

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"Київський політехнічний інститут"

На правах рукопису  
УДК 681.5

Батієнко Людмила Юріївна

РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ  
НЕЛІНІЙНИМИ СИСТЕМАМИ З ЧАСОВИМ ЗАПІЗНЕННЯМ

05.13.03 "Системи і процеси керування"

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

Київ - 1997

281.5



00751850 (Q)

Дисерта  
Роботу виконано

методів системного аналізу

Національного технічного університету України "КПІ"

Науковий керівник: Академік НАН України, доктор  
технічних наук, професор  
Згуровський М.З.

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор  
Сільвестров А.М.  
Кандидат технічних наук, доцент  
Положаєнко С.М.

Провідна установа: Харківський технічний університет радіоелектроніки

Захист відбудеться " 31 " березня 1997 р. о 15 годині на  
засіданні спеціалізованої ради Д 01.02.08 в Національному технічному  
університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 252056,  
м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. 14, ауд. 56.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці НТУУ "КПІ"

Автореферат розісланий " 19 " лютого 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 01.02.08  
доктор технічних наук,  
професор

В.Д. Романенко

AB - 37.009

## АНОТАЦІЯ

Мета дисертаційної роботи - розвинути та оцінити стратегію нелінійного адаптивного керування, яка може бути пристосована для широкого класу процесів, включаючи й процеси з часовим запізненням, і дозволяє здійснювати керування та ідентифікацію параметрів об'єкту з максимальним урахуванням специфіки його нелінійностей при малій кількості параметрів, що оцінюються, на підставі гнучкого квадратичного критерію якості за умов відносно невеликих обчислюваних витрат, а також дозволяє здійснювати ефективне керування з самонастроюванням у режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- виконання аналізу існуючих методів та підходів для побудови нелінійних регуляторів з самонастроюванням (РСН), як для одновимірної, так і для багатовимірної систем;

- побудова нелінійного РСН для одновимірного випадку залежно від величини часового запізнення в системі, на базі узагальненої нелінійної дискретної моделі типу вхід-вихід у вигляді рівнянь авторегресії з ковзним середнім;

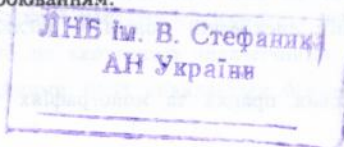
- розроблення алгоритмів багатовимірних РСН залежно від вигляду нелінійних функцій (умовно названі новий та модифікований), які дозволяють різну кількість входів та виходів, а також різний час запізнення між кожною парою вхід-вихід, що зумовлює різний запис нелінійних функцій, які характеризують модель об'єкту;

- вирішення задачі параметричної ідентифікації алгоритму адаптації за умов досягнення цілі адаптації для одновимірної та багатовимірної систем;

- складання оптимізаційної процедури побудови законів керування одновимірними та багатовимірними процесами на базі мінімізації енергії керування, які функціонують під впливом некеруємих зовнішніх збурень.

- визначення параметрів алгоритму адаптації за умов асимптотичної збіжності до нуля помилки вихідного сигналу багатовимірної детермінованої системи та досягнення цілі адаптації;

- розробка узагальнюючого алгоритмічного та програмного забезпечення, що дозволяє оперативнo здійснювати ефективне керування складними нелінійними процесами з самонастроюванням.



На захист виносяться

1. Вирішення задачі побудови нової конструкції нелінійного одновимірного регулятора з самонастроюванням на базі запропонованого виду запису діофантового рівняння залежно від величини часового запізнення в системі та розроблене для неї алгоритмічне програмне забезпечення.
2. Розроблені алгоритми двох конструкцій нелінійних багатовимірних РСН з урахуванням запропонованих видів побудов діофантових рівнянь за умов різних величин часового запізнення та вирішення практичної проблеми машинної реалізації багатовимірних РСН.
3. Процедура побудови законів керування класу об'єктів, що розглядаються, на основі мінімізації запропонованого критерію якості.
4. Вирішення задачі адаптивного керування багатовимірними нелінійними об'єктами з різною кількістю входів та виходів, а також різним часовим запізненням між кожною парою вхід-вихід.
5. Математичне доведення збіжності вихідної координати керованого детермінованого процесу до заданого діяння для розробленого нового нелінійного багатовимірного РСН.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Лінійне керування суттєво нелінійними системами, коли стратегія керування будується на основі лінеаризації нелінійної моделі, або системами, для яких характерні великі зовнішні збурення, майже завжди виявляється задовільним в оптимальному значенні. Навіть коли в таких системах з успіхом вирішуються проблеми поточних точок нелінійностей, проте вони (системи) не є адекватними для деяких типів нелінійностей тому, що ігнорується наявна інформація про їх природу. Така ситуація спонукає споживача звертатися до більш реалістичних нелінійних моделей при бажаній схемі керування. На сьогоднішній день практично відсутні методи, алгоритмічне та програмне забезпечення для вирішення задачі керування промисловими процесами з нелінійною складною динамікою з часовим запізненням на базі нелінійного адаптивного керування, побудованого на узагальненій дискретній моделі у вигляді рівнянь авторегресії з ковзним середнім.

У наукових працях та монографіях таких учених як Кунцевич В.М.,

Александров О.Г., Ципкін Я.З., Острем К., Изерман Р. і багатьох інших достатньо повно відображені теоретичні основи по адаптивному керуванню складними процесами та практичне застосування запропонованих ними методів.

При всій різноманітності методів адаптивного керування управління з самонастроюванням є найбільш ефективним, надійним та гнучким методом керування (РСН працюють за будь-яких умов, у тому числі за умов збурень, що не вимірюються). Тому всебічний розгляд існуючих методів адаптивного керування, вивчення можливостей побудови не громіздких регуляторів, які дозволяють урахувати наявність різних типів відомих нелінійних функцій у алгоритмах керування, а також забезпечувати гнучкість та надійність роботи для процесів з великим часовим запізненням, дозволив автору зупинитися на управлінні з самонастроюванням. До того ж теорія регулятора з самонастроюванням, що базується на узагальненій нелінійній моделі, яку б можна було використовувати для широкого класу нелінійних процесів, за наш час не набула великого розвитку.

На кафедрі ММСА НТУУ "КПІ" був накопичений певний теоретичний матеріал у вирішенні проблеми побудови стратегії керування суттєво нелінійними об'єктами з використанням узагальнюючої дискретної моделі, яку вивчав професор Романенко В.Д.

Методи дослідження. В роботі використовувались методи та підходи, що будуються на максимальному використанні наявної інформації про нелінійності керованих систем із збереженням загальності та гнучкості, що притаманні апарату лінійного адаптивного керування, який за наш час набув широкого розвитку.

Наукова новизна роботи визначається низкою отриманих автором та наведених у роботі результатів:

- Розроблені схеми побудови одного одновимірного та двох багатовимірних РСН на базі узагальненої дискретної нелінійної моделі типу вхід-вихід, що будуються із застосуванням запропонованих видів записів діофантових рівнянь залежно від величин часового запізнення в системі та вирішення практичної проблеми машинної реалізації наведених алгоритмів регуляторів. В порівнянні з відомими підходами по керуванню аналогічними об'єктами встановлено, що управління нелінійними РСН виявляється більш якісним.

Так перегулювання в системі зменшується у 2-3 рази, тривалість перехідного процесу скорочується у 2-4 рази, наявність у ланцюгу керування таких регуляторів дозволяє здобути менших коливань вихідних та вхідних векторів.

- Вирішена задача адаптивного керування багатовимірними нелінійними об'єктами з різною кількістю входів та виходів, а також різним часовим запізненням між кожною парою вхід-вихід. Алгоритми прості у використанні і не вимагають високих витрат при чисельному моделюванні за рахунок скорочення довжини вектору параметрів в моделі об'єкту та кількості скидань матриці коваріації у алгоритмі оцінювання параметрів по РМНК.

- Розроблено оптимізаційну процедуру побудови законів керування розглянутого класу процесів, що базуються на запропонованих критеріях якості. Багатовимірні модифіковані РСН дозволяють різні штрафи на різні вихідні координати та швидкості змінювання вихідних змінних.

- Математично доведено збіжність до нуля помилки вихідного сигналу системи для нелінійного багатовимірного РСН для детермінованої системи.

Практична цінність роботи полягає в розробці методів, необхідних для створення математичного та програмного забезпечення по визначенню нових стратегій керування суттєво нелінійними промисловими процесами на базі одновимірних та багатовимірних нелінійних РСН, що дозволяють в режимі реального часу здійснювати ефективне керування для широкого класу нелінійних моделей з часовим запізненням за умов різної кількості вхідних та вихідних змінних та різного часу запізнення між кожною парою вхід-вихід.

Реалізація результатів роботи. Роботу виконано на кафедрі математичних методів системного аналізу НТУУ "КПІ". Отримані результати використано при створенні програмних модулів пакету "Дослідження та аналіз особливостей систем цифрового керування суттєво нелінійними об'єктами з часовим запізненням", які були впроваджені на базі КБ інформаційних систем НТУУ "КПІ" при реалізації держбюджетної НДР по темі "Розробка алгоритмів і методик адаптації модулів системи САТІА по створенню нових комп'ютерних технологій в машинобудуванні" при розробці модуля "Проектування елементів та типів роботів у системі САТІА" під час проектування механізмів вузлів зварювальних роботів, що дозволило значно (на 10-15%) скоротити час проектування та підвищити якість

прилаштовуваності деталей, що розроблюються, до реальних умов експлуатації. Матеріали дисертаційної роботи були використані в учбовому процесі кафедри ММСА в курсі "Теорія керування", як інструмент навчання студентів принципам побудови якісних моделей складних систем та особливостям синтезу цифрових регуляторів по керуванню нелінійними об'єктами.

**Апробація роботи.** Наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідались на Всесоюзній конференції "Розробка та впровадження АСУ в практичному виробництві" (Кривий Ріг, 1983 р.), Всесоюзному науково-технічному семінарі "Алгоритмічне, програмне та технічне забезпечення АСУ ТП на базі ЕОМ" (Таганрог, 1983 р.), III Всесоюзній конференції "Програмне, алгоритмічне та технічне забезпечення АСУ ТП" (Ташкент, 1985 р.), Всесоюзній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми моделювання та керування системами з розподіленими параметрами" (Київ, 1987 р.), Другій науково-технічній конференції радянських та польських молодих вчених - випускників ВУЗів СРСР (Київ, 1987 р.), III Українській конференції з автоматичного керування "Автоматика 96" (Севастополь, 1996 р.), Семінарі Інституту кібернетики НАН України "Ідентифікація та керування об'єктами з розподіленими параметрами" (Київ, 1995-1996 р.).

**Публікації.** Дисертант є автором 22 наукових праць. Матеріали, що складають основу дисертації, опубліковано у 12 роботах.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, заключення, списку літератури і додатків. Загальний обсяг роботи 212 сторінок машинописного тексту, в тому числі рис. 61, таб. 7, список літератури із 101 найменування.

У вступі обґрунтовується актуальність проблеми, формулюється мета роботи, основні задачі дослідження, положення, що виносяться на захист, наукова новизна і практична цінність роботи.

У першій главі проаналізовані основні напрямки розвитку алгоритмів та методів адаптивного керування, розглянута еволюція розвитку керування нелінійними процесами на базі нелінійних регуляторів з самонастроюванням, формулюються принципи вибору виду моделі, необхідної для побудови стратегії управління складними промисловими процесами, з урахуванням її узагальнюючого характеру.

У другій главі викладені питання проектування нового одновимірного РСН, з використанням нової конструкції діофантового рівняння, що використовується при побудові моделі передбачення, за умов мінімізації енергетичного критерію якості; питання розробки двох конструкцій багатовимірних РСН (нового та модифікованого), які обираються залежно від величини запізнення і як результат різних записів діофантових рівнянь; питання визначення цілі та алгоритму керування та алгоритму адаптації за умов досягнення цілі управління одновимірними та багатовимірними процесами на базі нового РСН; наводяться приклади моделювання реальних об'єктів, що керуються запропонованими регуляторами.

У третій главі доведена збіжність вихідної координати нового багатовимірного РСН для детермінованого процесу до заданого діяння, розкриті питання побудови багатовимірного модифікованого РСН в термінах адаптивного керування, наведений алгоритм чисельного моделювання системи керування новим багатовимірним РСН дистиляційною колоною з двома входами та двома виходами.

У четвертій главі наведено деталізоване експериментальне оцінювання роботи модифікованого нелінійного РСН для керування дистиляційною колоною заводського типу з одним входом та одним виходом з паралельним уточненням особливостей та можливостей регулятора залежно від умов функціонування.

У додатках приведені акти впровадження та додатковий матеріал для окремих глав.

## ЗМІСТ РОБОТИ

Розглядається нелінійний процес, збурений рух якого можна описати за допомогою узагальненої нелінійної дискретної моделі типу вхід-вихід у вигляді рівнянь авторегресії з ковзним середнім:

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1})y(t) &= \sum_{i=1}^N K(z^{-1})[B_i u^{(i)}(t) Y_i(t) + d + C(z^{-1})\xi(t)] \\ Y_i(t) &= g_i [y_q(t + k_q - j), j = 0, 1, 2, \dots, q = 1, 2, \dots, n; \\ &u_p(t - h), h = 1, 2, 3, \dots, p = 1, 2, \dots, m], i = 1, 2, \dots, N \\ u^{(i)}(t) &= [u_1^i(t), u_2^i(t), \dots, u_m^i(t)]^T, i = 1, 2, \dots, N \\ K(z^{-1}) &= \text{diag} \{ z^{-k_1}, z^{-k_2}, \dots, z^{-k_n} \} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $t$  - дискретний момент часу,  $t=1,2,3,\dots; N$ ,  $r_i$  - відомі сталі ( $r_i \geq 0$ );  $y \in \mathbb{R}^n$  - вихід, що вимірюється;  $u \in \mathbb{R}^m$  - керуючий вхід;  $d \in \mathbb{R}^n$  - невідоме збурення;  $\{\xi(t)\}$ ,  $\xi \in \mathbb{R}^n$ , - послідовність однаково розподілених випадкових векторів із нульовим середнім, кожний із яких не залежить від значень входів та виходів у попередні моменти часу;  $g_i$ ,  $i=1,2,\dots,N$  - відомі стаціонарні функції з відомими параметрами,  $k_q=1,2,\dots,n$  - відоме мінімальне запізнення між усіма входами та  $q$ -им виходом.

$$k_q = \min[k_{qp}, p = 1, 2, \dots, m] \geq 1, q = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

де  $k_{qp}$  - запізнення між  $q$ -им виходом і  $p$ -им входом,  $z^{-1}$  - оператор зворотнього зсуву;  $B_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$  - матриці  $n \times m$ ,  $A$  і  $C$  - поліноміальні матриці  $n \times n$ , виду:

$$A(z^{-1}) = I + A_1 z^{-1} + \dots + A_n z^{-n}, \quad (3)$$

$$C(z^{-1}) = I + C_1 z^{-1} + \dots + C_n z^{-n}, \quad (4)$$

при цьому припускається, що усі корні  $\det C(z^{-1})$  знаходяться всередині круга одиничного радіуса на  $z$  - площині.

Залежно від величини запізнення у системі нелінійні функції  $Y_i(t)$  можуть не залежати від  $y(t-j)$ ,  $j=1,\dots,k-1$ , тоді модель охоплює менший клас об'єктів, у протилежному випадку функції  $Y_i(t)$  - можуть залежати від  $y(t-j)$ ,  $j=1,\dots,k-1$  - розглядається більш широкий клас процесів, у тому числі й об'єкти з великим часом запізнення.

Регулятор з самонастроюванням будується на основі моделі (1), алгоритм якого використовує значення вихідної координати  $y$ , яке прогнозується на  $k$  періодів квантування вперед.

В термінах адаптивного керування по спостереженнях входу та виходу, а також заданому діянню, безпосередньо визначаються параметри регулятора. Знайдені параметри наближаються до оптимальних значень, при яких квадратичний функціонал, який характеризує якість автоматичної системи, приймає мінімальне значення. Мірою відхилення вихідної змінної у приймається критерій:

$$J = M\{\|P'(z^{-1})y(t+k) + P''(z^{-1})\Delta y(t+k) - R(z^{-1})w(t)\|^2 + \|Q'(z^{-1})u(t)\|^2\} \quad (5)$$

де:

$$\Delta y(t) = y(t) - y(t-1), \quad (6)$$

при цьому зауважимо, що  $\|v\|^2 = v^T v$ , де  $v$  - вираз під знаком  $\| \bullet \|^2$ ;  $M$  -

оператор математичного сподівання відносно  $t$ ;  $w \in \mathbb{R}^n$  - задавальне діяння,  $R$  та  $Q$  - діагональні раціональні матриці передаточних функцій  $p_x$  і  $m_x$ , відповідно;  $P'$  і  $P''$  - поліноми виду:

$$P'(z^{-1}) = 1 + P_1' z^{-1} + \dots + P_{n_p}' z^{-n_p} \quad (7)$$

$$P''(z^{-1}) = P_0'' + P_1'' z^{-1} + \dots + P_{n_p}'' z^{-n_p} \quad (8)$$

Поліноми  $P', P''$  можуть бути об'єднані таким чином, що критерій (5) буде мати вигляд:

$$J = M\{|P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t)|^2 + |Q(z^{-1})u(t)|^2\}, \quad (9)$$

де поліном  $P$  записується як:

$$P(z^{-1}) = P_0 + P_1 z^{-1} + \dots + P_{n_p} z^{-n_p} \quad (10)$$

Для синтезу моделі передбачення вихідної змінної одновимірної моделі пропонується такий запис діофантового рівняння:

$$C(z^{-1})P(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-k}F(z^{-1}), \quad (11)$$

де  $C(z^{-1})$ ,  $A(z^{-1})$ ,  $E(z^{-1})$ ,  $F(z^{-1})$  - поліноми:

$$E(z^{-1}) = 1 + e_1 z^{-1} + \dots + e_{k-1} z^{-(k-1)} \quad (12)$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + \dots + f_{n_F} z^{-n_F} \quad (13)$$

$$n_F = \max(n_A - 1, n_C + n_p - k). \quad (14)$$

Для багатовимірного випадку при побудові нового РСН діофантове рівняння має вигляд:

$$C(z^{-1})P(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + K(z^{-1})F(z^{-1}), \quad (15)$$

де  $E$  і  $F$  поліноміальні матриці виду

$$E(z^{-1}) = P_0 I + [e_1(z^{-1}), e_2(z^{-1}), \dots, e_n(z^{-1})]^T \quad (16)$$

$$F(z^{-1}) = [f_1(z^{-1}), f_2(z^{-1}), \dots, f_n(z^{-1})]^T, \quad (17)$$

а  $e_i(z^{-1})$  і  $f_i(z^{-1})$  вектори-стовбці:

$$\left. \begin{aligned} e_i(z^{-1}) &= e_{i,1} z^{-1} + e_{i,2} z^{-2} + \dots + e_{i,k_i-1} z^{-(k_i-1)} \\ f_i(z^{-1}) &= f_{i,0} + f_{i,1} z^{-1} + \dots + f_{i,n_{f_i}} z^{-n_{f_i}} \\ n_{f_i} &= \max(n_A + k_{\max} - 1, n_C + n_p) - k_i \\ k_{\max} &= \max_i(k_i) \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

Коли запізнення в системі значне, змінюється вигляд нелінійної функції  $Y_i(t)$ , а також вигляд моделі передбачення. Діагональна поліноміальна матриця  $F(z^{-1})$  у рівнянні (15) записується як:

$$F(z^{-1}) = z[C(z^{-1})P(z^{-1}) - P_0]. \quad (19)$$

а у критеріях (5) та (9) використовуються не поліноми  $P, P^*, P^*$ , а діагональні поліноміальні матриці пхп. За таких умов будується модифікований регулятор.

При проектуванні регуляторів за критеріями (5) або (9) крім алгоритмів передбачень значень керованих вихідних змінних на  $k$  періодів квантування вперед для одновимірних та багатовимірних систем, також розроблені оптимальні структури регуляторів (закони керування), алгоритми автоматичного настроювання його параметрів по методу РМНК з фактором забування. Залежно від системи та виду нелінійної функції, в роботі окремо для кожного з регуляторів (нового та модифікованого) розроблені та представлені вище згадані алгоритми. Як приклад нижче наводяться закон керування і модель передбачення з алгоритмом настроювання параметрів для нового багатовимірного РСН:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^N [\bar{G}_i(t) u^{(\eta)}(t) Y_i(t)] + \eta \\ & + [\mathbb{I} - \bar{H}(z^{-1})] \left[ \sum_{i=1}^N [\bar{G}_i(0) r_i u^{(\eta-1)}(t) Y_i(t)] \right]^T \Gamma^{-1} Q(z^{-1}) u(t) = 0 \\ & \eta = \bar{F}(z^{-1}) y(t) + \sum_{i=1}^N [\bar{G}_i(z^{-1}) - \bar{G}_i(0)] [u^{(\eta)}(t) Y_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^N \bar{G}_i(z^{-1}) [u^{(\eta)}(t) Y_i(t)] + \delta - [\mathbb{I} - \bar{H}(z^{-1})] R(z^{-1}) w(t) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$P(z^{-1}) y(t) = K(z^{-1}) \bar{F}(z^{-1}) y(t) + \sum_{i=1}^N K(z^{-1}) \bar{G}_i(z^{-1}) u^{(\eta)}(t) Y_i(t) + \delta + K(z^{-1}) \bar{H}(z^{-1}) [P(z^{-1}) y^*(t+k|t)] + z(t) \quad (21)$$

де:

$$\left. \begin{aligned} \bar{G}_i(z^{-1}) &= \bar{E}(z^{-1})B_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \bar{H}(z^{-1}) &= [I - \bar{C}(z^{-1})] \\ \delta &= K(z^{-1})\bar{E}(z^{-1})K^{-1}(z^{-1})d = \bar{E}(1)d \\ \varepsilon(t) &= E(z^{-1})\xi(t) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

де  $\bar{F}(z^{-1})$ ,  $\bar{G}_i(z^{-1})$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $\bar{H}(z^{-1})$  і  $\delta$  - параметри, що оцінюються,  $\mathbf{U}^{(\eta-1)}$  - діагональна матриця з елементами  $u_1^{(\eta-1)}, u_2^{(\eta-1)}, \dots, u_m^{(\eta-1)}$  на діагоналі.

В дисертації доведена збіжність вихідної змінної керованого об'єкту до задавального діяння для такого регулятора для детермінованого процесу з дотриманням припущень:

Припущення 1. (П1) Немає штрафу на керуючу дію:

$$Q(z^{-1}) = 0 \quad (23)$$

Припущення 2. (П2) Існують невід'ємні скінченні константи  $k_1$  та  $k_2$  такі, що:

$$\|u^{(\eta)}(t)Y_1(t)\| \leq k_1 + k_2 \max_{0 \leq \tau \leq t} \|y(\tau)\|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

Припущення 3. (П3) Поліном  $P(z^{-1})$  - стійкий, тобто:

$$P(z^{-1}) \neq 0 \quad \text{для} \quad |z| \geq 1 \quad (25)$$

Відсутність штрафу на керуюче діяння у критерію якості, що вимагається у припущенні П1, компенсується обмеженням на керуюче діяння, яке введене у припущення П2 (використовується підхід аналогічний підходу Ядстая під час дослідження збіжності замкненого контуру керування лінійного мінімальнофазового об'єкту, що управляється не по вхідному штрафу, а вихідному, що задається стійким поліномом  $P(z^{-1})$ , який відповідає зворотньому елементу бажаної передаточної функції замкненого контуру). У більшості практично актуальних випадків обмеження, що задається П2, може бути перенесено у квадратичний критерій керування шляхом відповідного підбору  $Q'(z^{-1})$ . Необхідна якість асимптотичної збіжності до бажаної траєкторії гарантується навіть тоді, коли оцінки параметрів не збігаються зовсім, не кажучи вже про збіжність до їх справжніх значень. У роботі наведені математичні перетворення, необхідні для побудови алгоритмів замкненої оптимальної системи керування нелінійними процесами з РСН, виходячі з термінів теорії адаптивного керування, рекомендації по вибору нелінійних регуляторів, виконані доведення лем та теореми про збіжність

вихідної дії до бажаного значення, проведений докладний аналіз роботи реальних систем на базі розроблених алгоритмів з уточненням їх переваг та недоліків.

Ключовим завданням у процесі побудови методики нелінійного керування з самонастроюванням, яка представлена у дисертації, була апробація розроблених алгоритмів на різних об'єктах (механічна система, дволанковий робот-маніпулятор, управління дистиляційною колоною з двома входами та двома виходами по каналах з невеликими запізненнями та керування такою ж колоною для одновимірного випадку за умов значного запізнення у системі). Це дозволило не тільки синтезувати нові системи адаптивного керування, які базуються на узагальнених математичних моделях, закон керування для яких враховує максимально можливі умови функціонування керованої системи, але й паралельно уточнити властивості та можливості регуляторів залежно від умов (змінної уставки та навантаження на систему), при яких можуть працювати системи з розробленими регуляторами.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Запропонований новий вигляд побудови одновимірного РСН на базі узагальненої нелінійної дискретної моделі типу вхід-вихід з часовим запізненням у вигляді рівнянь авторегресії з ковзним середнім з урахуванням нового запису діофантового рівняння.

Вирішена задача адаптивного керування багатовимірними нелінійними об'єктами з різною кількістю входів і виходів та різним часовим запізненням між кожною парою вхід-вихід. Отримана оптимізаційна процедура побудови законів керування класу процесів, що розглядаються, які побудовані на основі запропонованих критеріїв якості.

Вирішена задача визначення параметрів алгоритму адаптації за вимоги асимптотичної збіжності до нуля похибки вихідного сигналу системи для нового нелінійного багатовимірного РСН.

Розроблена структура обчислювального комплексу по синтезу одновимірних та багатовимірних РСН в залежності від виду нелінійних функцій в моделі, апробація яких на реальних об'єктах доводить значне покращення якості керування системами. До того ж алгоритми прості в користуванні і не потребують високих витрат під час чисельного моделювання.

2. Залежно від конфігурації моделі пропонуються дві побудови регуляторів: новий та модифікований. Модифіковані регулятори застосовуються для більш широкого класу нелінійних моделей, які можуть включати більш пізніші нелінійні функції виходів та більш старі функції входів. Такі регулятори вимагають оцінювання меншої кількості параметрів порівняно з новим РСН. Проте новий регулятор має переваги з точки зору помилки прогнозування, яка також є помилкою оцінювання. Такий регулятор корисно використовувати для процесів, які містять великі завади, а також у яких можуть з'явитися збурення, що не вимірюються. Новий РСН гарантує збіжність до заданого стійкого стану навіть тоді, коли оцінки параметрів не мають збіжності до своїх природних значень.

3. Багатовимірні нелінійні РСН можна застосувати для процесів із різним часом запізнення по різних парах вхід-вихід (не всі ці запізнення можуть бути відомі, якщо апріорі відомий мінімальний час запізнення).

Запропоновано квадратичний критерій якості управління з самонастроюванням, який містить штрафи як на величини сигналів на вході та на відхил вихідних змінних від заданого діяння, так і на різкі зміни у вихідній змінній. Модифікований РСН дозволяє різні штрафи на різні виходи та їх прирости. Проте при синтезі такого регулятора вводиться обмеження на незалежність завад по різних каналах.

4. Використання результатів про властивості метода лінійного оцінювання, які вже існують на цей час, дозволило довести асимптотичну збіжність до нуля похибки вихідного сигналу системи для нового багатовимірного РСН для детермінованого процесу. Збіжність вихідної координати до заданого діяння гарантується навіть тоді, коли оцінки параметрів не мають збіжності до їх справжніх величин, що має істотне значення, оскільки розглядаються системи з довільним ступенем нелінійності. Такий результат досягається завдяки введенню трьох слабких припущень, що виконуються для більшості реальних об'єктів.

5. Подаються різні приклади моделювання реальних об'єктів з метою демонстрації ефективності та можливостей представлених регуляторів та наводиться аналіз їх переваг в порівнянні з лінійними РСН, звичайними ПІ-регуляторами. Розглядаються такі об'єкти керування: для одновимірної системи - керування механічною системою новим нелінійним РСН, для

багатовимірного випадку - двухпозиційне управління роботом-маніпулятором та керування дистиляційною колоною з двома входами та двома виходами на базі нового багатовимірного РСН.

6. Проведено експериментальне оцінювання роботи одновимірного модифікованого РСН при управлінні дистиляційною колоною заводського типу. При моделюванні використовувались дані тестів незамкненого контуру, які повністю характеризують нелінійний процес. Різні приклади моделювання виявили, наскільки краща реакція системи, яка керується нелінійним РСН, за умов, коли змінюються уставки та навантаження на систему, порівняно з системою з лінійним РСН. Проте для більшості навантажень, що не вимірюються, модифікований РСН дає млявий перехідний процес із-за помилки прогнозу, яка велика навіть тоді, коли помилка оцінювання мала сама по собі. Наслідком аналізу цих результатів стала зміна стратегії керування системою за умов, коли змінюються навантаження. Ця стратегія передбачає у коваріційній матриці алгоритму оцінювання по РМНК скидання тільки тієї оцінки, яка відповідає параметру  $d$  у моделі системи і тільки тоді, коли похибка оцінювання перевищує величину заданого порогу. Така процедура швидко зменшує похибку оцінювання, не потребуючи при цьому, обчислюваних витрат на оцінювання усіх інших параметрів моделі.

Програмна реалізація основних етапів досліджень, наведених у дисертації, зведена у пакет програмних засобів, окремі складові якого використовувались КБ інформаційних систем НТУУ "КПІ" при розробці модуля "Проектування елементів та типів роботів у системі САПР" під час проектування механізмів вузлів зварювальних роботів, що дозволило значно (на 10-15%) скоротити час проектування та підвищити якість прилаштуваності деталей, що розробляються, до реальних умов експлуатації; а також в учбовому процесі кафедри ММСА в курсі "Теорія керування", як інструмент навчання студентів принципам побудови якісних моделей складних систем та особливостям синтезу цифрових регуляторів по керуванню нелінійними об'єктами.

#### ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ

1. Ажогин В.В., Згуровский М.З., Браславская В.К., Батиенко Л.Ю. Автоматизированное проектирование систем оптимального управления пространственно-распределенными динамическими объектами // Алгоритмы

пространственно-распределенными динамическими объектами // Алгоритмы и программы / Информационный бюллетень ГОСФАП СССР, М., 1984, № 6. - С. 6.

Дисертант виконав необхідні математичні викладки та програмну реалізацію алгоритму оцінювання помилок при автоматизованому проектуванні залежно від вибору моделі (аналітичної або дискретної, побудованої за допомогою різницевої схеми) динамічного об'єкту багатостадійного процесу за умов оптимального керування об'єктом.

2. Батиенко Л.Ю., Коваленко И.И. Методы и средства снижения размерности данных (подход, основанный на расщеплении смесей вероятностных распределений). // В сб. Перспективные средства информационного и программного обеспечения в сложных системах. - Киев, ИК НАН Украины, 1992, 31-39 с.

Запропонована структурна схема та умови функціонування алгоритму по зниженню вимірності даних, які необхідні при побудові авторегресійних моделей.

3. Згуровский М.З., Батиенко Л.Ю. (Фомичева Л.Ю.), Селин А.Н., Моргун В.А., Руденко С.С., Шинкарева С.А., Покровский В.Е., Раппопорт С.А. Программное обеспечение системы машинного управления процессами первичной подготовки нефти. / Информационный бюллетень ГОСФАП СССР, М., 1987, № 7. - С. 23.

Зроблені необхідні математичні викладки для програмного моделювання процесів первинної підготовки нафти.

4. Батиенко Л.Ю. Самонастраивающееся управление нелинейными системами с запаздыванием. В сб. III Українська конференція з автоматичного керування, Автоматика-96.: Тез. доп. - Севастополь: СевДТУ, 1996, том I. 55-56 с.

5. Батиенко Л.Ю. Принципы разработки программно-технических комплексов для моделирования статических и динамических режимов работы различных объектов с помощью специальных средств имитации. Деп. в УкрНИИНТИ, № 2419, Ук-86. - 10-с., ВИНТИ № 1(183), 6/о 1534, 1987.

6. Батиенко Л.Ю., Довгенко В.П., Моргун В.А., Шинкарева С.А. Стабилизация тепловых и массообменных процессов ректификационных колонн. Деп. в УкрНИИНТИ, № 1989, Ук-85 - 7 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1081, 1986.

Розробка методу по досягненню стабілізаційних умов у теплових режимах

процесу роздільності суміші в ректифікаційній колоні.

7. Бидюк П.И., Батиенко Л.Ю., Руденко С.С., Довгенко В.П., Шинкарева С.А. Особенности реализации алгоритмов НЦУ химико-технологическими процессами на микропроцессорах. - Деп. в УкрНИИТИ, № 1991, Ук-85 - 15 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1083, 1986.

Розробка алгоритму цифрового регулятору для визначеного класу об'єктів.

8. Довгенко В.П., Батиенко Л.Ю., Руденко С.С., Моргун В.А., Шинкарева С.А. Оптимальное управление установкой первичной подготовки нефти по экономическому критерию. Деп. в УкрНИИТИ, № 2227, Ук-85 - 20 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1342, 1986.

Запропонована структурна схема системи оптимального керування.

9. Довгенко В.П., Батиенко Л.Ю., Руденко С.С., Моргун В.А., Шинкарева С.А. Математическая модель стационарного режима моделирования процесса предварительной подготовки нефти. - Деп. в УкрНИИТИ, № 2228, Ук-85 - 14 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1343, 1986.

Запропонована методика побудови математичної моделі з урахуванням керованості процесом по економічному критерию та обмежень на змінні процесу, що контролюються.

10. Довгенко В.П., Батиенко Л.Ю., Руденко С.С., Моргун В.А., Шинкарева С.А. Разработка принципов автоматизированного синтеза иерархических структур многошаговых вычислительных комплексов. - Деп. в УкрНИИТИ, № 1993, Ук-85 - 24 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1085, 1986.

Розроблена схема оптимального керування динамічними режимами взаємозв'язаних технологічних апаратів.

11. Романенко В.Д., Батиенко Л.Ю., Довгенко В.П. Система управления процессом обезвоживания нефти в узле предварительного сброса. Деп. в УкрНИИТИ, № 1990, Ук-85 - 7 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1082, 1986.

Пошукувач дослідив взаємовплив між змінними процесу руйнування нафтових емульсій процесу обезводнювання та реалізував математичну модель для цього випадку.

12. Якимчук Н.К., Довгенко В.П., Батиенко Л.Ю., Шинкарева С.А. Математическое описание массообменного физико-химического процесса в реакторах нефтехимической промышленности. Деп. в УкрНИИТИ, № 1980, Ук-85 - 14 с., ВИНТИ № 1(171), 6/о 1072, 1986.

Дисертант запропонував методику побудови математичної моделі процесу.

## АННОТАЦИЯ

Батиенко Л. Ю.

Разработка адаптивного оптимального управления нелинейными системами с запаздыванием.

Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 "Системы и процессы управления" Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", 1997.

Защищается комплекс теоретических исследований, методик и алгоритмов построения самонастраивающихся регуляторов для достаточно широкого класса нелинейных систем с временным запаздыванием на базе дискретной нелинейной модели в виде уравнений со скользящим средним. Предлагаются два вида регуляторов, в зависимости от структуры модели (величины запаздывания): новый и модифицированный для одномерного и многомерного случаев, построение которых ведется путем оценки его параметров на основании отклика, полученного с объекта при подаче управляющего сигнала, доставляющего минимум оптимизационному критерию, в котором учтены штафы как на входную переменную, отклонение выходной переменной от задающего воздействия, так и на приращение выходной переменной. Получены новые результаты в построении диофантовых уравнений для математических моделей предсказаний, законов управления нелинейными объектами со множеством входных и выходных переменных с различным временем запаздывания по каждой паре вход-выход, в определении параметров алгоритмов адаптации при условии асимптотической сходимости к нулю ошибки выходного сигнала многомерного нелинейного СНР для детерминированного процесса.

## ABSTRACT

Batienko L. Ju.

Development of the adaptive optimal control for nonlinear systems with time delays.

Dr. Philosophy dissertation on specialty 05.13.03 "Control systems and processes" National Technical University of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", Kyiv, 1997.

In this dissertation some theoretic investigations, methodics and algorithms of self-tuning controller (STC) development, which would be applicable for the wide range of nonlinear systems with time delays based on discrete nonlinear model in the form of equation with moving average are considered. Depending on a model structure a new and modified controllers for one and multi-dimensional object cases are proposed. They are developed using parameters estimation based on control input response minimizing optimization criteria which contains penalties on input and output variables along with penalty on increment in output variable. New results were obtained in construction of Diophantine equations for mathematical model of predictions, in development of control laws for nonlinear objects with multiple inputs and outputs. The multivariable STCs allow different time delays between each input-output pair. Asymptotic convergence is proven, under fairly moderate assumptions, for the application of one of the multivariable STCs to deterministic nonlinear processes.

Ключові слова: керування адаптивне та з самонастроюванням; нелінійні моделі, критерій якості, модель передбачення, часове запізнення, асимптотична збіжність.

*Бач*

