КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

УДК 681.5.015.32

СПІНУЛ Людмила Юріївна

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

05.13.01 — Керування в технічних системах

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ — 1993

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Спінул Людмила Юріївна

УДК 681.5.015.32

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

05.13.01 - Керування в технічних системах

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1993

Робота виконана у Київському політехнічному інституті.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Сільвестров А.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Блохін Л.М.,
кандидат технічних наук, доцент
Михальов О.І.

Провідна установа: НВО "Київський інститут автоматики".

Захист дисертації вібудеться "8" листопада 1993р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої Ради К068.14.01 при Київському політехнічному інституті за адресою: 252056, Київ-56, пр. Перемоги, 37.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці КПІ.

Автореферат відправлено "8" жовтня 1993р.

Вчений секретар спеціалізованої
Ради

Шульга Ю.І.

АНОТАЦІЯ

Метою дисертаційної роботи є розробка цілеспрямованої системи ідентифікації, методів та алгоритмів ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, що можуть бути представлені у класі моделей Гамерштейну, котрі дозволяють підвищити точність та ефективність функціонування адаптивних систем керування, а також застосування здобутих результатів під час ідентифікації та синтезу оптимальної адаптивної системи керування генератором нейтронів НГГ-2, що стабілізує вихідний потік нейтронів.

Для досягнення даної мети у роботі вирішуються наступні задачі:

- розробка структури цілеспрямованої системи ідентифікації;
- визначення умов погодження критерія ідентифікації та критерія якості системи керування;
- розробка та дослідження алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, що можуть бути представлені у класі моделей Гамерштейну;
- визначення простих (у вигляді графіків або номограм) математичних виразів, що пов'язують параметри об'єкту з коефіцієнтами П-, ПІ- та ПІД-регуляторів при відмінній якості системи керування з метою їх подальшого як самостійного використання, так і компоненти в адаптивних системах керування з ідентифікатором у контурі.

Автор захищає такі результати:

- умову погодження критерія ідентифікації та критерія якості керування;
- метод подільної ідентифікації статичної та динамічної характеристик нелінійного динамічного об'єкту (НДО);
- алгоритми оцінювання статичних та динамічних параметрів НДО, що описуються у вигляді моделі Гамерштейну, на основі перетвореного

критерію Пухова та на основі представлення статичного перетворювача у формі поліному Лагранжа;
- алгоритми визначення степені поліному статичного перетворювача нелінійного динамічного об'єкту, що відноситься до класу моделей Вінера та Гамерштейна;
- методику розрахунку оптимальних параметрів П-, ПІ- та ПІД-регуляторів.
- математичне забезпечення системи проектування адаптивних систем керування йоно-вакуумними приладами ядерно-фізичної діагностики.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під час вирішення задачі адаптивного оптимального керування є наступні проблеми: невідповідність моделі до об'єкту, що викликана невизначеністю мети побудови моделі; неточність умов зв'язку між параметрами об'єкту та коефіцієнтами стандартних регуляторів, необхідність компромісу між точністю управління та ідентифікації та матеріальними витратами, що виникають під час їх проведення. Спільне вирішення цих проблем можливе шляхом розробки більш простих та точних з алгоритмічної точки зору методів ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, ніж існуючи, параметри котрих повинні обиратися виходячи з мети побудови математичної моделі. Зменшення величини зсуву від экстремуму критерію керування, що викликаний неточним визначенням параметрів моделі та зводить до неоптимального управління, можливе шляхом погодження критеріїв ідентифікації та управління. Незалежне вирішення цих проблем не підвищує ефективності функціонування адаптивної системи керування. Таким чином, актуальною є задача синтезу системи ідентифікації, що спрямована на оптимальне вирішення задачі управління.

Методи дослідження. Основні результати роботи отримані за допомогою теорії автоматичного керування, теорії ідентифікації, математичного аналізу, теорії ймовірності та математичної статистики, методів лінійної алгебри.

Наукова новизна досліджень полягає у:.

- розробці структури цілеспрямованої на задачу оптимального керування системи ідентифікації;
- запропонован критерій ідентифікації, застосування котрого надає можливість за допомогою одного тестового сигналу подільно визначити усі статичні та динамічні параметри нелінійного об'єкту, що може бути описан у вигляді моделі Гамерштейну, на основі різних процедур. Знайдені таким чином оцінки параметрів є більш точними у порівнянні з оцінками сумісного оцінювання класичними методами;
- розробці на основі винайденого критерію алгоритмів ідентифікації та відповідного прикладного програмного забезпечення;
- розробці алгоритму визначення ступеню поліному статичного перетворювача нелінійного динамічного об'єкту;
- за допомогою інтегрального методу адаптивного пошуку екстремуму функції уточнені залежності коефіцієнтів стандартних регуляторів від параметрів моделі ;
- винаході математичної моделі генератору нейтронів як багатовимірного нелінійного динамічного об'єкту.

Практична цінність роботи полягає у синтезі адаптивної системи керування генератором нейтронів НГГ-2, математична модель котрого знайдена за допомогою розроблених алгоритмів ідентифікації: розробці відповідного прикладного програмного забезпечення, а також автоматизованної системи обробки експериментальних даних, проектування та дослідження лінійних систем автоматичного управління..

Реалізація результатів роботи. Розроблена адаптивна система керування генератором нейтронів НГТ-2 та відповідне програмне забезпечення впроваджені та використовуються у СКТБ з ЕВ інституту ядерних досліджень АН України; автоматизована система обробки експериментальних даних, проектування та дослідження лінійних систем автоматичного управління впроваджена у Центральному НДІ автоматики та гідравліки (м.Москва), Каунаському політехнічному інституті, Ленінградському кораблебудівному інституті.

Апробація роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції "Контроль и управление в технических системах" (1992), науково-технічній конференції "Автоматизация электротехнологических процессов" (1991), наукових семінарах інституту ядерних досліджень АН України, кафедри технічної кібернетики, загальної електротехніки Київського політехнічного інституту.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 7 робіт.

Обсяг та структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновку та списку літератури загальним обсягом 192с., у тому числі 54 рисунка, 10 таблиць, бібліографія із 99 назв.

Вступ містить обгрунтування актуальності теми, формулювання мети роботи та її загальну характеристику.

Перший розділ - це огляд сучасного стану теорії ідентифікації. Розглядається вирішення задачі побудови математичної моделі з точки зору системного підходу. Аналізуються основні компоненти системи ідентифікації - моделі динамічних об'єктів, критерії відповідності моделі та об'єкту. Докладно розглядаються методи ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів. Визначаються конкретні вимоги до компонентів системи. На основі проведеного аналізу багатоаспектної проблеми розробки системи ідентифікаціїформулюється постановка задачі синтезу системи ідентифікації, що спрямована на оптимальне вирішення задачі управління.

Другий розділ присвячено розробці цілеспрямованої системи ідентифікації. Визначається структура системи, вирішується задача погодження критеріїв, пропонується метод та розробляються алгоритми оцінювання параметрів статичної та динамічної характеристик НДО. Наведені результати дослідження точності запропонованих алгоритмів у порівнянні з узагальненим методом найменших квадратів для сумісного визначення статичних та динамічних параметрів. Надані результати чисельного моделювання розглянутих алгоритмів.

У третьому розділі аналізуються існуючі методи розрахунку параметрів П-, ПІ- та ПІД-регуліторів; обгрунтовується вибір інтегрального методу адаптивного пошуку екстремуму функції для розрахунку коефіцієнтів регуляторів, наводяться уточнені залежності між параметрами об'єкту та коефіцієнтами стандартних регуляторів для різних критеріїв якості керування.

У четвертому розділі вирішується задача структурно-параметричної ідентифікації генератора нейтронного випромінювання НТГ-2 як багатовимірного нелінійного динамічного об'єкту. Синтезується система адаптивного керування генератором. Наведені результати чисельного моделювання системи керування.

Додаток містить документи , що підтверджують реалізацію та впровадження результатів роботи, опис розробленого програмного забезпечення.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Під час вирішення задачі адаптивного оптимального керування є наступні проблеми: невідповідність моделі до об'єкту, що викликана невизначеністю мети побудови моделі; неточність умов зв'язку між параметрами об'єкту та коефіцієнтами стандартних регуляторів, необхідністю компромісу між точністю управління та ідентифікації та матеріальними витратами, що виникають під час їх проведення. Спільне вирішення цих проблем можливе шляхом розробки більш простих та точних з алгоритмічної точки зору методів ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів, ніж існуючі, параметри котрих повинні обиратися виходячи з мети побудови математичної моделі. Зменьшення величини зсуву від экстремуму критерию керування, що викликан неточним визначенням параметрів моделі та зводить до неоптимального управління, можливе шляхом погодження критеріїв ідентифікації та управління. Незалежне вирішення цих проблем не підвищує ефективності функціонування іне гарантує оптимального вирішення задачі керування.

Таким чином, ідентифікація реального об'єкту повинна проводитись у рамках системи, усі компоненти якої спрямовані на вирішення задачі керування, або іншими словами - задача ідентифікації повинна бути оптимізована по критерію верхнього рівня I. Така система, що спрямована на вирішення задачі верхнього рівня, називається цілеспрямованою.

Оптимізація задачі ідентифікації полягає у побудові моделі, що має структуру Σ^*, параметри β^* та методу Opt^*з параметрами α^*:

$$\Omega^* = \langle\Sigma^*,\ \beta^*,\ \alpha^*,\ \mathrm{Opt}^*,\ J^*\rangle = \underset{\Omega}{\arg\min}\ I \qquad (1)$$

Вирішення задачі (1) є складною задачею багатовимірної оптимізації. Її вирішення можливе на основі фіксації деяких елементів з урахуванням апріорної інформації про об'єкт та обмежень на технічну базу.

Вибір структури моделі залежить від області її застосування. У більшості технічних додатків із структури об'єкту, а також з часткового розуміння його функціонування можна отримати інформацію про структуру об'єкту Σ і, таким чином, уникнути етапу структурної ідентифікації. Вибір інших компонент СІ залежить від самої задачі та від накладених обмежень. Задача (1) приймає вигляд

$$\Omega^{*} = \underset{\Omega}{argmin}\, I,$$

$$\Omega = \left\{\Omega_i = (\beta_i,\ \alpha_i,\ J_i)\ /\ \Sigma,\ \mathrm{Opt}\right\}. \qquad (2)$$

Рішення задачі (2) уявляє собою релаксаційний процес (РП) $(\beta_k,\ \alpha_k,\ J_k)$ відносно основного показника I такий, що

$$inf\ I_0 \geq inf\ I_1 \geq \ldots\ inf\ I_k.$$

З метою реалізації такого РП система повинна мати структуру моделі Σ, метод оцінювання Opt та показник вирішення задачі керування I, а також визначати алгоритм взаємодії елементів СІ.

Структурна схема системи ідентифікації, що вирішує задачу (2) наведена на рис.1.

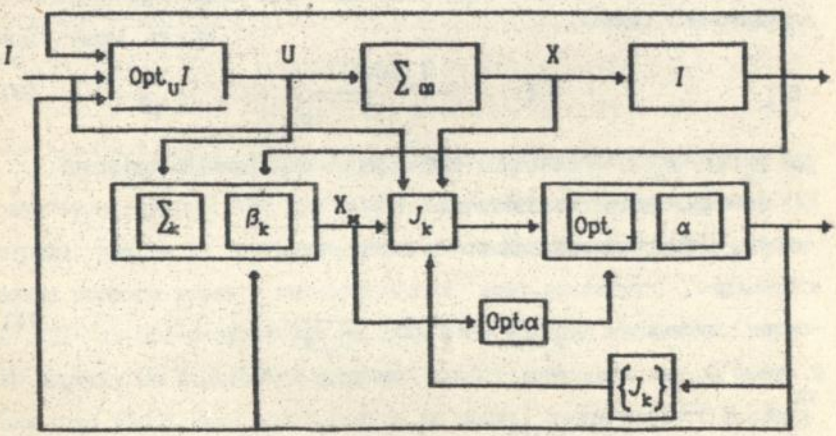

Рис.1.

Блок $(\Sigma_k,\ \beta_k)$ завдає апріорну модель об'єкту, блок (J) погоджує критерії, блок (Opt, α) визначає метод та дозволяє отримати оцінки параметрів. Тестові сигнали синтезуються на основі даних про параметри моделі $\hat{\beta}_k$. Зворотній зв'язок по критеріям от I к J_k

оптимізує та цілеспрямовує параметри моделі.

Вирішення задачі ідентифікації реального об'єкту провадиться у три етапи: 1) декомпозиція початкової нелінійної моделі на сімейство лінійних; 2) ідентифікація лінійної моделі; 3) композиція повної нелінійної моделі. Перша та третя задачі не відносяться до самого процесу ідентифікації. Таким чином, задача вибору лінійної моделі є задачею визначення ступеню лінійного диференціального рівняння або порядку передаточної функції. При цьому треба мати на увазі те, що модель повинна бути такою, щоби за її допомогою основна мета ідентифікації (у даному випадку метою ідентифікації є керування) досягалася краще, ніж з іншою, а саме модель повинна відображати ті властивості об'єкту, що мають відношення до керування.

У загальному випадку об'єкт може бути зображений у вигляді передаточної функції

$$W_1(s) = \frac{B_m(s)e^{-\tau s}}{A_n(s)} \tag{3}$$

де $B_m(s)$, $A_n(s)$ - поліноми відповідних ступенів, $m < n$;

τ - час чистого запізнення.

За допомогою еквівалентних перетворень

$$\frac{e^{-\tau s}}{A_n(s)} \longrightarrow \frac{1}{D_\infty(s)}, \tag{4}$$

та

$$\frac{B_m(s)}{A_n(s)} \longrightarrow \frac{1}{E_\infty(s)} \tag{5}$$

передаточну фнукцію (3) можна представити наступним чином

$$W_1(s) = \frac{1}{C_\infty(s)}$$

Виконуючи перетворення (4), (5) та обмежуючи порядок поліномів $E_\infty(s)$ $D_\infty(s)$ порядком поліному $A_n(s)$, отримуємо вирази для коефіцієнтів поліному $C(s)$:

$$\begin{cases} c_1 = e_1 + \tau \\ c_2 = e_2 + e_1\tau + \tau^2/2! \\ \cdot \\ \cdot \\ c_n = e_n + e_{n-1}\tau + e_{n-2}\tau^2/2! + \ldots + e_1\tau^{n-1}/(n-1)! + \tau^n/n! \end{cases} \tag{6}$$

де коефіцієнти e_i визначаються наступним чином

$$\begin{cases} e_1 = a_1 - b_1 \\ e_2 = a_2 - b_2 - b_1 e_1 \\ e_3 = a_3 - b_3 - b_2 e_1 - b_1 e_2 \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \end{cases} \tag{7}$$

Відтепер задача ідентифікації моделі (3) є задачею ідентифікації такої моделі

$$W_2(s) = \frac{1}{C_n(s)} \tag{8}$$

Внаслідок великого розміру задачі оцінювання параметрів передаточної функції (8) доцільно роздивитись наближення моделі (8) першим, другим та третім порядком. У сучасній літературі наближення першого порядку застосовується для розрахунку параметрів П-, ПІ- та ПІД-регуляторів. Віднак застосування наближення першого порядку не забезпечує належної якості керування. у зв'язку з цим стає необхідним застосування як моделі звена другого порядку, параметри котрого розраховуються наступним чином

$$\begin{cases} c_1 = a_1 - b_1 - \tau \\ c_2 = a_2 - b_2 - a_1(b_1 + \tau) + b_1^2 + b_1\tau + \tau^2/2! \end{cases}$$

Умовою реалізації такого наближення є система нерівностей

$$\begin{cases} a_1 > b_1 + \tau \\ a_2 - b_2 > a_1(b_1 + \tau) - b_1^2 - b_1\tau - \frac{\tau^2}{2!} \end{cases}$$

У загальному випадку нелінійний статичний перетворювач може бути представлений як

$$\hat{x} = \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i \varphi_i(x).$$

де $\varphi_i(x)$ - система лінійно незалежних функцій, що уявляють собою ортогональні поліноми Чебишева, Лежандра, Лагерра, Эрміта, Фур'є. У зв'язку з тим, що кожен з цих поліномів може бути представлений як степеневий, то отримаємо наступний вигляд статичного перетворювача НДО

$$y(x) = \sum_{i=0}^{n} \alpha_i x^i$$

Враховуючи, щи статичний перетворювач описується степеневим поліномом, а лінійна динамічна частина моделі Гамерштейну - диференційним рівнянням m-го порядку, вихід моделі визначається рівнянням

$$y(t) = -\beta_1 \dot{y}(t) - \beta_2 \ddot{y}(t) - \ldots - \beta_m y^{(m)}(t) + \alpha_0 + \alpha_1 u(t) + \\ + \alpha_2 u^2(t) + \ldots + \alpha_n u^n(t). \quad (9)$$

Для визначення параметрів α, β скористуємось критерієм Пухова , що перетворений наступним чином.

Виходячи з того, що у статиці залежність $y(u)$ є безперервною функцією, котра диференцюєма до n-го порядку включно, то буде справедливим вираз

$$\frac{\partial^{(n+1)} y}{\partial U^{(n+1)}} = 0. \quad (10)$$

Віднак у динаміці вплив похідних $Y^{(i)}(t)$ приводить до невиконання цієї умови. Для її виконання треба ввести нову змінну $Y_c(t)$

$$y_c(t) = y(t) - \sum_{i=1}^{m} \beta_i y^{(i)}(t). \quad (11)$$

Тоді умова (11) буде мати вигляд

$$\frac{\partial^{(n+1)} y_c}{\partial u^{(n+1)}} = 0. \qquad (12)$$

Вираз (12) має місце у випадку збігу оцінок $\hat{\beta}_i$ параметрів з їх дійсними значеннями β_i^*. Тому, що $y_c(t)$ не залежить від параметрів α нелінійної частини, то можна визначати параметри β_i лінійної частини незалежно від параметрів нелінійної частини з умови

$$J = \min_{\beta} \left[\frac{\partial^{(n+1)} y_c}{\partial u^{(n+1)}} \right]^2$$

або його різницевого еквіваленту

$$J = \min_{\beta} (\Delta_u^n y_c)^2. \qquad (13)$$

Критерій (13) уявляє собою перетворений показник Пухова.

Для розрахунку різністей $\Delta_U^n y_c(i_c)$ треба впорядкувати $y(t)$ та її похідні по величині U. Тоді вираз (11) буде мати вигляд

$$y_c(i_c) = y(i_c) - \sum_{i=1}^{m} \beta_i y^{(i)}(i_c) \qquad (14)$$

де i_c - індекс впорядкованих за величиною U масивів $y(t)$ та її похідних.

Оцінки $\hat{\beta}_i$ визначаються з умови мінімуму функціонала

$$J = \min_{\beta} (\sum_{i_c} \Delta_u^n y_c(i_c))^2 \qquad (15)$$

Враховуючи, що

$$\Delta_u^n y_c(i_c) = \sum_{j=0}^{n} (-1)^j \binom{n}{j} y_c(i_c+n-j)$$

перепишемо (15) наступним чином

$$J = \min_{\beta} \left\{ \sum_{c} \left[\sum_{j=0}^{n} (-1)^j \binom{n}{j} \left[y(i_c+n-j) - \sum_{i=1}^{m} \beta_i y^{(i)}(i_c+n-j) \right] \right]^2 \right\} =$$

$$= \min_{\beta} \left\{ \sum_{c} \left[\Delta^n y(i_c) - \sum_{i=1}^{m} \beta_i y^{(i)}(i_c) \right]^2 \right\}.$$

Тоді система рівнянь для визначення β_i буде мати вигляд

$$\beta_1\sum_{i_c}(\Delta^n y'(i_c))^2 + \beta_2\sum_{i_c}\Delta^n y'(i_c)\Delta^n y''(i_c) + \ldots + \beta_m\sum_{i_c}\Delta^n y^{(m)}(i_c)\Delta^r y'(i_c) =$$
$$= \sum_{i_c}\Delta^n y(i_c)\Delta^n y'(i_c)$$

$$\beta_1\sum_{i_c}(\Delta^n y'(i_c)\Delta^r y'(i_c) + \beta_2\sum_{i_c}(\Delta^r y'(i_c))^2 + \ldots + \beta_m\sum_{i_c}\Delta^n y^{(m)}(i_c)\Delta^r y''(i_c) =$$
$$= \sum_{i_c}\Delta^n y(i_c)\Delta^n y'(i_c)$$

$$\beta_1\sum_{i_c}\Delta^n y'(i_c)\Delta^n y^{(m)}(i_c) + \beta_2\sum_{i_c}\Delta^n y^{(m)}(i_c)\Delta^n y''(i_c) + \ldots + \beta_m\sum_{i_c}(\Delta^n y^{(m)}(i_c))^2 =$$
$$= \sum_{i_c}\Delta^n y(i_c)\Delta^n y^{(m)}(i_c)$$

а параметри $\hat{\alpha}_i$ поліному будут розраховуватись із системи:

$$\begin{cases} \alpha_0(n-1) + \sum\limits_{j=1}^{n-1}\alpha_j\sum\limits_{i_c}u^j(i_c) = \sum\limits_{i_c}y_c(i_c) \\ \alpha_0\sum\limits_{i_c}u(i_c) + \sum\limits_{j=1}^{n-1}\alpha_j\sum\limits_{i_c}u^j(i_c) = \sum\limits_{i_c}u(i_c)y_c(i_c) \\ \vdots \\ \alpha_0\sum\limits_{i_c}u(i_c) + \sum\limits_{j=1}^{n-1}\alpha_j\sum\limits_{i_c}u^{n+j-1}(i_c) = \sum\limits_{i_c}u^{n-1}(i_c)y_c(i_c) \end{cases}$$

Виходячи з (13), маємо вираз для визначення β у матричному вигляді

$$\beta^* = (\Delta_U^{(n+1)}Y^{(j)T}\Delta_U^{(n+1)}Y^{(j)})^{-1}\Delta_U^{(n+1)}Y^{(j)T}\Delta_U^{(n+1)}Y$$

У зв'язку з тим, що виміру належить тільки вихідний сигнал $Y(t)$, а його похідні розраховуються, то замість $Y^{(j)}(t)$ в функціоналі (13) використовується j-та різниця

$$J_2 = \min_{\beta}\left\{ \Delta_U^{(n+1)} Y(t) - \sum_{j=1}^{m} \beta_j \Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y(t)\right\}^2.$$

Оцінки $\hat{\beta}$ на основі J_2 розраховуються по формулі

$$\hat{\beta} = \left[\Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y^T \Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y\right]^{-1} \Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y^T \Delta_U^{(n+1)} Y$$

Межа останнього виразу при $\Delta t \to 0$ є

$$\lim_{\Delta t \to 0} \hat{\beta} = \lim_{\Delta t \to 0} \left\{\left[\Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y^T \Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y\right]^{-1} \Delta_U^{(n+1)} \Delta_t^j Y^T \Delta_U^{(n+1)} Y\right\} =$$

$$=\left[\Delta_U^{(n+1)} \lim_{\Delta t \to 0} \Delta_t^j Y^T \Delta_U^{(n+1)} \lim_{\Delta t \to 0} \Delta_t^j Y\right]^{-1} \Delta_U^{(n+1)} \lim_{\Delta t \to 0} \Delta_t^j Y^T \Delta_U^{(n+1)} Y =$$

$$= \left[\Delta_U^{(n+1)} Y^{(j)T} \Delta_U^{(n+1)} Y^{(j)}\right]^{-1} \Delta_U^{(n+1)} Y^{(j)T} \Delta_U^{(n+1)} Y = \beta^*. \qquad (16)$$

Отож, оцінки $\hat{\beta}$ параметрів лінійної частини моделі Гаммерштейну збігаються до точних значень β^* при $\Delta t \to 0$ тому, що j-та різниця $Y(t)$ по часу при $\Delta t \to 0$ збігається до похідної $Y^{(j)}(t)$. Аналогічні міркування стосуються оцінок $\hat{\alpha}$ параметрів нелінійної частини

$$\lim_{\Delta t \to 0} \hat{\alpha} = \alpha^*. \qquad (17)$$

У випадку, коли до вихідного сигналу додаються шуми $\eta(t)$, будемо вважати, що шуми є однаково розподіленими, незалежними, некорельованими з корисним сигналом. Відповідно до закону великих чисел середні значення $\bar{y}(t)$ від спостережень $y(t)$ збігаються по ймовірності до справжніх значень $y^*(t)$:

$$P\left\{|\,\bar{y} - y^*| > \varepsilon_1\right\} = 0_{1\varepsilon}(1/N),$$

де N - число спостережень.

Тоді, оцінки $\hat{\beta}$, $\hat{\alpha}$, що розраховуються за допомогою $\bar{y}(t)$, збігаються по ймовірності до справжніх значень β^* та α^*

$$P\left\{ |\hat{\beta} - \beta^*| > \varepsilon_2 \right\} = 0_{2\varepsilon}(1/N)$$

$$P\left\{ |\hat{\alpha} - \alpha^*| > \varepsilon_3 \right\} = 0_{3\varepsilon}(1/N).$$

Наступним розробленим методом є метод подільного визначення параметрів НДО на основі наближення нелінійності поліномом Лагранжу.

Виходячи з теореми єдиності нелінійну залежність $f(u)$ можна записати у формі Лагранжу

$$f(u) = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{\prod_{j\neq k} (u - u_j)}{\prod_{j\neq k} (u_k - u_j)} f(u_k) \qquad (18)$$

Цей вираз є вірним для статичної залежності $f(u)$. У випадку динаміки замість $f(u)$ треба використовувати змінну y_c, що визначається рівнянням (11).

Для кожної i-ї точки залежності $y_c(u)$ є справедливим вираз

$$y^c(u_i) - y_i^c(u) = 0$$

або

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{\prod_{j\neq k} (u_i - u_j)}{\prod_{j\neq k} (u_k - u_j)} y_k^c - y^c(u_i) = 0$$

Таким чином, щоб знайти оцінки параметрів лінійної частини моделі Гамерштейну треба мінімізувати функціонал

$$J = \min_{\beta} \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} \frac{\prod_{j \neq k} (u - u_j)}{\prod_{j \neq k} (u_k - u_j)} y_k^c - y^c \right\}^2 \qquad (19)$$

З урахуванням (11) функціонал (19) приймає вигляд

$$J = \min_{\beta} \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} \frac{\prod_{j \neq k} (u - u_j)}{\prod_{j \neq k} (u_k - u_j)} \left[y_k - \sum_{l=1}^{m} \beta_l y_k^{(l)} \right] - y + \sum_{l=1}^{m} \beta_l y^{(l)} \right\}^2. \qquad (20)$$

Мінімізація функціоналу (20) приводить до системи алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{l=1}^{m} \beta_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left[\sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(l)} \sum_{k=1}^{r+1} a_{ik} y'_k + y_i^{(l)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y'_k - y'_i \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(l)} - y'_i y_i^{(l)} \right] \right\} =$$

$$= \sum_{i=1}^{N} \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y'_k - y_i \sum_{k=1}^{r+1} a_{ik} y'_k + y'_i \sum_{k=1}^{r+1} a_{ik} y_k - y_i y'_i \right]$$

$$\sum_{l=1}^{m} \beta_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left[\sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(l)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y''_k + y_i^{(l)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y'_k - y'_i \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(l)} - y''_i y_i^{(l)} \right] \right\} =$$

$$= \sum_{i=1}^{N} \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y'_k - y_i \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y''_k + y''_i \sum_{k=1}^{r+1} a_{ik} y_k - y_i y''_i \right]$$

$$\cdot$$
$$\cdot$$
$$\cdot$$

$$\sum_{l=1}^{m} \beta_l \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left[\sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(l)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(m)} + y_i^{(l)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(m)} - y_i^{(m)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(l)} + y_i^{(m)} y_i^{(l)} \right] \right\} =$$

$$= \sum_{i=1}^{N} \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(m)} - y_i \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k^{(m)} + y_i^{(m)} \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} y_k - y_i y_i^{(m)} \right],$$

(21

У (21) позначено

$$a_{ik} = \frac{\prod\limits_{j \neq k} (u_i - u_j)}{\prod\limits_{j \neq k} (u_k - u_j)}$$

Оцінки параметрів нелінійної частини визначаються так само, як і в попередньому випадку.

Усі міркування, що до збігу оцінок параметрів, що стосувалися методу подільної ідентифікації з застосуванням перетвореного критерію Пухова, є вірними для цього методу.

Точність оцінок, що визначаються у відповідності з розглянутими методами, визначається точністю розрахунку похідних вихідного сигналу. У випадку розрахунку похідної по відфільтрованим даним вона буде відміною від справжньої похідної. З метою підвищення точності розрахунку похідної використовувався наступний вираз

$$Y'(i) = \frac{Y(i) - Y(i+sb)}{h},$$

де sb - змінюємий зсув.

Зміна величини цього зсуву дозволяє отримувати більш або менш точні значення похідної і, як наслідок цього, більш або менш точні значення оцінок параметрів.

Точність оцінок визначалася по об'єму еліпсоїду розсіяння, що визначався методами статистичного моделювання. Оцінювання точності оцінок запропонованого методу подільної ідентифікації (МПІ) провадилось у порівнянні з точністю оцінок методу сумісної ідентифікації (МСІ), котрий являє собою узагальнений метод найменших квадратів. На рис.2 зображені графіки зміни об'єму еліпсоїду розсіяння від зміни величину зсуву. Аналіз графіків показує, що оцінки МПІ є більш точними у порівнянні з оцінками МСІ. При цьому слід зауважити наступне. На початковому етапі збільшення об'єму

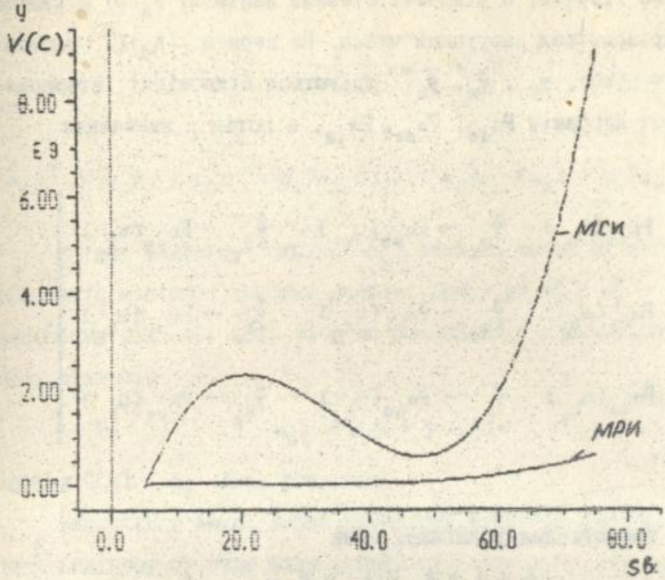

Рис. 2.

еліпсоіду покликане ефектом регуляризації перешкод. Подальше зменьшення відбувається внаслідок підвищення точності розрахунку похідних та оцінок параметрів. При подальшому збільшенню величини зсуву точність похідної падає, що приводить до збільшення об'єму еліпсоіду розсіяння.

Важливим моментом під час побудови математичної моделі нелінійного об'єкту є визначення її структури. Що стосується структури лінійної частини моделі, то з урахуванням мети ідентифікації достатньо обмежитись другим порядком. Таким чином, задачу структурної ідентифікації НДО можна визначити як задачу визначення структури статичного пертворювача, а у разі його представлення степеневим поліномом, як задачу визначення степені поліному.

Перевірка гіпотези о рівності степені поліному $P_n(u)$ шукаємої степени n_o проводиться наступний чином. По першим (n_o+1) спостереженням $u_k = u(kh)$, $\tilde{y}_k$, $\tilde{y}_k'$, $\tilde{y}_k''$ будуються відповідні інтерполяційні поліноми Лагранжу Pn_{oo}, Pn_{o1}, Pn_{o2}, а потім - визначник

$$A = \begin{vmatrix} \tilde{y}_{k_1}'' - Pn_{o2}(u_{k_1}) & \tilde{y}_{k_2}'' - Pn_{o2}(u_{k_2}) & \tilde{y}_{k_3}'' - Pn_{o2}(u_{k_3}) \\ \tilde{y}_{k_1}' - Pn_{o1}(u_{k_1}) & \tilde{y}_{k_2}' - Pn_{o1}(u_{k_2}) & \tilde{y}_{k_3}' - Pn_{o1}(u_{k_3}) \\ \tilde{y}_{k_1} - Pn_{oo}(u_{k_1}) & \tilde{y}_{k_2} - Pn_{oo}(u_{k_2}) & \tilde{y}_{k_3} - Pn_{oo}(u_{k_3}) \end{vmatrix}, \tag{22}$$

що може бути представлен у вигляді суми

$$A = A_o + A_1 + A_2 + A_3,$$

де кожний доданок A_i є однорідним многочленом від гаусовських випадкових величин степени i.

Вирішення задачі визначення ступеню поліному надає наступна лема.

<u>Лема.</u> Якщо ступінь поліному $P_n(u)$ дорівнює n_o, то $A_o(k_1,k_2,k_3) = = 0$, $k_1,k_2,k_3 = 0,\dots,N$.

<u>Доказ.</u> Умова $A_o \equiv 0$ є необхідною та достатньою для того, щоб ранг матриці

$$A = \left[y_k^{(j)} - Pn_{oj}(u_k))\right]_{j=o}^{2}\ {}_{k=o}^{N} \tag{23}$$

був менше трьох. Нерівність $\mathrm{rank} A \le 2$ равносильна існуванню таких α_o, α_1, α_2, що не є одночасно рівними нулю, що

$$\alpha_2(y_k'' - Pn_{o2}(u_k)) + \alpha_1(y_k' - Pn_{o1}(u_k)) + \alpha_o(y_k - Pn_{oo}(u_k)) = 0,$$

$$k = 0,\dots,N$$

або

$$\alpha_2 y_k'' + \alpha_1 y_k' + \alpha_o y_k = \alpha_2 Pn_{o2}(u_k) + \alpha_1 Pn_{o1}(u_k) + \alpha_o Pn_{oo}(u_k). \quad (24)$$

У тому випадку, коли $n = n_o$, замість чисел α_i виступають коефіцієнти лінійної частини моделі. Тому, що $\alpha_o^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 > 0$, то виконання рівності (24) веде до виконання у спостерігаємі моменти часу рівності

$$\beta_2 y'' + \beta_1 y' + y = Q(u),$$

де $deg\ Q(u) \le n_o$. Лема доведена.

Виходячи з леми, умова перевірки гіпотези при рівність ступеню поліному n_o буде мати вигляд

$$\lambda = \frac{A_1^2 + \dots + A_s^2}{s^{3/4}} \longrightarrow 0,\ s \longrightarrow \infty,\ \text{при } A_o = 0. \quad (25)$$

У противному випадку

$$\lambda = \frac{A_1^2 + \dots + A_s^2}{s^{3/4}} \longrightarrow \infty,\ s \longrightarrow \infty,\ \text{при } A_o \ne 0,$$

де s - кількість спостережень.

Виходячи з умови лінійної залежності строк визначника (22) для $n = n_o$, приходимо до висновку, що відношення елементів визначника a_{3i}/a_{1i}, a_{2i}/a_{1i}, для $i = 1,2,3$ дає значення відповідних коефіцієнтів β_i лінійної частини моделі.

Виходячи з задачі побудови цілеспрямованої моделі як критерій оптимальності моделі приймемо величину критерію верхнього рівня, що була досягнена при використанні цієї моделі. Важливим моментом є збіг у просторі параметрів екстремумів критеріїв

$$\beta^* = \underset{\beta\in B}{argmin}\ I(\beta) = \underset{\beta\in B}{argmin}\ J(\beta) \tag{2.46}$$

Віднак, у реальних умовах дія перешкод призводить до того, що екстремум функціоналу ідентифікації $J(\beta)$ локалізується з деякою похибкою $\tilde{\beta} = \beta^* + \delta\beta$. Похибка визначення параметрів веде до збільшення критерію верхнього рівня $I(\beta)$. З метою мінімізації приросту основного критерію необхідне погодження критеріїв.

Задача погодження критеріїв формулюється наступним чином

$$\min_{\beta} \left\{ \Delta I(\beta) \Big|_{\Delta J(\beta) = \mathrm{const}} \right\}, \tag{26}$$

де

$$\Delta J = .5\delta\beta^T J''(\beta^*)\delta\beta,$$

$$\Delta I = .5\delta\beta^T I''(\beta^*)\delta\beta.$$

Вирішення задачі (26) дає наступна теорема.

<u>Теорема.</u> Для функціоналів $J \subset C^2(\beta), I \subset C^2(\beta), \beta \in \mathbb{R}^m$ вирішення задачі (26) визначається наступними відношеннями

$$\begin{aligned} &\lambda_i[J''(\beta^*)] = k\lambda_i[I''(\beta^*)], \\ &u_i[J''(\beta^*)] = ku_i[I''(\beta^*)],\ i=\overline{1,m} \end{aligned} \tag{27}$$

де λ_i - власні числа матриць J и I,

u_i - власні вектори, що утворюють в $\mathbb{R}^m$ базиси цих матриць.

Для того, щоб використати наведений результат у СІ треба виконати перетворення

$$I''(\beta^*) = P^{-1}\lambda P,\quad J''(\beta^*) = KP^{-1}\lambda P;$$

$$J''(\beta^*) = KI(\beta^*). \tag{28}$$

У третій главі розглянуте питання підвищення точності розрахунку оптимальних параметрів настройки П-, ПІ-, ПІД-регуляторів. У зв'язку з тим, що існуючи методи розрахунку параметрів регуляторів не гарантують належної якості керування, виникла потреба уточнення залежностей між коефіцієнтами регуляторів та параметрами об'єкту. Отримати ці залежності в аналітичному вигляді є складною задачею у зв'язку з тим, що вирази, які пов'язують показники якості керування з параметрами об'єкту, що описується передаточною функцією четвертого порядку, є досить складними.

З метою вирішення поставленої задачі у роботі запропоновано використовувати інтегральний метод адаптивного пошуку екстремуму функції з поділенням каналів настройки коефіцієнтів регуляторів.

У четвертій главі розглянуте застосування методу подільної ідентифікації для визначення математичної моделі генератора нейтроного випромінювання НТГ-2 як багатовимірного нелінійного динамічного об'єкту. Наводяться результати синтезу адаптивної системи керування генератором нейтронів з моделлю у контурі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. У роботі проаналізовані та узагальнені існуючи підходи до синтезу систем ідентифікації та вибору їх компонент - моделей об'єктів, критеріїв ідентифікації, методів оцінювання параметрів нелінійного динамічного об'єкту.
2. Розроблена структура системи ідентифікації, що спрямована на вирішення задачі керування.
3. Запропонований критерій ідентифікації, застосування котрого надає можливість за допомогою одного тестового сигналу визначити усі статичні та динамічні параметри нелінійного об'єкту, що може бути описан у вигляді моделі Гаммерштейну, на основі різних про-

цедур. Знайдені таким чином оцінки є більш точними в порівнянні з оцінками сумісного методу найменьших квадратів;

4. На основі винайденого критерію розроблені алгоритми ідентифікації статичних та динамічних параметрів НДО на основі перетвореного критерію Пухова та на основі представлення нелінійності у формі поліному Лагранжу.

5. Розроблений алгоритм визначення ступеню поліному статичного перетворювача нелінійного динамічного об'єкту.

6. За допомогою інтегрального методу адаптивного пошуку екстремуму функції уточнені умови зв'язку параметрів моделі з коефіцієнтами стандартних регуляторів.

7. Винайдена математична модель генератору нейтронів як багатовимірного нелінійного динамічного об'єкту.

8. Синтезована система керування струмом трубки генератору нейтроного випромінювання.

Основні результати дисертації опубліковано у наступних роботах:

1. Дороговцев А.А., Спинул Л.Ю. Идентификация структуры статического преобразователя нелинейного динамического объекта. - подана до друку.

2. Сильвестров А.Н., Спинул Л.Ю. О разделении задач идентификации линейной и нелинейной частей модели Гаммерштейна. Вестн.Киев.политехн.ин-та.Техн.кибернетика.1992.Вып.13.

3. Сильвестров А.Н., Спинул Л.Ю. Разделение задач идентификации статики и динамики нелинейного динамического объекта. В кн. Контроль и управлние в технических систмах.1992.

4. Синицына И.З., Синицын И.В., Спинул Л.Ю. Автоматизированный программный комплекс анализа и синтеза систем автоматического управления электротехнологических процессов. В кн. Автоматизация

электротехнологических процессов. 1992.

5. Синицын И.В., Спинул Л.Ю. Учебный лабораторный программный комплекс УЛПК-3. Адаптив. системы автомат. упр.: Респ. межвед. - науч.-техн. сб. 1992. Вып 21.

6. Синицын И.В., Спинул Л.Ю., Ярченко В.П. Автоматизированная система синтеза непрерывных систем автоматического управления и обработки экспериментальных данных Quick Design Integrator. Адаптив. системы автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. 1992. - Вып. 22.

7. Спинул Л.Ю. Идентификация параметров статической и динамической характеристик нелинейного динамического объекта на основе приближения нелинейности полиномом Лагранжа. - подана до друку.

НВЛ ПФ КПІ 1993. Зам. 708 — 100.