

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

МИХАЛЬОВ Олександр Ілліч

УДК 681.5.015.32

АДАПТИВНО-ПОШУКОВІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ  
ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ З КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОШУКУ

05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів і  
виробництв

05.13.01 - Управління в технічних системах

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ

на здобуття наукового ступеня доктора  
технічних наук

Київ 1993

Роботу виконано на кафедрі прикладної математики та обчислювальної техніки Дніпропетровського металургійного інституту, а також у Київському політехнічному інституті.

Науковий консультант -

доктор технічних наук, професор  
Сильвестров А. М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Бодянський Е. В.

доктор технічних наук, професор  
Левков С. П.

доктор технічних наук, професор  
Зайченко Ю. П.

Провідна організація - НПО "Южное", НВЦ "Южкосмос"

Захист відбудеться "18" жовтня 1993 р.

о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої Ради Д068.14.07. по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук при Київському політехнічному інституті.

Адреса: 252056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського політехнічного інституту

Автореферат розіслано "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 р.

Учений секретар  
спеціалізованої Ради



В. Д. Романенко

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00802400 (E)

ЛНБ ім. В. Стефаника

## АНОТАЦІЯ

Метою роботи є розробка адаптивно-пошукових методів оперативної оптимізації та ідентифікації для класу не повністю вимірюваних динамічних об'єктів автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) і систем випробування та контролю (АСВ і К) в умовах апріорної та поточної невизначеності, мультимодальності критеріїв та нестационарності параметрів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі задачі:

1. Розроблено методологію адаптивно-пошукового підходу для класу задач екстремального управління і ідентифікації складних динамічних систем.
2. Розроблено і досліджено адаптивні методи з керованими параметрами пошуку екстремуму критеріїв ефективності в задачах багатовимірної оптимізації та ідентифікації нестационарних динамічних систем.
3. Розроблено та досліджено адаптивно-пошукові методи та алгоритми пошуку глобальних екстремумів мультимодальних критеріїв.
4. Розроблено методи пошукової адаптації коефіцієнтів настройки моделей ідентифікуємих динамічних об'єктів АСУ ТП з неповною спостережуваністю вектору вихідних величин.
5. Розроблено та досліджено алгоритми розділення каналів настройки коефіцієнтів моделей ідентифікуємих динамічних об'єктів АСУ ТП і АСВ і К.
6. Розроблено багатомодельні методи оперативної ідентифікації істотно нестационарних динамічних систем контролю і керування

технологічними процесами.

7. Розроблено пакет прикладних програм з розвиненим споживчим сервісом, орієнтований на реалізацію алгоритмів розроблених адаптивно-пошукових методів на IBM - сумісних комп'ютерах, а також в ПЗУ мікроконтролерів і ППЗУ мікро- і міні- ЕОМ цифрових АСУ ТП і АСВ і К.

Автор захищає:

1. Методологію адаптивно-пошукового підходу до рішення задач екстремального управління та ідентифікації багатовимірних динамічних об'єктів АСУ ТП і АСВ і К.
2. Методи прямого пошуку екстремумів критеріїв ефективності в задачах багатовимірної оперативної оптимізації і ідентифікації динамічних систем с неповним спостереженням вектору вихідних величин, засновані на принципах адаптивного керування параметрами пошуку.
3. Методи і алгоритми багатовимірної і в загальному випадку глобального пошуку екстремуму мультимодальних критеріїв якості нестационарних систем екстремального керування і адаптивної ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К.
4. Методику сполучення детермінованої і стохастичної складових пошукових керувань в задачах оптимізації і ідентифікації динамічних систем.
5. Принципи синтезу алгоритмів розділення каналів настройки моделей і пошукової адаптації параметрів граничного циклу пошуку.
6. Багатомодельні методи оперативної ідентифікації істотно нестационарних динамічних систем контролю і керування технологічними процесами, засновані на бінарній і синергійній стратегіях наст-

ройки.

7. Програмну, апаратну і виробничу реалізацію результатів дослідження.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Створення АСУ ТП і АСВ і К практично любого об'єкту обов'язково вклячас в себе слідуючі етапи: розробку математичної моделі процесу, облік параметрів регулятора і їх технічну і/або програмну реалізацію. При цьому необхідно враховувати, що більшість реальних технологічних об'єктів являє собою складні динамічні нестационарні системи з багатьма ступенями свободи, підвержені впливу багатьох зовнішніх сигнальних і параметричних збурень. Процеси в таких об'єктах, як правило, мало вивчені і роботи по їх математичному опису стикаються з великими труднощами. В свою чергу, рівень складності математичного опису ще більш зростає, якщо об'єкт не повністю спостерігається по виходу, а швидкість (частота) змін параметрів в процесі його функціонування сумірна з власною швидкістю (частотою) об'єкту. Для таких істотно нестационарних об'єктів, як правило, критерій ідентифікації мультимодальний, а саму процедуру ідентифікації необхідно провадити оперативно - в темпі реального функціонування об'єкту.

З другого боку, використані в сучасності в АСУ ТП екстремальні регулятори працюють, як правило, на принципах амплітудної модуляції, що приводить до необгрунтованого "розхитання" об'єктів АСУ ТП в процесі екстремального керування.

Критичний аналіз існуючих методів пошуку екстремуму, в тому

числі методів глобального пошуку, а також методів ідентифікації складних динамічних систем показує, що найбільш ефективними для розглянутого класу об'єктів АСУ ТП і АСВ і К є пошукові методи оптимізації і ідентифікації, засновані на принципах частотної (широотно-імпульсної) модуляції, які одержали назву адаптивно-пошукових. Разом з тим, це і найменш розроблений клас методів. В цьому зв'язку розробка адаптивно-пошукових методів і алгоритмів оптимізації і ідентифікації багатовимірних динамічних систем зі змінними по часу параметрами при неповному вимірюванні вектору вихідних величин, здатних працювати в реальному темпі функціонування систем, є актуальною.

**Методи дослідження.** Для вирішення вищеперелічених задач в роботі використано методи: теорії адаптивного і екстремального керування; теорії диференціальних рівнянь; теорії ідентифікації; теорії глобального пошуку екстремуму; теорії матриць і функціонального аналізу; системного аналізу і моделювання на ЗОМ.

**Наукова новизна.** Для розглянутого класу методів оптимізації і ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К, проведено теоретичне узагальнення і вирішено наступні задачі:

- в класі задач екстремального керування:
  - розроблено методологію адаптивно-пошукового підходу до вирішення задач багатовимірного пошуку екстремуму критерію ефективності;
  - доказано збіжність адаптивного методу прямого пошуку екстремуму критерію;
  - запропоновано методики і сконструйовано алгоритми багатовимірного і в загальному випадку глобального пошуку екстремуму мультимодальних критеріїв якості нестационарних систем екстремального керування та адаптивної ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К;

- обґрунтовано методику сполучання детермінованої і стохастичної складових пошукового керування;
- розроблено алгоритм адаптації параметрів граничного циклу пошуку;
  - в класі задач ідентифікації об'єктів в АСК ТП і АСВ і К;
- розроблено методи і алгоритми адаптивно-пошукової ідентифікації не сповна спостережуваних (скалярних) об'єктів АСУ ТП і АСВ і К.
- сконструйовано і досліджено алгоритм пошукової адаптації, доказано його збіжність;
- запропоновано ряд алгоритмів обмеження каналів настройки з обґрунтуванням їх ефективності методами спектрального і кореляційного аналізу;
- для класу нестационарних, в загальному випадку істотно нестационарних об'єктів, розроблено багатомодельні методи і алгоритми пошукової ідентифікації динамічних об'єктів АСУ ТВ і АСВ і К;
- доказано збіжність запропонованих адаптивно-пошукових алгоритмів з бінарною і синергійною стратегіями настройки коефіцієнтів моделей ідентифікованих багатовимірних систем.

Практична цінність. Дисертаційна робота виконувалась в межах найважливіших НДР у відповідності до цільової комплексної програми ДКНТ СРСР 0.Ц.026 "Автоматизація керування технологічними процесами, виробництвами, машинами, станками, обладнанням з використанням міні-ЕОМ и мікро-ЕОМ", з цільовою програмою ДКНТ СРСР 0.80.02 "Створити та ввести в експлуатацію системи автоматизації процесів виробництва і керування в народному господарстві на підставі інтеграції АСУ різного рівня використання обчислювальної техніки і мікропроцесорних засобів (інтегровані АСУ)" по завданню ЗБ. 01.05П "Розробити методи і програмні засоби для адаптивної ідентифікації і керування технологічними процесами і виробництвами безперервного

і дискретно-безперервного характеру" (спільна постанова Госплана СРСР N 643/228 від 28.10.85, постанова ДЖНО СРСР N 555 від 30.10.85).

Практична цінність теоретичних результатів і проведених експериментальних досліджень полягає насамперед в простоті розроблених адаптивно-пошукових алгоритмів оптимізації і ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСБ і К, і як слід, в їх реалізованості в ПЗУ і ППЗУ мікроконтролерів цифрових систем керування технологічними процесами і виконувчим обладнанням систем випробування і контролю, що дозволяє оптимізувати керування і при необхідності ідентифікувати і відслідкувати змінні за часом параметри об'єктів АСУ ТП -і АСБ і К в реальному темпі їх функціонування. При цьому використання в АСУ ТП екстремальних регуляторів з частотною модуляцією (ЧМ) (а в ряді випадків з амплітудною і широтно-імпульсною модуляцією), заснованих на розроблених в дисертації адаптивних методах багатовимірного пошуку екстремуму з керованими в процесі пошуку частотами і амплітудами, більш ефективно, ніж використання існуючих екстремальних регуляторів з амплітудною модуляцією (АМ). Принципове значення має те, що запропоновані екстремальні регулятори з ЧМ (і/або з ШИМ і АМ) об'єктів АСУ ТП більш робастні в умовах впливу перешкоджень і параметричних збурень, і, що важливо при цьому, в процесі функціонування вони не вносять збурень на рух керованого об'єкту.

Що до прикладного значення, то практичну цінність має також розроблене у вигляді пакету споживчих програм з розвиненим споживчим сервісом і об'єктно-орієнтованою графікою програмне забезпечення адаптивно-пошукових алгоритмів оптимізації та ідентифікації динамічних систем.

Реалізація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи використані:

- при створенні динамічних моделей автоматизованої системи випробування і контролю якості виготовлення еластичних об'ємних шарнірів;

- при розробці систем динамічного контролю реактивних виконувачих приладів АСУ ТП збірки камер згорання двигунів ЛА;

- при розробці автоматизованої системи іспитів каналів уподовжного руху ЛА;

- при оптимізації режимів роботи ІОС АСУ перевозами Придніпровської залізниці;

- при розробці мікропроцесорної АСУ ТП відновлення поверхні лопаток повітрянореактивних двигунів ЛА;

- у створенні інженерної методики технічної діагностики обладнання газокompресорних станцій і лінійних газопроводів;

- при розробці АСУ ТП лежачі доменної печі і моделюванні процесів двохрядної холодної прокатки труб;

- в учбовому процесі кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Дніпропетровського металургійного інституту в дисциплінах "Математичне моделювання", "Математичне програмування", "Дослідження операцій та методи оптимізації", тощо.

Акти впровадження з загальним економічним ефектом більш ніж в 2 млн. карбованців за цінами 1990-92 років наведені в Додатку до дисертації.

Апробація роботи. Основні положення дисертації докладались та були обговорені: на II Всесоюзній міжвузівській науково-технічній конференції "Робототехнічні системи", м. Київ, 1980; на Всесоюзній

науково-технічній конференції "Адаптивні роботи 82", м. Нальчик, 1982; на III Всесоюзній науково-технічній конференції "Роботи і робототехнічні системи", м. Челябінськ, 1983; на IV Всесоюзному симпозиумі "Методи теорії ідентифікації в задачах вимірвальної техніки і метрології", м. Новосибірськ, 1985; на II Всесоюзній науково-технічній конференції "Мікропроцесорні системи автоматики", м. Новосибірськ, 1990; на V Всесоюзному симпозиумі "Методи теорії ідентифікації в задачах вимірвальної техніки і метрології", м. Новосибірськ, 1990; на I Всесоюзній нараді "Математичне моделювання в машинобудуванні", м. Куйбишев, 1990; на науковій конференції "Проектування автоматизованих систем контролю і управління складними об'єктами", м. Туапсе (ХІРЕ), 1992; на науково-технічній конференції "Контроль і управління в технічних системах", м. Вінниця, 1992.

Публікації. По темі дисертації опубліковано понад 40 друкованих робіт, з них 1 учбовий посібник для студентів вузів, 6 авторських свідоцтв на винаходи і 35 статей і публікацій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація містить в собі вступ, п'ять глав, закінчення, список літератури, додатки і включає сторінок основного тексту, рисунків, таблиць, сторінок додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, дана її загальна характеристика.

В першій главі дано аналіз, стан і концепції розвитку адаптивно-пошукових систем оптимізації та ідентифікації складних динамічних об'єктів, особистості використання пошукових методів в АСУ ТП і АСБ і К, розглянуто питання стратегії настройки моделей, поставлено задачу дослідження.

Другу главу присвячено викладенню методології адаптивно-пошукового підходу, дослідженню збіжності розроблених адаптивних методів прямого пошуку екстремуму багатовимірних критеріїв ефективності, викладенню методів і алгоритмів глобального пошуку і адаптації параметрів граничного циклу.

В третій главі розроблено адаптивно-пошукові методи ідентифікації динамічних об'єктів АСУ ТП і АСВ і К, досліджено збіжність алгоритму пошукової адаптації, висвітлено питання ідентифікованості нестационарних динамічних систем, розділення каналів настройки моделей, вибору оптимальних вхідних сигналів.

Четверту главу присвячено розробці багатомодельних систем ідентифікації істотно нестационарних багатовимірних об'єктів, заснованих на бінарних і синергійних стратегіях настройки моделей.

В п'ятій главі наведені результати використання адаптивно-пошукових методів оптимізації і ідентифікації в АСУ ТП і АСВ і К в машинобудуванні та інших галузях промисловості.

В додатках наведено дослідження ефективності роботи алгоритму адаптивно-пошукової ідентифікації методами статистичного моделювання, дано функціональне наповнення і User menu пакету прикладних програм, зміст демонстраційної дискети.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано ціль роботи і її коротка характеристика, наводяться основні положення, які виносяться на захист.

У першій главі "Аналіз, стан і концепції розвитку адаптивно-пошукових методів оптимізації і ідентифікації об'єктів АСУ ТП и АСВ

і К" проведено порівнювальний аналіз існуючих методів оптимізації і ідентифікації з керованими параметрами пошуку для класу багатовимірних динамічних систем, описуваних в просторі стану диференціальними рівняннями, розглянуто питання вибору ефективних стратегій настройки моделей, розробки методів їх синергійвання і особистості використання адаптивно-пошукових методів в АСУ ТП и АСВ и К в промисловості, викладені концепції подальшого розвитку пошукових методів оптимізації і ідентифікації, сформульовано задачі дослідження.

Друга глава цілком присвячена розробці методів адаптивного пошуку екстремуму критерію в задачах оптимізації і ідентифікації багатовимірних динамічних систем.

Постановка задачі. Хай задано екстремальний об'єкт (ЗО), який має динаміку и характеризується безперервною однозначною функцією  $f: R^n \rightarrow F \subset R$  (рис. 1а) з властивостями екстремальності. При цьому існує екстремальна точка  $y^0 \in R^n$ , яка мінімізує функцію  $f: \min f(y) = f(y^0) = f^0$ .

Лінійна частина об'єкту являє собою багатовимірну динамічну систему, перехідна функція стану якої визначається групою безперервних відображень  $\varphi_i: T \times T \times X_i \times U_i \rightarrow X_i, i = \overline{1, n}$ . Тут  $T \subset R$  - підпорядкована множина моментів часу;  $X \subset R^n$  - множина фазових станів  $X_i = \{ \bar{x}_i: \bar{x}_i(t) = \varphi_i(t, t_0, \bar{x}_i(t_0), u_i(t)) \}, i = \overline{1, n}; U_i \subset R$  - множина миттєвих значень керувань.

Безперервні вихідні відображення  $\eta_i: T \times X_i \rightarrow Y_i, i = \overline{1, n}$  задають множину  $Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n \subset R^n$  вихідних величин системи, де  $Y_i = \{ y_i: y_i(t) = \eta_i(t, x_i(t)), x_i(t) \in X_i \}, i = \overline{1, n}; \Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_n$  множина припустимих керувань з класу кусково-постійних функцій, які задовольняють умові  $\Omega_i = \{ u_i: |u_i(t)| = u_0, u_0 = \text{const} > 0 \}, i = \overline{1, n}$ .

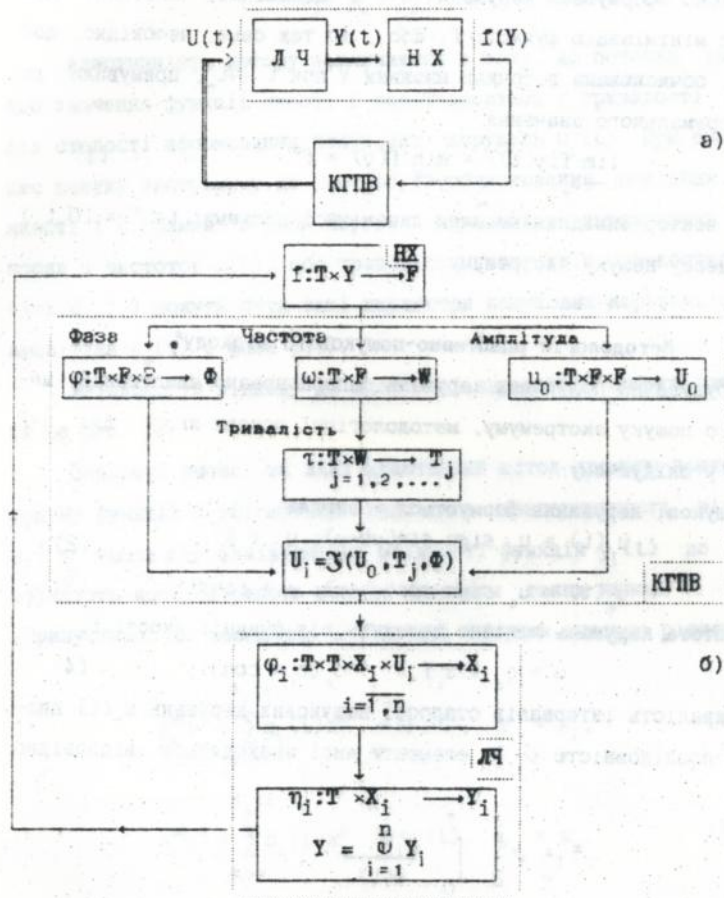


Рис.1 а) Структурна схема системи екстремального пошуку: Э0 - екстремальний об'єкт; ЛЧ - лінійна частина Э0; НХ - нелінійна характеристика Э0; КГПВ - керований генератор пошукових впливів. б) Функціонально-методологічна схема системи.

Потрібно сформулювати керування  $u_i \in \Omega_i$  динамічної системи, яке забезпечує мінімізацію функції  $f$ , або, що теж саме, необхідно, щоб функція  $f$ , обчислювана в точках множини  $Y$  при  $t \rightarrow t_r$ , прямувала до свого екстремального значення

$$\lim_{t \rightarrow t_r} f(y(t)) = \min_{y \in Y} f(y) = f^0. \quad (1)$$

де  $y(t)$  - вектор вихідних величин динамічної системи;  $t \in T = [0, t_r]$   
- час процесу пошуку екстремуму.

### Методологія адаптивно-пошукового підходу

Для будування пошукових керувань запропоновано адаптивний метод прямого пошуку екстремуму, методологічні основи якого для  $n=2$  полягають у наступному:

- пошукові керування формуються у вигляді

$$u_1(t) = u_0 \operatorname{sign} \sin(\omega t + \varphi); \quad u_0 \in R^1, \quad t \in ; \quad (2)$$

$$u_2(t) = u_0 \operatorname{sign} \cos(\omega t + \varphi); \quad \varphi = \text{const}, \quad (3)$$

- частота керувань лінійно залежить від функції якості  $f$ :

$$\omega = c_0 + c_1 f, \quad c_0, c_1 = \text{const}; \quad (4)$$

- тривалість інтервалів сталості пошукових керувань  $u_i(t)$  визначається послідовністю  $\{t_j\}$ , елементи якої знаходяться відповідно інтегралу

$$\tau_j^2 = \frac{\pi}{2} \int_0^{\tau} \frac{dt}{\omega(t)}$$

$$t_0 + \sum_{k=1}^{j-1} \tau_k \leq t \leq t_0 + \sum_{k=1}^j \tau_k; \quad (5)$$

- моменти переключень знаку керувань (2), (3), парні для  $u_2(t)$  і непарні для  $u_1(t)$ , визначаються для  $\{t_j\}$ , де

$$t_j = t_0 + \sum_{k=1}^j \tau_k, \quad j = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Адаптивність методу заключається в тому, що поточна інформація про значення функції якості  $f$  перетворюється у тривалості інтервалів сталості зформованих пошукових керувань  $u_1(t)$ . При цьому процес пошуку екстремуму не потребує обчислення похідних функції якості і є прямим. В свою чергу, керованими параметрами пошуку, поряд з частотой  $\omega(t)$ , або тривалістю інтервалів знакосталості  $\tau_j$  ( $j=1, 2, \dots$ ) можуть бути такі параметри пошукових керувань  $u_1(t)$  як амплітуда  $u_0(t)$  і фаза  $\phi(t)$ .

Методологія підходу до адаптації параметрів пошуку ілюструється на рис. 16.

Знайдемо умови, за яких адаптивний метод прямого пошуку екстремуму функції  $f$  збігається. Внаслідок безперервності відображень  $\varphi_1, \eta_1$  умови (1) еквівалентні збіжності функцій  $y_1(t)$  до  $y_1^*$ . Тоді збіжність досліджуваного методу визначим таким чином.

Припустимо, що поведінка динамічної системи описано рівняннями

$$\dot{x}_1^{(n_1)} = \sum_{k=0}^{n_1-1} a_k(t) x_1^k + u_1(t), \quad y_1 = x_1; \quad (7)$$

$$\dot{x}_2^{(n_2)} = \sum_{k=0}^{n_2-1} b_k(t) x_2^k + u_2(t), \quad y_2 = x_2. \quad (8)$$

Диференціальні рівняння розіб'ємо на декілька рівнянь, що відповідає деяким ділянкам руху досліджуваної системи. Можливі чотири варіанти

$$x_1^{(n_1)} = \sum_{k=0}^{n_1-1} a_k(t) x_1^k \pm u_0; \quad (9)$$

$$x_2^{(n_2)} = \sum_{k=0}^{n_2-1} b_k(t) x_2^k \pm u_0, \quad (10)$$

для різних поєднань знаків при  $u_0$ , тобто знаків пошукових керувань  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ . У відповідності до виразів (3), (4) конкретні знаки правих частин рівнянь визначені такими умовами:

$$u_1(t) > 0, u_2(t) > 0 \text{ при } \begin{cases} 2k\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < (2k+1)\pi; \\ (2k-0.5)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < \\ < (2k+0.5)\pi; \end{cases}$$

$$u_1(t) > 0, u_2(t) < 0 \text{ при } \begin{cases} 2k\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < (2k+1)\pi; \\ (2k-0.5)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < \\ < (2k+0.5)\pi; \end{cases}$$

$$u_1(t) < 0, u_2(t) < 0 \text{ при } \begin{cases} 2k\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < (2k+1)\pi; \\ (2k+0.5)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < \\ < (2k+1.5)\pi; \end{cases}$$

$$u_1(t) < 0, u_2(t) > 0 \text{ при } \begin{cases} (2k+1)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < (2k+2)\pi; \\ (2k+0.5)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < \\ < (2k+1.5)\pi; \end{cases}$$

$$u_1(t) < 0, u_2(t) > 0 \text{ при } \begin{cases} (2k+1)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < (2k+2)\pi; \\ (2k+1.5)\pi < [c_0 + c_1 f(y_1, y_2)]t + \varphi < \\ < (2k+2.5)\pi; \end{cases}$$

Перетворюючи одержані нерівності, знаходимо області  $S_i^k$  визначення диференціальних рівнянь (9), (10):

$$S_i^k = \left\{ (y_1, y_2): \frac{\pi(4k+i-1) - 2\varphi}{2c_1 t} - \frac{c_0}{c_1} \leq f(y_1, y_2) < \right. \\ \left. < \frac{\pi(4k+i) - 2\varphi}{2c_1 t} - \frac{c_0}{c_1} \right\}, \\ t \in T, i = 1, 2, 3, 4, k = \dots -1, 0, 1, \dots$$

Для зовнішньої і внутрішньої межі області  $S_i^k$  введемо відповідні позначення

$$R_i^k = \left\{ (y_1, y_2): f(y_1, y_2) = \frac{\pi(4k+i) - 2\varphi}{2c_1 t} - \frac{c_0}{c_1} \right\}; \quad (11)$$

$$r_i^k = \left\{ (y_1, y_2): f(y_1, y_2) = \frac{\pi(4k+i-1) - 2\varphi}{2c_1 t} - \frac{c_0}{c_1} \right\}, \quad (12)$$

$$t \in T, i = 1, 2, 3, 4, k = \dots -1, 0, 1, \dots$$

Твердження 1. Области перемикання  $S_i^k$  наближаються до екстремальної точки.

Твердження 2. Мас місце альтернатива: або зображувальна точка  $N$  переходить з зовнішньої межі  $R_i^k$  на внутрішню і прямує до екстремальної точки  $r_i^k$  з максимально можливою швидкістю  $V_j = \sqrt{V_j^1 + V_j^2}$ ,  $j=1, 2, \dots$ , або точка  $N$  здійснює перехід з  $r_i^k$  на  $R_i^k$  і наближається до екстремальної точки зі швидкістю  $V_j = |V_j^1 - V_j^2|$ ,  $j=1, 2, \dots$  при  $V_j^1 > V_j^2$ , або відділяється з тією ж швидкістю при  $V_j^2 > V_j^1$ .

Користуючись затвердженням знайдемо умови, за яких зображу-

вальна точка  $N$  в області переключення буде здійснювати рух першим засобом, або, іншими словами, знайдемо умови "найкращої" збіжності досліджуваного методу. Рух точки  $N$  в області  $S_1^k$  визначається диференціальними рівняннями (9), (10). Кожне з цих рівнянь перетворимо до системи диференціальних рівнянь 1-го порядку, поклавши

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 = x_1, \tilde{y}_1 = y_1; \tilde{x}_2 = \tilde{x}_2, \tilde{x}_2 = \tilde{x}_3, \dots, \tilde{x}_{n_1} &= \sum_{k=0}^{n_1-1} a_k(t) \tilde{x}_{k+1} \pm u_0; \\ \tilde{y}_1 = \tilde{y}_2, \tilde{y}_2 = \tilde{y}_3, \dots, \tilde{y}_{n_2} &= \sum_{k=0}^{n_2-1} b_k(t) \tilde{y}_{k+1} \pm u_0; \end{aligned} \quad (13)$$

Визначивши стан рівноваги кожної системи, одержимо чотири точки рівноваги в просторі  $R^{n_1+n_2}$  з координатами

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 = \pm \frac{u_0}{a_0(t)}; \tilde{x}_2 = 0, \dots, \tilde{x}_{n_1} = 0; \\ \tilde{y}_1 = \pm \frac{u_0}{b_0(t)}; \tilde{y}_2 = 0, \dots, \tilde{y}_{n_2} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Відповідно до заміни

$$\begin{aligned} x_1^* = \tilde{x}_1 \pm \frac{u_0}{a_0(t)}, x_2^* = \tilde{x}_2, \dots, x_{n_1}^* = \tilde{x}_{n_1}, y_1^* = \tilde{y}_1 \pm \frac{u_0}{b_0(t)}, \\ y_2^* = \tilde{y}_2, \dots, y_{n_2}^* = \tilde{y}_{n_2}. \end{aligned} \quad (15)$$

системи рівнянь (13) перетворюються у систему однорідних рівнянь

$$\dot{x}_1^* = x_2^*, \dot{x}_2^* = x_3^*, \dots, \dot{x}_{n_1}^* = - \sum_{k=0}^{n_1-1} a_k(t) x_{k+1}^*; \quad (16)$$

$$\dot{y}_1^* = y_2^*, \dot{y}_2^* = y_3^*, \dots, \dot{y}_{n_2}^* = \sum_{k=0}^{n_2-1} b_k(t) y_{k+1}^*; \quad (17)$$

$$x_1^* = y_1 - \frac{u_0}{a_0(t)}; y_1^* = y_1 - \frac{u_0}{b_0(t)}$$

На координатній площині  $y_1, y_2(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)$  чотири стану рівноваги (16) визначаються точками  $A\left\{\frac{u_0}{a_0(t)}, \frac{u_0}{b_0(t)}\right\}; B\left\{\frac{u_0}{a_0(t)}, -\frac{u_0}{b_0(t)}\right\};$

$C\left[-\frac{u}{a_0(t)}, \frac{u}{b_0(t)}\right]; D\left[-\frac{u}{a_0(t)}, \frac{u}{b_0(t)}\right]$ . Введемо ще чотири системи координат  $x^i y^i$ , осі яких паралельні осям  $\tilde{x}_1, \tilde{y}_1$ , а початок координат розміщено відповідно в точках A, B, C, D. Тоді рух зображувальної точки N, динаміка якої у системі координат  $x_1 y_1$  описується диференціальними рівняннями (1.7), (1.8), можна розглядати як рух зображувальної точки, описуваний системою однорідних диференціальних рівнянь (16), (17) у відповідній системі координат  $x^i y^i$ . Таким чином, характер поведінки точки N в області  $S_1^k$  визначається однорідними рівняннями неоднорідних диференціальних рівнянь (7), (8). Умови збіжності досліджуваного методу встановлює наступна теорема.

Теорема 1. Адаптивний метод прямого пошуку екстремуму функції збігається з максимально можливою швидкістю  $V_j = V_j^1 + V_j^2$ , якщо

$$\begin{aligned} \text{sign } u_1(t) &= \text{sign} \left[ \frac{x_1^*(t_0)}{a_0(t_0)} + \frac{x_1^*(t_1)}{a_0(t_1)} \right]; \\ & t \in [t_0, t_1]; \\ \text{sign } u_2(t) &= \text{sign} \left[ \frac{y_1^*(t_0)}{a_0(t_0)} + \frac{y_1^*(t_1)}{a_0(t_1)} \right]; \end{aligned} \quad (18)$$

$$0 < u_0 < \min |\sigma_i| \text{ при } \sigma_i < 0, i=1,2,3,4; \quad (19)$$

$$u_0 > \max (X_1, X_2) \text{ при } \text{sign } \sigma_{2p-1} = - \text{sign } \sigma_{2p};$$

$$X_1 < u_0 < \min |\sigma_{2+p}| \text{ при } \sigma_{2+p} < 0, \text{sign } \sigma_1 = - \text{sign } \sigma_2;$$

$$X_2 < u_0 < \min |\sigma_p| \text{ при } \sigma_p < 0, \text{sign } \sigma_3 = - \text{sign } \sigma_4, p=1,2.$$

$$\sigma_p = \frac{|x_1^*(t_0)a_0(t_1) + x_1^*(t_1)a_0(t_0)| \text{sign} [a_0(t_0)a_0(t_1)] a_0(t_0)a_0(t_1)}{\alpha_0^2(t_1) - \alpha_0^2(t_0)}$$

$$- (-1)^p \frac{[x_1^*(t_1)a_0(t_1) + x_1^*(t_0)a_0(t_0)] a_0(t_0)a_0(t_1)}{\alpha_0^2(t_1) - \alpha_0^2(t_0)};$$

$$\sigma_{2+p} = \frac{|y_1^*(t_0)b_0(t_1) - y_1^*(t_1)b_0(t_0)| \operatorname{sign} [b_0(t_0)b_0(t_1)] b_0(t_0)b_0(t_1)}{b_0^2(t_1) - b_0^2(t_0)}$$

$$- (-1)^p \frac{[y_1^*(t_1)b_0(t_1) - y_1^*(t_0)b_0(t_0)] b_0(t_0)b_0(t_1)}{b_0^2(t_1) - b_0^2(t_0)}$$

$$X_1 = -\sigma_p \text{ при } \sigma_p < 0, \quad X_2 = -\sigma_{2+p} \text{ при } \sigma_{2+p} < 0, \quad p=1,2.$$

### Методи багатовимірного пошуку.

Для випадку  $n \geq 2$ , а також при наявності в критерії локальних екстремумів, наведений вище алгоритм пошуку модифікується. Розглянемо по порядку випадки пошуку екстремуму унімодальної та мультимодальної функцій.

### Пошук екстремуму унімодальної функції

У випадку  $n \geq 2$  вирази законів керування (2), (3) трансформуються до виду

$$u_i(t) = u_0 \operatorname{sign} \varphi_i(t), \quad u_0 \in R_1, \quad (20)$$

де  $\varphi_i(t) \in \{\varphi_k(t); k=1, \dots, n\}$  - система ортогональних функцій.

Такою системою може бути система тригонометричних функцій  $(\sin \omega t; \cos \omega t; \sin 2\omega t; \cos 2\omega t; \dots)$ , а в більш складних випадках - системи ортогональних функцій Чебишева, Уолша, а також - імпульсних функцій і т.д.

При цьому частота  $\omega(t)$  пошукових керувань  $u_i(t)$ :  $\omega \in \overline{1, n}$ , тривалості інтервалів знакопостійності і моменти переключення знаку, як і в попередньому випадку при  $n=2$ , обчислюються у відповідності до виразів (4), (5), (6).

Збіжність такого багатовимірного алгоритму визначається умовами, подібними до умов (18), (19) для відповідних пар пошукових керувань

$(u_i(t), u_k(t)) : i \neq k.$

Таким чином, очевидно, що в такій постановці алгоритм пошуку при  $n \leq 2$  являється окремим випадком багатовимірного алгоритму з пошуковими керуваннями (20). В той же час, очевидно, що пошукові властивості такого алгоритму будуть залежати від динаміки екстремального об'єкту. Умови обмеження при цьому накладаються на частоти, кратні пошуковій частоті  $\omega(t)$ :

$$i\omega \ll \omega_{\text{ср}}, \quad i = \overline{2, n}, \quad (21)$$

де  $\omega_{\text{ср}}$  - частота зрізу АЧХ динамічної частини екстремального об'єкту.

Наведений адаптивний алгоритм багатовимірного прямого пошуку екстремуму успішно працює на унімодальних функціях  $f(\bar{y})$ , але, як показали модельні дослідження, малоефективний для пошуку глобально-го екстремуму у зв'язку з наявністю "жорсткого" обмеження (21).

Для вирішення питання про використання методу в даній постановці у роботі проведено дослідження динаміки процесу пошуку у даліні від екстремуму, в області екстремуму та при його дрейфі.

#### Пошук глобального екстремуму

Розглянемо адаптивно-пошукові методи пошуку глобального екстремуму мультимодальної функції  $f(Y)$ , в основу яких покладено досліджений вище адаптивний метод прямого пошуку. При цьому для надання методу пошуку глобальних властивостей пропонується:

-ввести в контур керування екстремальним об'єктом адаптивний коректор з метою ортогоналізації пошукових впливів і тим, зменшив їх кореляцій у процесі пошуку, підвищити адаптивні властивості методу;

-рандомізувати пошукові впливи з метою зняття обмеження (21) з одночасним виконанням умов незалежності керування у процесі пошуку

глобального екстремуму.

Адаптивна корекція пошукових керувань у задачі  
глобального пошуку екстремуму

В даному розділі для придання методу глобальних властивостей у систему пошуку екстремуму вводиться адаптивний коректор, в задачі якого входить адаптивна ортогоналізація пошукових керувань в поточному часі пошуку, яка містить у собі введення певної і кусково-постійної функції  $\Psi(T)$ , яка в крайньому випадку виступає як функція оцінки гіперповерхні мультимодального критерію:

$\Psi(T) = \lim_{i \rightarrow \infty} \Psi_i(T)$  при  $i \rightarrow \infty$ , где  $\Psi_i(T) = \frac{1}{T} \int_0^T U_{i,j}(t) U_{i,j}(t) dt$ ,  $j = 1, 2, \dots$ ;  $i = 0, 3, 7, \dots$  - функції, зформовані на інтервалах моментів переключення  $[t_{j-1}, t_j]$  пошукових керувань  $V_j(t)$  адаптивним ортогоналізатором.

В розділі дається доказ правомірності такого підходу, наводиться та досліджується ряд алгоритмів керування параметрами пошуку, найкращим з яких являється алгоритм керування частотами  $\omega_j = \omega_j(t)$  і амплітудами  $\alpha_j = \alpha_j(t)$  пошукових керувань:

$$\dot{\omega}_j(t) = \omega_0^* f_j - K_\psi \Psi_i(T) \delta f_j, \quad \delta f_j = f_j - f_{j-1}, \quad (22)$$

$$\alpha_j(t) = \alpha_0 + K_\alpha \Psi_i(T), \quad j = 1, 2, \dots, i = 0, 3, 7, \dots, \quad (23)$$

$$\omega_0, \omega^*, K_\psi, \alpha_0, K_\alpha - \text{const} > 0.$$

Рандомізований пошук глобального екстремуму

Виконання умови незалежності керувань  $u_i(t)$  в процесі пошуку можна досягти рандомізуючи пошукові керування, що дає змогу використати швидкодію детермінованих і пошукову варіабельність стохастичних методів пошуку екстремуму. В цьому випадку закон керування екстремальним об'єктом:

$$u_i(t) = u_0 \text{sign } \psi_i(t) \text{sign } \xi_m; \quad i = \overline{1, n} \quad (24)$$

Тут  $\psi_j(t)$  - будь-яка безперервна квазіперіодична функція з частотою  $\omega(t)$ ;  $\xi_{m_j}$  - випадкові рівномірно розподілені в інтервалі  $[0;1]$  числа,  $m_j \in \{j\}$  - номер моменту рандомізації  $i$ -того пошукового керування;  $j=1,2,\dots$  - номер моменту переключення знаку керування  $u_j(t)$ .

При відповідній організації рандомізуючої послідовності, без суттєвих інформаційних витрат, на достатньо великому, з точки зору процесу пошуку, інтервалі часу досягається статистична незалежність керувань  $u_j(t)$ . При цьому найкращим, з точки зору організації рандомізуючої послідовності, як показано в роботі, виявилось чередування випадкового (рандомізованого) і детермінованого моментів переключення, що створить так звану випадково-детерміновану реверсивну пару.

Рандомізований адаптивний алгоритм прямого пошуку (24) показав достатню ефективність на тестових функціях (рис.2) і в задачах багатовимірної ідентифікації динамічних систем.

Подальшим розвитком методів керування параметрами пошуку глобального екстремуму є впровадження в контур формування пошукових керувань динамічної ланки з керованою постійною часу, у якій діапазон регулювання залежить від міри близькості до екстремуму і швидкості настройки.

$$p_{j+1} = \begin{cases} p_j + K_p f_j, & \Delta f_j > 0 \\ p_j - K_p f_j, & \Delta f_j \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

$$\Delta f_j = f_j - f_{j-1}, \quad t \in [t_{j-1}; t_j].$$

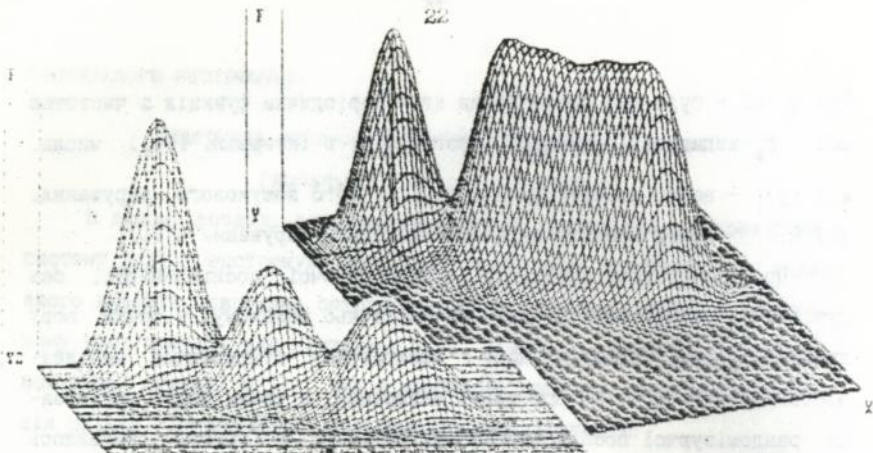


Рис. 2. Поверхні оптимізуємих функцій.

Як видно з алгоритму адаптації постійної часу (25) інерційність контуру керування, а також і робочий крок, збільшується при посуванні в сторону екстремуму і зменшується у протилежному випадку. При цьому динаміку пошуку можна показати рівнянням

$$\mu(t)\ddot{y}(t) + \nu(t)\dot{y}(t) = -K_v \operatorname{sgn}(\Delta f_j) \operatorname{sgn}_{m_j}^*, \quad t \in [t_{j-1}; t_{j+1}] \quad (26)$$

$$K_v = K_0 u_0, \quad j=1,2,\dots$$

Розглядаючи  $C$  як деяку оцінку зверху для значення глобального мінімуму ( $C > \sup \inf \{f[y(t)]\}$ ) відповідно до виразу (25) маємо, що

траєкторія пошуку як рішення рівняння (26) при

$$\mu(t) = (f[y(t)] - C) p(t), \quad (27)$$

$$\nu(t) = -\Delta f[y(t)] / p(t)$$

не може збігатися до локального мінімуму, величина якого більше  $C$  і переходить у траєкторію локального спуску як тільки буде досягнуто точки  $y_{\text{лок}}^*$  зі значенням цільової функції  $f(y_{\text{лок}}^*) \leq C$ . При цьому вирази (27), які задають алгоритм адаптації маси  $\mu(t)$  і коефіцієнту ковзання  $\nu(t)$  "важкого шарика" можуть розглядатися як умови глобальності пошуку, а наведений алгоритм як адаптивний алгоритм "важкого шарика".

В третій главі роботи розроблено адаптивно-пошукові методи

ідентифікації систем, динаміка яких описується рівняннями

$$\mathbb{P}: \begin{cases} \dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)u(t), \\ y(t) = C(t)X(t) + n(t), \quad t \in T, \end{cases} \quad (28)$$

де  $X(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n$  - вектор стану;  $u(t)$ ,  $y(t)$  - скалярні вхідний і вихідний сигнали;

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & & I_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ -a_1(t) & \dots & -a_n(t) \end{bmatrix} - \text{матриця невідомих коефіцієнтів,}$$

$I_{n-1} \in R^{(n-1) \times (n-1)}$  - одинична матриця;  $B(t) = [0, \dots, 0, b(t)]^T$ ,

$C(t) = [0, \dots, 0, c(t)]$  -  $n$ -вимірні вектори координат вхідних і вихідних сигналів;  $n(t)$  - шум виміру.

В загальному випадку на значення і швидкість виміру параметрів об'єкту можуть бути накладені обмеження  $A(t) \leq M_0$ ,  $\dot{A}(t) \leq M_1$ .

Поставлено задачу синтезу системи ідентифікації параметрів у темпі надходження інформації про скалярний вхід і вихід  $u(t)$ ,  $y(t)$  об'єкту  $\mathbb{P}$ , що задовольняє вимогам по швидкодії і обсягу використаної оперативної пам'яті ЕОМ.

В відповідності до принципу ідентифікації з настроюваної моделі система ідентифікації включає до себе блоки обмеження вихідної величини моделі  $y_m(t)$ , помилки  $e(t)$  мінімізації критерію  $F[e(t)]$  процесу ідентифікації в блоці настройки коефіцієнтів моделі. Математичний опис цих блоків в загальному випадку відповідно:

$$\mathbb{M}: \begin{cases} \dot{X}_m(t) = A_m(t)X_m(t) + B_m(t)u(t), \\ y_m(t) = C(t)X_m(t), \quad t \in T, \end{cases} \quad (29)$$

$$e(t) = y(t) - y_m(t); \quad e \in R^1, \quad (30)$$

$$f(t) = F[e(t)] = \gamma e^2(t) \longrightarrow \min; \quad \gamma = \text{const} > 0. \quad (31)$$

Тут розмірності векторів змінних і матриць коефіцієнтів відповідають розмірностям ідентифікованого об'єкту.

В загальному випадку помилка ідентифікації  $e(t)$  є неявною функцією вектору невідомих параметрів ідентифікованого об'єкту  $\Theta =$

$(\hat{A} \mid \hat{B})$  і настроєних коефіцієнтів моделі  $\Theta_m = (\hat{A}_m \mid \hat{B}_m)$  ( $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  - відповідні вектори, складені з невідомих елементів матриць  $A$ ,  $B$ ):

$$e(t) = e[t; \Theta(t), \Theta_m(t)], \quad (32)$$

в силу параметричної залежності виходів об'єкту і моделі:  $y(t) = y[t; \Theta(t)]$ ,  $y_m(t) = y_m[t; \Theta_m(t)]$ . В цьому зв'язку досягнення мінімуму помилки  $e(t)$ , а значить і  $\min F[e(t)]$  можливо тільки при виконанні умови

$$|\Theta(t_r) - \Theta_m(t_r)| \leq \epsilon_\theta, \quad t_r \in T, \quad (33)$$

де  $t_r$  - момент часу останову процесу ідентифікації;  $\epsilon_\theta$  - точність параметричної ідентифікації.

В свою чергу, неявна залежність критерію  $F[e(t)]$  від параметрів об'єкту  $\theta$  і коефіцієнтів моделі  $\theta$  і неповнота виміру вектору вихідних величин обмежує застосовність для розв'язання задачі ідентифікації відомих методів оптимізації. Як метод оптимізації, що володіє достатньою ефективністю для подібного класу задач, в роботі вибрано розроблений у другій главі метод прямого керованого пошуку екстремуму. При цьому алгоритмічна реалізація методу в системі ідентифікації полягає в формуванні кусково-постійних впливів настройки  $k$ -коефіцієнтів моделі

$$v_j^k = \begin{cases} V_0, & |\tau_j^k - t| \geq \epsilon_\tau, \quad k=1,2,\dots \\ -V_0, & |\tau_j^k - t| < \epsilon_\tau, \quad j=1,2,\dots \end{cases} \quad (34)$$

$$V_0 \in R^1,$$

у яких тривалість інтервалів знакопостійності формується у відповідності з функціональним рівнянням

$$\tau_j^k = \frac{\pi}{\tau_j^k} \int_0^{\tau_j^k} \frac{dt}{\omega_0 + K_\omega F[e(t)]}; \quad (35)$$

$$\omega_0, K_\omega \in R^1.$$

Тут  $k$ -номер настроюваного коефіцієнту,  $j$  - номер моменту переключення знаку пошукового впливу.

Поточні значення настроюваних коефіцієнтів моменту  $\theta_m(t)$  формуються як вихідні сигнали виконавчих механізмів (інтеграторів) блоку настройки:

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_V V(t), \quad t \in T, \quad (36)$$

де  $V(t)$  - вектор-функція пошукових впливів;  $K_V$  - матриця коефіцієнтів передачі інтеграторів.

Вирази (34-36) задають загальну структуру алгоритму пошукової адаптації моделі, який для забезпечення процесу одночасної ідентифікації  $k$  параметрів об'єкту  $\Phi$  доповнюється алгоритмом розділення каналів настройки коефіцієнтів моделі  $\Sigma$ .

#### Алгоритм пошукової адаптації

В роботі показано, що при відповідних припущеннях алгоритм пошукової адаптації (34-36) в детермінованій постановці може мати вигляд

$$\begin{aligned} \theta_j^M &= \theta_{j-1}^M + \delta \theta_j^M = \\ &= \theta_{j-1}^M + (-1)^j K_n \operatorname{sgn}(\Delta \tau_j) = \\ &= \theta_{j-1}^M + (-1)^j K_\theta \operatorname{sgn}(\Delta F_j), \end{aligned} \quad (37)$$

$j = 1, 2, \dots$

Тут  $K_\theta = K_n K_c = K_V V_0 \pi K_w dt / \omega_0^2$  - величина кроку адаптації,

$$\operatorname{sgn}(\Delta F_j) = \begin{cases} 1, & \Delta F_j \geq \delta, \\ -1, & \Delta F_j < -\delta, \end{cases} \quad \Delta F_j = F_j - F_{j-1},$$

де  $\delta$  - діаметр граничного циклу.

При цьому тривалість інтервалу знакопостійності пошукових керувань  $V(t)$  визначається відповідно до виразу (рис.3)

$$\tau_j = \frac{\pi}{\omega_0} (1 + K_F F_j) = \frac{\pi}{\omega_0} - K_C F_j, \quad (38)$$

$$K_C = K_F / \omega_0 = \pi K_w / \omega_0^2,$$

який можна також представити у вигляді  $\tau_j = \tau + \delta\tau_j$ , де  $\tau = \pi / \omega_c$  - тривалість інтервалу знакопостійності в випадку періодичного впливу  $V(t)$ ;  $\delta\tau_j = -K_C F_j$  - варіація тривалості інтервалу в процесі настройки. В свою чергу на парі інтервалів знакопостійності  $\tau_j = \tau + \delta\tau_j$ ,  $\tau_{j-1} = \tau + \delta\tau_{j-1}$  різниця

$$\Delta\tau_j = \tau_j - \tau_{j-1} = \delta\tau_j - \delta\tau_{j-1} = -K_C \Delta F_j, \quad (39)$$

Із виразу (39) виходить, що приріст  $\Delta\tau_j$  прямо пропорційно різниці значень критерію ідентифікації  $\Delta F_j$  за час двох інтервалів, за який відбулася одна зміна знаку пошукового впливу  $V(t)$  - реверс знаку.

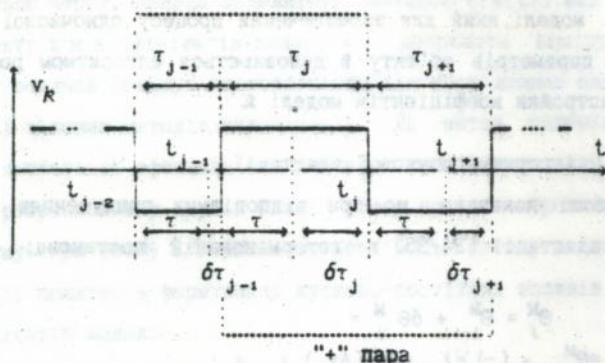


Рис. 3. Загальний вигляд  $k$ -того пошукового впливу.

**Лема 1.** Послідовність інтервалів переключення ( $\tau_j$ ;  $j=1,2,\dots$ ), значення якої обчислюються відповідно з інтегралом (35), є збіжною і мінімізуючою безперервну диференціалу по коефіцієнтах  $\theta_M$  функцій якості процесу ідентифікації  $F[e(t)] = \Phi(\theta_M)$ . При цьому  $\theta^* = \theta(t) = \text{const}$ ,  $t \in [t_1, t_2] \subset T$  є граничною точкою послідовності ( $\theta_j^M$ ) і стаціонарною точкою функції  $\Phi$ , тобто

$$\nabla_{\theta_M} \Phi = \partial \Phi / \partial \theta_M \Big|_{\theta_M = \theta^*} = 0.$$

Теорема 2. Алгоритм (37) пошукової адаптації моделі  $\mathfrak{M}$  є збіжним за кінцеве число переключень знаку кусково-постійних впливів  $V(t)$  при виконанні умов леми 1.

### Алгоритм розділення каналів настройки

Поставлено задачу без витрати інформативності процесу настройки коефіцієнтів моделі  $\mathfrak{M}$ , зменшити кореляцію пошукових впливів і тим самим зробити можливим одночасне оцінювання усіх невідомих параметрів об'єкту  $\mathfrak{B}$ . Розглянемо послідовно два алгоритми розділення каналів, заснованих відповідно на включенні в контур настройки ортогоналізуючих впливів  $\hat{\varphi}_k(t)$  і рандомізації пошукових керувань  $U$  загальному випадку як ортогоналізуючі впливи  $\hat{\varphi}_k(t)$  можуть бути використані класичні ортогональні поліноми: Чебишова 1-го і 2-го роду, Уолша, тригонометричних, блочно-імпульсних функцій, тощо.

У випадку, коли ортогоналізуючими впливами  $\hat{\varphi}_k(t)$  виступають функції  $\sin(kvt)$ :  $k=1,2,\dots$ , алгоритм настройки у відповідності до (37), буде мати вигляд

$$e_{j,k}^m = e_{j-1,k}^m + (-1)^j K_{\Theta} \operatorname{Sgn}(\Delta F_j) + g_{j,k} \sin(kv_n \Delta t) \quad (40)$$

Тут  $t_j \Delta t = t \in [t_{j-1}, t_j]$ ,  $j=1,2,\dots$ , де  $\Delta t$  - крок інтегрування системи;  $k$  - номер настроюваного коефіцієнту моделі;  $B_{j,k} = P_k(F_{\Theta} - F_j)$  - амплітуда і  $v$  - опорна частота ортогоналізуючих впливів  $\hat{\varphi}_k(t)$ ;  $p_k \in R^1$  - вагові коефіцієнти,  $F_{\Theta}$  - екстремальне значення критерію ідентифікації.

Застосування цього алгоритму практично обмежено об'єктами не вище п'ятого порядку, що пов'язано з частотними обмеженнями, подібними (21) - вибір опорної частоти ортогоналізуючих впливів є

критичним з точки зору реальної, як правило, невідомої інерційності ідентифікованого об'єкту.

Принципово новий підхід для зменшення взаємовпливу каналів в процесі пошуку ґрунтується на рандомізації пошукових керувань відповідно до якої

$$V(t) = V_0 \operatorname{sgn}(\tau_j - t) \operatorname{sgn} \xi_{m_j} \quad (41)$$

$$\Theta_j^m = \Theta_{j-1}^j + (-1)^j K_\Theta \operatorname{sgn}(\Delta F_j) \operatorname{sgn} \xi_{m_j} \quad (42)$$

Тут  $\xi_{m_j}$  - випадково рівномірно розподілені в інтервалі [0;1] числа, генеровані в моменти:

$$m_j = \begin{cases} 2_{j-1}, & \text{рандомізація з непарних моментів } j, \\ 2_{j-2}, & \text{інакше} \end{cases}$$

У запропонованому алгоритмі розділ каналів досягається за рахунок одержання за час дії на систему  $N$  пар моментів переключення статистичної незалежності пошукових впливів  $V(t)$ , рандомізованих відповідно до алгоритму (41).

Із двох наведених алгоритмів: (40) і (42) найбільш ефективним з точки зору точності оцінок ідентифікованих параметрів є алгоритм (42) з рандомізацією пошукових керувань. Цей алгоритм поєднує в собі швидкість детермінованого алгоритму пошукової адаптації (37) з варіабельністю і статистичною незалежністю рандомізованого пошуку.

У главі 3 розглянуто також питання ідентифікації нестационарних динамічних систем і вибору керувачих впливів для випадків пасивної та активної ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К.

Четверта глава присвячена багатомодельним методам ідентифікації. Розглянуто два варіанти стратегій одночасної настройки паралельних моделей. Перша з них являє собою стратегію бінарної настройки моделей, які здійснюють в процесі пошуку зустрічні рухи в просторі припустимих еволюцій об'єкту. Для даної стратегії показано

збіжність алгоритмів бінарної настройки, наведено комбінований алгоритм обчисленням функцій чутливості моделей. В свою чергу, у другій частині глави розглянуто комбінована стратегія, яка містить в собі адаптивні властивості пошукових методів з варіабельністю синергійної настройки моделей. Показано, що використання такої стратегії дозволяє ідентифікувати істотно нестационарні динамічні системи.

Обчислювальна процедура бінарної пошукової настройки містить в собі такі етапи: а) організація асиметричної попарної разводки варіюваних коефіцієнтів  $b(0) > c(0)$  при ненульових початкових умовах по координатах  $Y(0) \neq Z(0) \neq 0$  двох настроєваних моделей и нульових ( $X(0)=0$ ) або ненульових умовах ( $X(0) \neq 0$ ) вивчаємого об'єкту; б) установлення невідповідності координат  $Y(0), Z(0)$  настроєваних моделей координатам  $X(0)$  вивчаємого об'єкту в початковий момент часу  $t=t_0$ ; в) визначення попарно варіюваних коефіцієнтів  $b(t), c(t)$  на інтервалі  $t \in [t_0, t_r]$  по початкових координатах  $Y(0), Z(0)$  настроєваних моделей; г) обчислення функції якості відповідно з фактичними моментами переключення  $t_j$  на інтервалі ідентифікації  $t \in [t_{j-1}, t_j]$ ; д) знаходження координат  $Y(t), Z(t)$  настроєваних моделей у моменті часу, рівні моментам переключень  $t_j$ ; е) обчислення істинних значень варіюваних коефіцієнтів  $b(t_j), c(t_j)$  по координатах моделей  $Y(t_j), Z(t_j)$ ; ж) повторення процедури обчислення до тих пір, поки в просторі попарно варіюваних коефіцієнтів настроєваних моделей не з'явиться відображення точкою зустрічі  $b(t)=c(t)$  и не буде досягнуто області розпізнавання параметрів  $\alpha(t) \in D_\alpha: \{b(t) \begin{cases} \geq \\ \leq \end{cases} \alpha(t) \begin{cases} \geq \\ \leq \end{cases} c(t)\}$ .

У розділі, присвяченому синергійній стратегії настройки розглядається алгоритм ідентифікації лінійних істотно нестационарних динамічних систем, який має найбільш високі в порівнянні з відомими методами швидкісними характеристиками і перешкодостійкістю.

завдяки ефективному поєднанню в процесі ідентифікації принципів адаптивно-пошукової і синергійної стратегій настройки  $N$  моделей, математичний опис яких має вигляд

$$\mathbb{M}_i: \begin{cases} \dot{X}_m^i(t) = A_m^i(t) X_m^i(t) + G u(t); \\ y_m^i(t) = H X_m^i(t), \quad t \in T. \end{cases} \quad (43)$$

де  $A_m^i(t)$ : ( $i=1, N$ ) -  $[n \times n]$  матриці настроєваних коефіцієнтів моделей;  $X_m^i(t)$  -  $[n \times 1]$  вектори стану моделей;  $G = [1 \ 0 \ 0 \dots 0]_{n \times 1}^T$ ,  $H = [1 \ 0 \ 0 \dots 0]_{1 \times n}$  - матриці координат вхідних і вихідних сигналів;  $u(t)$  і  $y_m^i(t)$  - скалярні вхідні і вихідні сигнали;  $T = [t_0, t_f]$  - множина моментів часу процесу ідентифікації. Початкові значення настроєваних коефіцієнтів адаптивних моделей вибирають відповідно до наявної апріорної інформації про обмеження параметрів  $A(t)$  ідентифікованого об'єкту:

$$A_{1_0} \leq A(t_0) \leq A_{2_0}; \quad |A(t)| \leq A_v; \quad \|A(t)\| \leq c_1 \in R^1. \quad (44)$$

Здесь  $A_{1_0}, A_{2_0}, A_v$  - відповідні матриці констант обмежень,  $c_1 = \text{const} > 0$ .

Критеріями процесу настройки моделей є парні функції помилок  $e_i(t) = y(t) - y_m^i(t)$ :

$$F_i(t) = -\gamma_i e_i^2(t) \text{ або } \hat{F}_i(t) = \exp[F_i(t)], \quad 0 < \gamma_i \in R^1, \quad (45)$$

де  $y(t) \in L_1$  - спостережаема координата ідентифікованого об'єкту.

Робочі кроки пошуку екстремумів функцій  $F_i(t)$  обчислюють відповідно до комбінованого алгоритму одночасної настройки  $N$  адаптивних моделей, що містять в собі пошукову і синергійну компоненти.

При цьому пошукова компонента алгоритму призначена для організації автоматичного обчислення робочого кроку в процесі адаптивної настройки моделей, синергійна компонента алгоритму реалізує ігровий підхід до вибору найкращого робочого кроку із сукупності уже обчислених для кожної із  $N$  моделей при одночасній настройці всіх коефіцієнтів  $A_m^i(t)$  ( $i=1, N$ ).

В процесі адаптивно-пошукової настройки коефіцієнтів  $i=1$  моделі для кожного  $k$ -го настроюваного коефіцієнту формують пошукові впливи. Останні являють собою бінарні кусково-постійні функції  $v_i^k(t) \in \Omega$ , в тривалостях знакопостійності яких закодована інформація про настроювані коефіцієнти. При цьому тривалості знакопостійності (робочого кроку) обчислюють автоматично відповідно до інформації про поточне значення критерію  $F_1(t)$  процесу настройки  $i$ -ї моделі:

$$\begin{aligned}
 \tau_{i,j}^k &= t_{i,j}^k - t_{i,j-1}^k = \lim_{t \rightarrow t_{i,j}^k} \left( \pi(t - t_{i,j-1}^k) \right)^{-1} \int_{t_{i,j-1}^k}^t [\omega_0^i + \Delta\omega^i F_1(\tau)]^{-1} d\tau - t_{i,j-1}^k, \\
 t_{i,j-1}^k &\leq t < t_{i,j}^k; \quad t_{i,j-1}^k, t_{i,j}^k \in T_1 \subset T; \quad k \in \{1; \dots; n\}; \\
 \omega_0^i, \Delta\omega^i &\in \mathbb{R}^1; \quad i = \overline{1; N}; \quad j = 1, 2, \dots \quad (46)
 \end{aligned}$$

де  $t_{i,j-1}^k$  і  $t_{i,j}^k$  - попередній ( $(j-1)$ -й) і наступний ( $j$ -й) моменти переключення знаку бінарного пошукового впливу  $k$ -го настроюваного коефіцієнту в  $i$ -й моделі

$$v_i^k(t) = v_0 \operatorname{sgn}(t_{i,j}^k - t), \quad t \in T. \quad (47)$$

Тут  $v_0 = \operatorname{const} > 0$ ;  $\operatorname{sgn}(\cdot)$  - знакова функція.

Для розширення пошукових можливостей алгоритму і його робастності формуються рандомізовані пошукові впливи

$$u_i^k(t) = \begin{cases} (-1)^{\delta_{i\nu}^k} v_i^k(t_\nu), & \nu = 2j-1; \\ -v_i^k(t_\nu) & \nu = 2j; \end{cases} \quad \delta_{i\nu}^k = \begin{cases} 0, & \xi_{i\nu}^k \leq 0,5; \\ 1, & \xi_{i\nu}^k > 0,5; \end{cases} \quad u_i^k(t) \in \Omega. \quad (48)$$

Тут  $\xi_{i\nu}^k \in \Xi$  - випадкові рівномірно розподілені в інтервалі  $[0;1]$  числа, що виробляються датчиком випадкових сигналів в непарні моменти переключення  $\nu = 2j-1$  для кожного  $k$ -го настроюваного коефіцієнту  $i$ -ї моделі;  $\Omega$  - множина допустимих керувань. Як виходить з

виразу (48) при  $\nu=2j$  (момент реверсу) здійснюється детерміноване змінювання знаку пошукових впливів.

Алгоритм пошукової адаптації  $i$ -й моделі:

$$A_{m_j}^i \text{ і } A_{m_{j-1}}^i + \Delta A_{m_j}^i ; \quad (49)$$

$$\Delta A_{m_j}^i = K_{\text{ам}} \int_{t_{i,j-1}}^{t_{i,j}} U_i(\tau) d\tau .$$

Вибір найкращого робочого кроку настройки коефіцієнтів  $\Delta A_{m_j}^i$  в моменти переключення  $t=t_j$  здійснюється за синергійною стратегією відповідно до алгоритму:

$$\Delta A_{m_j}^i = \begin{cases} \Delta A_{m_{j-1}}^i & \text{при } \forall \Delta F_{i,j-1} \leq 0 \text{ і } |F_{r,j-1} - F_{\text{э}}| = \min_{i \in [1;N]} |F_{i,j-1} - F_{\text{э}}| ; \\ \Delta A_{m_{j-1}}^i & \text{при } \Delta F_{i,j-1} > 0 \text{ і } \forall \Delta F_{p,j-1} \leq 0 (p \neq i) \text{ і/або } \Delta F_{i,j-1}^* > 0 ; \\ \Delta A_{m_{j-1}}^s & \text{при } \forall \Delta F_{i,j-1} \leq 0 \text{ і } \Delta F_{s,j-1} > 0 (s \neq i) . \end{cases} \quad (50)$$

Тут  $\Delta F_{i,j-1} = \Delta F_{i,j-1} - \Delta F_{q,j-1}$  ( $q \in [1;N], q \neq i$ )  $-(N-1)$  - вектор приросту другого порядку функції якості настройки  $i$ -й моделі;  $F_{\text{э}}$  - екстремальне значення функції  $F_i(t)$  ( $i \in [1;N]$ );  $|F_{i,j-1} - F_{\text{э}}| \leq \epsilon$  - критерій вибору моделі, яка настроєна найкращим чином, при умові що попередній робочий крок пошуку для всіх  $N$  моделей було зроблено невдало ( $\forall \Delta F_{i,j-1} \leq 0$ ). В свою чергу, якщо найкращою моделлю в момент  $t_j$  виявилась, наприклад, модель з індексом  $i=p$ , тобто норма  $\|A_{m_j}^i - A_j\| \leq \epsilon_j$  ( $\forall \epsilon > 0$ ), то відповідно синергійній стратегії в цей момент відбується перемикання всіх моделей на модель з індексом  $p$ :

$$A_{m_j}^i = A_{m_j}^p ; y_{m_j}^i = y_{m_j}^p , i \in [1;N] ; j=1,2,\dots \quad (51)$$

Таким чином, в алгоритмі (43)-(51) реалізовані, з одного боку, можливості незалежного пошуку, який може здійснювати кожна із  $N$  моделей (вирази (46)-(48), (49)) в процесі настройки коефіцієнтів, а

з другого боку, - можливості ефективної взаємодії всіх  $N$  моделей (вирази (49), (50)). Все це забезпечує достатньо високу швидкість настройки коефіцієнтів і тим самим дозволяє ідентифікувати істотно нестационарні динамічні системи в умовах впливу перешкод і параметричних збурень.

У п'ятій главі розглянуто застосування адаптивно-пошукових методів оптимізації і ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ и К в машинобудуванні та інших галузях промисловості для ряду практичних задач, а саме: а) для оптимізації роботи ІОС АСУ перевозками Придніпровської залізниці в процесі міжмашинного обміну в режимах проведення регламентів і нормальної експлуатації; б) для ідентифікації параметрів еластичних об'ємних шарнірів, які являють собою гумово-металеvu поворотну систему з пружними зв'язками і гістерезисноу характеристик, яка розрахована на велике динамічне навантаження багатомасових технологічних вузлів; в) для відновлення істинних вхідних сигналів з датчиків при проведенні випробувань критичних вузлів аеродинамічних об'єктів в умовах перешкоджень та при наявності динамічних помилок у вимірвальних засобах АСУ ТП збірки камер згорання двигунів; г) для автоматизації іспитів і контролю продольного каналу ЛА з заліком впливу нестационарності обігу, аеропружності ЛА, нелінійності його характеристик; д) при проектуванні і наступних іспитах металургійних робототехнічних систем в АСУ ТП шліфування лещаді доменної печі.

В роботі розроблено пакет прикладних програм з розвиненим споживчим сервісом, двох- і трьохмірною графікою, з засобами тимчасової, спектральної і кореляційної обробки даних, орієнтований на використання в ПЕОМ з мінімальною оперативною пам'яттю. Наведено опис програм, які демонструють роботу адаптивно-пошукових алгоритмів.

мів оптимізації і ідентифікації динамічних систем.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. В роботі проаналізовано і узагальнено існуючі методи і підходи для вирішення задач АСУ ТП і АСВ і К розглянутого класу, тобто с нестационарні задачі оптимізації і ідентифікації динамічних багатомірних об'єктів у реальному темпі часу їх функціонування при неповному вимірюванні вектору вихідних величин.

2. В класі задач оптимізації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К вирішено такі задачі:

- розроблено методологію адаптивно-пошукового підходу вирішення задач пошуку екстремуму критерію ефективності;

- доказано збіжність запропонованого адаптивного методу пошуку екстремуму;

- запропоновано методики і сконструйовано алгоритми багатомірного пошуку, в тому числі глобального, що важливо при вирішенні нестационарних задач оптимізації і ідентифікації в АСУ ТП і АСВ і К;

- теоретично обосновано методику сполучення детермінованої стохастичної складових пошукового керування;

- розроблено алгоритм адаптації параметрів граничного циклу пошуку.

3. В класі задач ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К:

- розроблено методи і алгоритми адаптивно-пошукової ідентифікації об'єктів АСУ ТП і АСВ і К, засновані на адаптивному методі прямого пошуку екстремуму;

- сконструйовано і досліджено алгоритм пошукової адаптації, доказано його збіжність;

- запропоновано ряд алгоритмів розділення каналів настройки з обґрунтуванням їх ефективності методами спектрального і кореляційного аналізу;

- для класу нестационарних, в тому числі істотно нестационарних об'єктів розроблено багатомодельні методи і алгоритми пошукової ідентифікації динамічних об'єктів АСУ ТП і АСВ і К;

- доказано збіжність запропонованих адаптивно-пошукових алгоритмів з бінарною і синергійною стратегіями настройки коефіцієнтів моделей ідентифікованих багатомірних систем;

- розроблено програмне забезпечення у вигляді пакету прикладних програм з розвиненим сервісом, об'єктно-орієнтованою графікою, в тому числі і трьохмірною, основні змоги якого ілюструється програмами демонстраційної дискети, яку прикладено.

Алгоритми достатньо прості і можуть бути реалізовані в ПЗУ і ППЗУ мікроконтролерів цифрових систем керування технологічними процесами і виконувачими пристроями систем випробування і контролю, що дозволяє оптимізувати керування і при необхідності ідентифікувати і відслідковувати зміни нестационарних параметрів об'єктів АСУ ТП і АСВ і К у темпі реального часу їх функціонування.

Основні результати дисертації опубліковано у наступних роботах:

1. А. с. 746413 СССР МКИ<sup>2</sup> G 05 B 13/02. Идентификатор нестационарных объектов / М. М. Иващенко, Л. Ф. Иванов, А. И. Михалев. - Оpubл. 07.07.80, Бвл. 25.

2. А. с. 1028550 СССР МКИ<sup>3</sup> B 62 d 57/02. Шагающее устройство / Л. Ф. Иванов, А. И. Михалев. - Оpubл. 15.07.83, Бвл. N26.

3. А. с. 1215086 СССР МКИ<sup>3</sup> G 05 B 13/02. Идентификатор многомерных объектов / Л. Ф. Иванов, А. И. Михалев, Г. Г. Швачич и др. -

Опубл. 28.02.86, Бюл. №8.

4. А. с. 1173392 СССР МКИ<sup>4</sup> G 05 B 13/02. Двухканальная система экстремального регулирования/ Л.Ф. Иванов, А.И. Михалев, Г.Г. Швачич и др. - Опубл. 15.08.85, Бюл. №30.

5. А. с. 1049865 СССР МКИ<sup>3</sup> G 05 B 13/02. Устройство экстремального регулирования/ Л. Ф. Иванов, А.И. Михалев, Г.Г. Левенец, Г.Г. Швачич и др. - Опубл. 23.10.83, Бюл. N 39.

6. А. с. 1227420 СССР, МКИ<sup>4</sup> B 23 Q 15/00. Устройство для обработки лещадки доменной печи/ А.И. Михалев, А.Н. Дук, Э.П. Бобриков и др. - Опубл. 30.04.86, Бюл. N 16.

7. Король Л.В., Михалев А. И. Алгоритм идентификации нестационарного объекта// Исследования по современным проблемам суммирования и приближения функций и их приложениям: Сб. научн. трудов. - Днепропетровск: Днепропетровский государственный университет, 1976. - С. 125-129.

8. Михалев А. И. Система поисковой идентификации с замкнутым контуром управления// Приборы и устройства электротехники и электроники: Сб. научн. тр. - Днепропетровск: Днепропетровский государственный университет, - 1978. - С. 56-59.

9. Иващенко М.М., Михалев А. И. Поисковый метод активной идентификации нестационарных систем // Тез. II Всесоюз. симпозиума "Теория нестационарных систем управления". - Севастополь: СПИ, 1979. - С. 149-152.

10. Иващенко М.М., Михалев А. И. Активный метод поисковой идентификации многопараметрического объекта с неполной наблюдательностью// Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межведомств. сб. науч.-техн. сб. -1980. - Вып. 8. - С. 21-33.

11. Алгоритмы взаимосвязанных движений видеонализаторов двухглазого робота/ Э.П. Бобриков, А.И. Михалев, Л.В. Король и др.//

Тез. докл. II Всесоюз. межвуз. науч. техн. конф. "Робототехнические системы". - Кн. I. - Киев: КПИ, 1980. - С. 109-113.

12. Ивахненко М.М., Михалев А. И. Исследование адаптивных систем с перекрестными связями // Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1981. - Вып. 9. - С. 14-20.

13. Ивахненко М.М., Михалев А. И. Поисковый метод активной идентификации систем с перекрестными связями // Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб.-1981.-Вып.9.- С. 61-76.

14. Ивахненко М.М., Михалев А. И. Адаптивная идентификация начальных условий многомерных динамических систем // Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб.-1982.-Вып.10.-С. 15-20.

15. Ивахненко М.М., Михалев А. И., Тихонов В.Л. Активная идентификация робототехнических систем // Идентификация, автоматический контроль и моделирование сложных процессов и объектов управления: Сб. науч. тр. - Днепропетровск: ДГУ, 1983. - С. 36-41.

16. Бобриков Э. П., Михалев А. И., Швачич Г.Г. Исследование адаптивных алгоритмов управления систем программного движения // Тез. докл. Всесоюз. науч. - техн. конф. "Адаптивные роботы 82". - Нальчик: Кабард.-Балкар. госуниверситет, 1982, - С. 180-181.

17. Иванов Л.Ф., Михалев А.И. Адаптация алгоритмов движения двухопорного шагающего робота // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Адаптивные роботы 82" - Нальчик: Кабард.- Балкар. госуниверситет, 1982, - С. 190 - 191.

18. Роботизированные технологические комплексы в металлургии/ Э.П. Бобриков, Е.В. Зайцева, А. И. Михалев // Глава 9 в кн. "Робототехника" под ред. Е.П. Полова.-М.: Машиностроение, 1984.- С. 244-264.

19. Ивахненко М.М., Король Л.В., Михалев А.И. Адаптивный метод прямого поиска экстремума функции // Адаптив. сист. автомат. упр.:

Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1983. - Вып. II. - С. 16-25.

20. Иванов Л.Ф., Михалев А. И. Адаптивный алгоритм управления движением шагающего робота // Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. научн. техн. сб. - 1983. - Вып. II. - С. 75-81.

21. Михалев А.И., Иванов Л.Ф., Швачич Г.Г. Исследование адаптивных алгоритмов управления с эталонной моделью // Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1984. - Вып. I2. - С. 36-41.

22. Система адаптивно-поисковой идентификации с использованием цифровой настраиваемой модели / В.П. Малайчук, Г.Г. Швачич, А.И. Михалев и др. // Идентификация, автоматический контроль и моделирование сложных процессов и объектов управления: Сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДТУ, 1985. - С. 3-10.

23. Автоматизация процесса определения динамических характеристик средств измерения / А.И. Михалев, Л.Ф. Иванов, Г.Г. Швачич и др. // Приборы и методы автоматизации экспериментальных исследований: Сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДТУ, 1985. - С. 26-29.

24. Идентификация измерительных усилителей / А.И. Михалев, Г.Г. Швачич, Н.Н. Карабутов и др. // Тез. докл. IV Всесоюз. Симпозиума "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и метрологии" - Новосибирск: Сибирский государственный науч.-исслед. институт метрологии, 1985. - С. 140-141.

25. Рандомизированная стратегия настройки в задаче адаптивно-поисковой идентификации нестационарных систем / А.И. Михалев, Л.Ф. Иванов, Г.Г. Швачич и др. // Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1984. - Вып. I4. - С. 73-79.

26. Михалев А.И., Карабутов Н.Н., Швачич Г.Г. Идентификация существенно-нестационарных систем // Тез. докл. V Всесоюз. симпозиума "Методы теории идентификации в задачах измерительной техники и

метрологии". - Новосибирск: Сибирский государственный науч.-исслед. институт метрологии, 1989. - С. 100-101.

27. Михалев А.И., Барвинов В.П., Соломаха В.А. Управляемость пространственных механизмов с избыточным числом степеней свободы с другими связями.- Киев, 1989.- 22 с.- Деп.в УкрНИИТИ 15.12.89, N 2989 - Ук 89.

28. Математическое моделирование процесса двухрядной холодной прокатки труб/Попов М.В., Дубоссарский А.Б., Михалев А.И. и др.- М.- 1990. - 14 с. - Деп. в ВИНТИ 20.03.1990, N5420.

29. Исследование управляемости объектов в эластичных объемных шарнирах/ А.И. Михалев, В.П. Барвинов, И.И. Бондаренко и др. - М.- 1990.- 21 с.- Деп.в ЦНТИ "Поиск", ПГО, вып.9, N035-4733.

30. Исследование динамики испытательных стендов объемных шарниров/ А.И. Михалев, Н.Н. Карабутов, В.П. Барвинов и др./Тез. докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф."Микропроцессорные системы автоматизации". - Новосибирск; НЭТИ, 1990. - С. 112-114.

31. Михалев А.И., Пивачич Г.Г., Барвинов В.П. Моделирование динамики испытательных стендов эластичных шарниров/ Тез. докл. I-го Всесоюз.совещания "Математическое моделирование в машиностроении" - Куйбышев; КАИ, 1990.- С. 22-24.

32. Михалев А.И. Идентификация динамических систем с быстроизменяющимися параметрами// Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед.науч.-техн. сб. - 1991. - Вып.19. - С. 3-7.

33. Карабутов И.Н., Михалев А.И. Синтез адаптивных идентификаторов состояния нестационарных динамических систем// Адаптив. сист. автомат.упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- 1991.- Вып. 19. - С. 26-34.

34. Михалев А.И. Алгоритм поисковой идентификации с синергиро-

важными моделями существенно нестационарных систем // Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1992. - Вып.20. - С. - 35-40.

35. Михалев А.И., Швачич Г.Г. "Исследование процесса настройки адаптивных моделей поисковых идентификаторов нестационарных систем// Адаптив. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1992. - Вып.20. - С. - 26-33.

36. Михалев А.И., Король Л.В. Адаптация параметров предельного цикла в экстремальных системах контроля и управления /Тез. докл. конф. "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" - Туапсе (ХИРЭ), 14-20 сент.1992 г. - Сб. аннотаций. - С. II.

37. Михалев А.И., Швачич Г.Г. Алгоритм поисковой идентификации существенно нестационарных динамических систем /Тез. докл. конф. "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" - Туапсе (ХИРЭ), 14-20 сент.1992 г. - Сб. аннотаций. - С. II.

38. Михалев А.И. Метод адаптивно-поисковой идентификации существенно нестационарных динамических систем /Тез. докл. науч.-техн. конф. "Контроль и управление в технических системах" - Винница: ВПИ, 8-10 сент. 1992 г. - С. 12-13.

39. Михалев А.И. Адаптивно-поисковые методы и алгоритмы оптимизации и идентификации динамических систем: Учебное пособие. - Киев: УМК ВО, 1992. - 68 с.

*А.И. Михалев*

Підписано до друку 29.06.1993.  
формат 60x84/16. Папір друк № 2. Друк офсетний.  
Фіз. друк, арк. 2,5. Облік.-вид. арк. 2,35. Умов. друк. арк. 2,32.  
Тираж 100 пр. Замовлення 420. Безкоштовно.

Дніпропетровський металургійний інститут,  
320635, Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4

ДЗ ДМетІ, Лозманське шосе, 3-б.

№ 28.100  
**АВ 28.100**

БЕЗКОШТОВНО