна визначеність P_k , збіжність ставиться під сумнів. Розроблено факторизований рекурентний алгоритм з постійним слідом. В алгоритмі, який сполучає експоненціальну оцінку даних з модифікацією матриці коваріацій, обмеження властивих значень якої досягається шляхом використання квадратичного члена, забезпечується додатна визначеність матриці коваріацій при збереженні основних властивостей збіжності рекурентного МНК. Для збільшення точності необхідна організація рекурентного факторизованого обчислення оцінки $\hat{\beta}_k$. Внаслідок цього в даному розділі розробляється алгоритм перелічення факторизації матриці P_k в зображенні $P_k = U_k^* D_k^* U_k^{*T}$ при одноранговій модифікації, де U_k - верхня трикутна матриця з одиничними діагональними елементами, D_k

- діагональна матриця. Потім на основі одержаних результатів будується алгоритм рекурентного факторизованого перелічення оцінок. Зобразимо матрицю коваріацій $P_k = \underline{V}_k \underline{D}_k \underline{V}_k^T + \beta I$

$$- S. P_{k-1}^{-2} = \underline{V}_{k-1} \underline{D}_{k-1} \underline{V}_{k-1}^T - S P_{k-1}^{-2}. \quad \text{Введемо позначення}$$

$$h_{k-1} = \underline{V}_{k-1}^T f_k; \quad v_{i, k-1} = \underline{d}_{i, k-1} h_{i, k-1}; \quad i=1, \dots, M.$$

$$\underline{D}_{k-1} = \text{diag}(\underline{d}_{1, k-1}, \dots, \underline{d}_{M, k-1});$$

$$\underline{V}_{k-1} = (\underline{v}_{1, k-1}, \dots, \underline{v}_{M, k-1}); \quad \underline{V}_k = (\underline{v}_{1, k}, \dots, \underline{v}_{M, k});$$

$$h_{k-1}^T = (h_{1, k-1}, \dots, h_{M, k-1}); \quad K_{2, k-1}^T = (\underline{v}_{1, k-1}, \underbrace{0 \dots 0}_{M-1}). \quad (27)$$

$$\text{Тоді} \quad \underline{d}_{1, k} = \lambda^{-1} \underline{d}_{1, k-1} \underline{d}_{0, k-1} / \underline{d}_{1, k-1}; \quad (28)$$

$$\underline{d}_{0, k-1} = (\lambda^{-1} - \bar{\alpha}) \bar{f}_{M, k-1} + \bar{\alpha}; \quad (29)$$

$$\underline{d}_{1, k-1} = \underline{d}_{0, k-1} + \bar{\alpha} h_{1, k-1} v_{1, k-1}. \quad (30)$$

При цьому вектор K_k і верхня трикутна матриця \underline{V}_k рекурентно обчислюються для $j = 2, \dots, M$

$$\underline{d}_{j, k} = \lambda^{-1} \underline{d}_{j, k-1} \underline{d}_{j-1, k-1} / \underline{d}_{j, k-1}; \quad (31)$$

$$\underline{d}_{j, k-1} = \underline{d}_{j-1, k-1} + \bar{\alpha} h_{j, k-1} v_{j, k-1} \quad (32)$$

$$\underline{v}_{j, k} = \underline{v}_{j, k-1} + \psi_{j, k-1} K_{j, k-1};$$

$$\psi_{j,k-1} = -\bar{\alpha} h_{j,k-1} / \underline{d}_{j,k-1}; \quad (33)$$

$$\bar{f}_{j,k-1} = 1 + \sum_{i=1}^M \underline{d}_{i,k-1} h_{i,k-1}^2 = 1 + \sum_{i=1}^M h_{i,k-1} \psi_{i,k-1}; \quad (34)$$

$$K_{j+1,k-1} = K_{j,k-1} + \psi_{j,k-1} \underline{U}_{j,k-1}; \quad (35)$$

$$K_k = \bar{\alpha} K_{M+1,k-1} / \bar{f}_{M,k-1}. \quad (36)$$

Параметри $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, $\bar{\lambda}$ і δ відповідно регулює підсилення алгоритму НК, мала константа, яка відноситься до мінімального властивого значення P , фактор експоненціального забування, мала константа, яка відноситься до максимального властивого значення P . Розраховане число операцій, необхідне для реалізації цього алгоритму, показало, що розроблений алгоритм має той же порядок складності, що і факторизований алгоритм, використовуючий коваріаційну модифікацію для обмежень властивих значень P знизу. Матриці \underline{U}_k^* і \underline{D}_k^* обчислюються згідно з алгоритмом (18) - (21). Таким чином розроблені рекурентні факторизовані алгоритми модифікованого НК для оцінки змінних за часом параметрів мають підвищену збіжність і точність.

В кінці глави пропонуються результати чисельних досліджень модифікованих алгоритмів і їх порівняння з традиційними.

В четвертій главі розглянуті питання реалізації розроблених у другій і третій главах методів і алгоритмів у формі програмного комплексу "ПАКІФ". Наповнення пакета дає змогу

здійснити вибір алгоритму рішення з урахуванням конкретного випадку і дозволяє використовувати його для вирішення широкого кола задач. Система являє собою комплекс методів і не залежить від означеної проблеми. Можливими галузями застосування є: економіка, промисловість, авіація.

В главі розглядається архітектура ПК, технологія використання, способи управління і реалізація. Визначаються основні функції і призначення кожного програмного модуля. Наводяться загальні знання про пакет: склад, об'єм, мова та ін.

Комплекс програм "ПАКІФ" запрограмований мовою Фортран-77 для роботи у середовищі MS DOS. У склад програмного комплексу входять 46 програмних модулів. Апробація програмного комплексу здійснювалась при проектуванні промислових систем випробувань при виробництві потужних дизельних двигунів. Комплекс програм "ПАКІФ" є складовою частиною бібліотеки програм з оптимізації, ідентифікації, лінійної алгебри і бібліотеки чисельного аналізу. Результати впровадження програмного комплексу підтвердили можливість використання в економіці і інженерній практиці теоретичних результатів, здобутих в даній дисертаційній роботі.

В закінченні стисло сформульовані основні наукові і застосовні результати дисертаційної роботи.

Додаток 1 містить тексти початкових модулів, які входять в комплекс застосовних програм.

Додаток 2 містить документи з впровадженні розроблених алгоритмів і комплексу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Проведено аналіз існуючих методів структурно-параметричної ідентифікації об'єктів управління, виявлені їх переваги і недоліки.

2. Згідно з результатами аналізу, сформульована задача дослідження: розробити методи і алгоритми спільного визначення структури і параметрів моделі при коррельованих амінних, а також методи і алгоритми параметричної ідентифікації, які дозволяють дістати стійкі оцінки.

3. Запропоновано метод оптимізації моделі при коррельованих амінних, побудований на ортогональному розкладанні.

4. Розроблено метод оптимізації моделі з використанням сингулярного розкладання, який має високу точність і стійкість.

5. Розроблено метод матричної факторизації на основі ортогональних перетворень, який має малий час обчислення і чисельну стійкість.

6. Здійснена модифікація чисельно нестійкого алгоритму псевдорозв'язків шляхом побудови факторизованого алгоритму, заснованого на ортогональних перетвореннях.

7. Запропоновано рекурентний факторизований алгоритм оцінювання для випадку коррельованих вимірювань на основі ортогональних перетворень.

8. Запропоновані рекомендації по створенню рекурентного факторизованого алгоритму декомпозиції для розв'язання загальної задачі оцінювання параметрів.

9. Доведені нові співвідношення для рекурентного перелічення модифікованої коваріаційної матриці, зображеної в

факторизованій формі, для оцінки змінних за часом параметрів.

10. На основі здобутих результатів розроблено факторизований рекурентний алгоритм з постійним слідом і рекурентний факторизований алгоритм, сполучаючий експоненціальну оцінку даних з коваріаційною модифікацією, який має високу чисельну стійкість і точність. Проведено дослідження абіжності розроблених алгоритмів.

11. Проведено чисельне порівняння розроблених алгоритмів з традиційними і між собою.

12. На базі розроблених алгоритмів і методів побудовано програмний комплекс "ПАКІФ", який дозволяє вирішити задачі побудови моделі при корельованих змінних і параметричній ідентифікації динамічного об'єкта. Результати впровадження підтвердили економічну ефективність розроблених методів і можливість використання в економіці і інженерній практиці теоретичних результатів, здобутих в даній дисертаційній роботі.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Грицюк В. И., Петров Э. Г. Рекуррентная факторизованная идентификация динамических объектов // Прогр. и аннот. докл. Международной школы. Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами. Харьков, 1992. с. 10.

2. Грицюк В. И., Петров Э. Г. Рекуррентный факторизованный алгоритм для оценки параметров, изменяющихся во времени. Харьков, 1994. - 6 с. - Деп. в ГНТБ Украины 03.06.94.

№ 1076-Ук94.

3. Петров Э. Г., Грицок В. И. Оптимизация сложности модели на основе метода наименьших квадратов // Тез. докл. Межд. научн. техн. конф. Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях. - Львов. 1991. - с. 46.

4. Петров Э. Г., Грицок В. И. Оптимальное описание при коррелированных переменных с использованием ортогонального разложения // Прогр. и аннот. докл. 4-й Всесоюзной школы. Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами. - Харьков. - 1990. - с. 66.

5. Петров Э. Г., Грицок В. И. Оптимизация модели, основанная на ортогональном разложении // Программное обеспечение технических систем. Сб. научн. трудов. - Киев: ИК АН Украины, 1991. с. 35-39.

6. Петров Э. Г., Грицок В. И. Факторизованный алгоритм модифицированного метода наименьших квадратов. - Харьков, 1992. - 9 с. - Деп. в УкрНИНТИ 22.01.92, №75-Ук92.

7. Петров Э. Г., Грицок В. И. Рекуррентный факторизованный алгоритм на основе ортогональных преобразований // Методы анализа и синтеза систем. - Научн.-техн. сборн. - Севе-родонецк, 1992. с. 34-36.

8. Петров Э. Г., Грицок В. И. Оптимизация описания с использованием сингулярного разложения // АСУ и приборы автоматики. 1994. - Вып. 101.

9. Petrov E. G., Gritsyuk V. I. Modified least squares recursive algorithms for time-varying parameter estimation. // International AMSE conference on "Systems, Control, Information" Methodologies & Applications (SCI'94), China, 1994.

Грицюк В. И. Факторизованные методы и алгоритмы идентификации объектов управления при коррелированных измерениях.

Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - "Управление в технических системах". Харьк. техн. ун-т радиоэлектроники, Харьков, 1994.

Диссертация содержит теоретические исследования и развитие методов и алгоритмов выбора структуры модели при коррелированных входных воздействиях, устойчивые методы и алгоритмы параметрической идентификации динамических объектов, а также результаты экспериментальных исследований. Разработаны алгоритмы оптимизации модели, позволяющие повысить точность оценивания параметров. Развита эффективные методы параметрической идентификации. Доказаны новые соотношения для рекуррентного пересчета модифицированной ковариационной матрицы, представленной в факторизованной форме. На основе полученных результатов разработаны рекуррентные факторизованные алгоритмы для оценки параметров, изменяющихся во времени. На базе созданных алгоритмов и методов разработан программный комплекс. Представлены результаты внедрения.

Gritsyuk V. I. The factorization methods and algorithms for identification of the control objects when measurements are correlated.

Manuscript. The dissertation for the candidate degree of the technical sciences on the speciality 05.13.01 - "Control in the technical systems". The Kharkov State Technical University of Radioelectronics, Kharkov, 1994.

The dissertation includes the theoretical research and development of the methods and algorithms of the model structure choice with correlated input actions, the stable methods and algorithms of the parameter identification of the dynamic objects as well as the results of the experimental research. The algorithms of the model optimization, which allow to increase the accuracy of parameter estimation, have been developed. The effective methods of the parameter identification are developed. The new relations for recurrent recalculation of the modified covariance matrix, which was introduced in factorization form, are proved. The recurrent factorization algorithms for time-varying parameter estimation have been developed on a basis of the results obtained. The program complex have been developed on a basis of the created algorithms and methods. The results of the introduction are presented.

Ключові слова: оптимізація опису, оцінка параметрів, абіжність, методи факторизації.

Підписано до друку 22.XI.94р.

Об'єм 1,25 д.а.

Ум. - друк.а. I

Формат паперу 60x84

Безплатно

Тираж 100 пр.

Зам. 2/1083

Друкарня ХВУ, вул.Сумська, 77/79

447696

AB 32.123

AB 32.123