

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

РОМАНЕНКО Віктор Демидович

УДК 681.5; 62-503.57

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО І РІЗНОТЕМПОВОГО  
ЦИФРОВОГО КЕРУВАННЯ  
БАГАТОВИМІРНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ  
З ПОДІЛЬНИМИ РУХАМИ

05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів  
і виробництв

АВТОРЕФЕРАТ ДИСЕРТАЦІЇ  
на здобуття наукового ступеня доктора  
технічних наук

Київ 1992

№ 26.899

Роботу виконано на кафедрі математичних методів системного аналізу Київського політехнічного інституту.

Офіційні опоненти: академік АН України, доктор технічних наук,

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Кунцевич В.М.;  
них наук, професор  
Б.І.;  
них наук, професор



00825923 (Т)

Сильвестров А.М.

Провідна організація - Київський інститут автоматички.

Захист відбудеться "6" квітня 1993 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої Ради по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук при Київському політехнічному інституті Д 068.14.07.

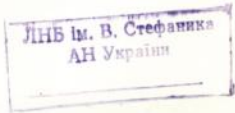
Адреса: 252056, м.Київ, пр.Перемоги, 37.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розіслано "25" листопада 1993 р.

Учений секретар спеціалізованої Ради

В.П.Зайченко



АНОТАЦІЯ

Мета роботи полягає в розробці теоретичних основ, універсальних і ефективних методів синтезу адаптивних і різнотемпових систем цифрового керування багатовимірними технологічними процесами з розділяючими рухами. Створення інженерних методик проектування різнотемпових цифрових регуляторів /РЦР/.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язано наступні завдання.

1. Розроблено класи дискретних різнотемпових моделей динаміки багатовимірних технологічних процесів у  $\rho$ -масштабах часу на основі розділення рухів відносно різної інерційності і величин запізнювань у каналах керування.

2. Розроблено методи синтезу та зроблено теоретичні узагальнення по проектуванню адаптивних і різнотемпових багатовимірних цифрових регуляторів /БЦР/ для лінійних і нелінійних об'єктів, зображених дискретними матричними моделями типу "вхід - вихід" з багатьма різними, невідомими і змінними запізненнями в каналах керування.

3. Розроблено методику паралельного синтезу складених РЦР стану у детермінованому і стохастичному середовищі.

4. Розроблено методику проектування різнотемпових спостерігачів і фільтрів для оцінки невимірюваних повільно- і швидкозмінюваних змінних стану.

5. Розроблено методику вибору періодів квантування при проектуванні різнотемпової системи керування у подвійному масштабі часу.

6. Розв'язано завдання синтезу адаптивних РЦР стану в стохастичному середовищі з почерговою оцінкою змінних стану і динамічних параметрів при різнотемповій дискретизації.

7. Розроблено алгоритми і прикладні програми для реалізації адаптивних і різнотемпових систем цифрового керування технологічними об'єктами /ректифікаційними колонами, реакторами ідеального змішування, двокопусними випарними апаратами, термозмішувальними установками і ін./.

#### АВТОР ЗАХИЩАЄ

1. Сукупність теоретичних положень і методологій проектування адаптивних і різнотемпових БЦР для об'єктів з подільними рухами, які включають:

- принципи побудови адаптивних і різнотемпових БЦР, які враховують множинні, різні, невідомі і змінні запізнення в об'єктах керування;

- методи синтезу адаптивних і різнотемпових цифрових регуляторів для багатовимірних лінійних і нелінійних об'єктів з багатьма запізненнями, представленими в різних формах;

- методи синтезу оптимальних складених різнотемпових цифрових регуляторів стану для багатовимірних технологічних процесів з подільними рухами;

- методику проектування різнотемпових спостерігачів і фільтрів для оцінки невимірюваних повільно- і швидкозмінюваних змінних стану в детермінованому і стохастичному середовищі;

- метод адаптивного керування багатовимірними стохастичними об'єктами з подільними рухами з почерговою оцінкою змінних стану і динамічних параметрів при різнотемповій дискретизації;

- алгоритми і обчислювальні схеми по синтезу складених різнотемпових і адаптивних регуляторів стану;

- методичні основи вибору періодів квантування при проектуванні різнотемпових систем керування.

2. Універсальну мікропроцесорну адаптивну систему керування двовимірними об'єктами з компенсацією різних невідомих і змінних

запізнювань об'єкта при різнометровій дискретизації. Математичне і програмне забезпечення адаптивних і різнометрових систем керування різними класами багатовимірних технологічних процесів.

#### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Складні технологічні процеси відрізняються різною інерційністю багатовимірних зв'язків і різними запізнюваннями в багатьох каналах керування. Різномасштабність швидкості при зміні різних груп фазових змінних являє собою характерну особливість математичного опису багатьох реальних динамічних систем. Ефективним засобом дослідження вказаних технологічних процесів і систем є стратегія розділення рухів у них на "повільно" і "швидко" змінні функції часу, відносно яких можна застосувати дискретизацію з різними періодами квантування.

На кафедрі математичних методів системного аналізу /ММСА/ Київського політехнічного інституту школою М.З.Згуровського розробляється науковий напрям "Створення теорії і прикладних математичних методів аналізу і керування сингулярно збуреними системами, які розвиваються в різних часових областях".

У попередніх роботах кафедри розроблено теорію багатомасштабних розкладань при розв'язанні сингулярно збурених систем еволюційних операторних рівнянь /М.З.Згуровський, М.В.Скляр/ і розроблені методи оцінювання стану і параметрів просторово розподілених нестационарних полів і процесів, які розвиваються в різних часових областях /М.З.Згуровський, В.Ф.Рамірес/.

В останній час у проектуванні цифрових систем керування одо-були бурхливий розвиток методи різнометрової дискретизації (*multirate sampling*) координат у багатовимірних системах керування. На доцільність застосування різнометрової дискретизації впливають наступні фактори.

1. У багатовимірних системах цифрового керування, які відрізняються інерційністю різних координат технологічного процесу, вигідно застосовувати дискретизацію з різними періодами квантування для значного зменшення завантаження ROM.

2. У системах керування технологічними процесами неможливо виміряти якість продукту на балансі частоті дискретизації. У цьому випадку використовується посередня інформація, наприклад, про температуру і тиск в об'єкті для оцінки складу і якості продукту або здійснюється рідкі лабораторні аналізи в дискретні моменти часу. Застосування вимірів в багатовимірній системі поряд з вимірюванням інформації в реальному масштабі часу приводить до різнометрової дискретизації вихідних координат об'єкта.

3. У багатовимірних адаптивних системах цифрового керування об'єктами багатьма різними запізнюваннями доцільно застосовувати дискретизацію координат із різними періодами квантування в каналах керування для зменшення вимірності оцінюваних параметрів.

4. Стійкість систем цифрового керування залежить від періодів квантування. Тому для збільшення запасу стійкості доцільно виконувати дискретизацію вхідних і вихідних координат із різними періодами квантування у взаємозв'язаних контурах багатовимірної системи.

Для реалізації зазначених питань необхідно розвивати загальну теорію цифрового керування, що визначає актуальність досліджень, виконаних у даній роботі.

Методи дослідження. Для розв'язання вищезазначених завдань у роботі використовуються методи проектування оптимальних цифрових регуляторів у просторі стану і методи теорії прогнозування і фільтрації; методи теорії сингулярних збурень у керуванні; методи рекурсивного оцінювання параметрів; методи синтезу цифрових регуляторів; методи теорії матриць; методи теорії випадкових

процесів; методи адаптивного керування технологічними процесами.

Наукова новизна. В руслі вищеназваного наукового напрямку кафедри ММСА КПІ виконано теоретичне узагальнення і вперше розроблено цілісну методологію проектування адаптивних і різномісних систем керування багатовимірними технологічними процесами з розділячними рухами, відповідно до якої:

- запропоновано новий спосіб різномісної дискретизації при синтезі адаптивних БЦР для багатовимірних лінійних об'єктів, представлених дискретною матричною моделлю авторегресії і ковзного середнього з детермінованим збуренням і з багатьма різними невідомими і змінними запізненнями;

- доведено теорему про збіжність адаптивної системи керування з різномісними БЦР;

- розроблено метод синтезу нелінійних адаптивних БЦР для багатовимірних нелінійних стохастичних об'єктів з багатьма різними запізненнями, який забезпечує проектування структури закону керування, не залежної від величини запізнення об'єкта;

- запропоновано паралельну стратегію синтезу складеного різномісного лінійно-квадратичного гаусівського /ЛКГ/ регулятора стану для технологічних процесів, представлених інваріантними за часом дискретними моделями у просторі стану в стохастичному середовищі;

- одержано нові результати в теорії проектування різномісних спостерігачів і фільтрів для оцінки невимірюваних повільно- і швидкозмінюваних змінних стану в детермінованому і стохастичному середовищі;

- розроблено метод синтезу різномісних комбінованих регуляторів з різномісними оцінками змінних стану технологічного процесу і випадкових збурень із "дрейфом" низької частоти;

- розв'язано теоретичну задачу розділення стохастичної

дискретної моделі об'єкта з змінними параметрами на повільно- і швидкодіючу підсистеми, в яких динаміка зміни параметрів представлена реалізацією векторного марківського процесу;

- розроблено метод роздільного взаємозв'язаного почергового оцінювання векторів змінних стану і динамічних параметрів повільно- і швидкодіючих підсистем в стохастичному середовищі при різномітній дискретизації.

Практична цінність теоретичних результатів і проведених експериментальних досліджень полягає:

- в розробці математичного і програмного забезпечення двовимірної різномітної адаптивної системи керування ректифікаційними колонами, різномітної п'ятивимірної системи керування двокопусним випарним апаратом, двовимірної адаптивної системи керування хімічним реактором ідеального змішування, двовимірної адаптивної різномітної системи керування термозмішувальною установкою;

- у створенні інженерної методики проектування різномітних цифрових регуляторів;

- у проектуванні мікропроцесорних адаптивних систем керування технологічними процесами, захищеними авторськими свідоцтвами на винаходи.

Розроблені методи різномітної дискретизації і алгоритми керування відзначаються універсальністю і ефективністю, забезпечують високу якість регулювання. Застосування різномітних МЦР для керування двокопусним випарним апаратом у порівнянні з однітмітним МЦР дозволяє зменшити витрати машинного часу в 9 разів.

Реалізація результатів роботи. Основні результати дисертації використані:

- при написанні підручника для студентів вузів України;

- при створенні адаптивної системи оптимального цифрового

керування технологічними апаратами установки Г-39/40 у складі автоматизованої системи розподіленого цифрового керування технологічними процесами парафінового виробництва на Грозненському НПЗ ПО "Грознафтооргсинтез";

- при розробці системи оптимального цифрового керування апаратами установки каталітичного риформінгу високооктанових бензинів Л 35/II-1000 на ПО "Ангарськнафтооргсинтез";

- при розробці навчальної системи по курсу "Математичні методи автоматизації прогресивних технологій" для студентів вузів України;

- у навчальному процесі на кафедрі математичних методів системного аналізу Київського політехнічного інституту.

Акти впровадження із зазначенням техніко-економічного ефекту наведені в Додатках до дисертації. Загальний економічний ефект від впровадження систем оптимального цифрового керування і програмних модулів складає 544,7 тис.крб.на рік. *(у цінах 1990р)*

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалась і обговорювались на:

- семінарі Міжнародної Федерації по автоматичному керуванню /IFAC/ "Оценка методов адаптивного управления, используемых в прикладных задачах" /м.Тбілісі, 1989/;

- ІУ міжнародній науково-технічній конференції "Проблемы комплексной автоматизации" /м.Київ, 1990/;

- І всесоюзній науково-технічній конференції "Координирующее управление в технических и природных системах" /п.Малый маяк, 1991/;

- УІ всесоюзній науково-технічній конференції "Опыт создания специального программного обеспечения АСУ ТП" /м.Чернівці, 1988/;

- У всесоюзній науково-технічній конференції "Проблемы и задачи создания и внедрения программного обеспечения АСУ ТП" /м.Чернівці, 1986/;

- III всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми розробки и виедрення математического, программного и информационного обеспечения АСУ ТП /м.Вінниця, 1982/;

- I всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми математического, программного и информационного обеспечения АСУ ТП" /м.Чернівці, 1979/;

- міжнародній школі-семінарі "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами" /м.Туапсе, 1992/;

- науково-технічній школі-семінарі "Теория и практика построения функционально ориентированных вычислительных и микропроцессорных систем обработки информации" /м.Каменець-Подільськ, 1990/;

- республіканському науковому семінарі з проблеми "Кибернетика". Секція "Идентификация и управление промышленными объектами с распределенными параметрами" /м.Київ, 1992/.

Публікації. З теми дисертації опубліковано 69 друкованих праць, серед них 2 навчальних посібники для студентів вузів, 48 статей і публікацій, 19 авторських свідоцтв на винаходи.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків, списку літератури, додатків і включає 297 сторінок основного тексту, 63 рисунків, 2 таблиць, 82 сторінок додатків.

У вступі обгрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, зроблено її загальну характеристику.

У першому розділі розглянуто стан проблеми і основні принципи керування технологічними процесами з подільними рухами на основі різнотемпової дискретизації, розроблено динамічну дискретну різнотемпову модель складної системи, яка розвивається у  $\rho$  масштабах часу. Вказано на поставлені завдання.

У другому розділі запропоновано спосіб різнотемпової дискретизації при синтезі багатовимірних адаптивних регуляторів для лінійних об'єктів з багатьма різними невідомими і змінними запізненнями. Виконано аналіз стійкості і збіжності замкнутої адаптивної різнотемпової системи керування. Виконано проектування двовимірної адаптивної системи керування відпарнов колоною на установці каталітичного риформінгу бензинів. Розроблено універсальну мікропроцесорну адаптивну різнотемпову систему керування двовимірними об'єктами з компенсацією змінних запізньвань.

У третьому розділі розроблено методи синтезу матричних поліноміальних адаптивних систем керування лінійними і нелінійними об'єктами з різними запізненнями при випадкових збуреннях. Проведено дослідження адаптивної системи керування хімічним реактором ідеального змішування.

У четвертому розділі запропоновано паралельну стратегію проектування складеного РЦР стану у подвійному масштабі часу. Розроблено методику вибору періодів квантування у різнотемпових системах. Досліджено різнотемпові спостерігачі змінних стану в замкнених детермінованих підсистемах керування.

У п'ятому розділі розроблено методи синтезу оптимальних РЦР стану при випадкових збуреннях. Розроблено методику оцінки змінних стану за допомогою різнотемпових фільтрів Калмана.

У шостому розділі розроблено і досліджено теоретичні питання адаптивного керування багатовимірними стохастичними об'єктами з розділяючими рухами з почерговою оцінкою змінних стану і динамічних параметрів при різнотемповій дискретизації.

У сьомому розділі проведено дослідження систем різнотемпового цифрового керування двокорпусним випарним апаратом і термозмішувальною установкою.

У додатках наведено доведення теорем, програмне забезпечення

різнотемпових систем керування.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Для синтезу адаптивних і різнотемпових МЦР розроблено наступні методи і методики.

I. Методика розробки динамічної різнотемпової дискретної моделі технологічного процесу, представленій у  $p$  масштабах часу у просторі стану. Вихідна лінійна модель дискретної системи з постійними параметрами має вигляд

$$\bar{x}_1[(k+1)T_0] = F_{11} \bar{x}_1(kT_0) + \dots + F_{1p} \bar{x}_p(kT_0) + G_1 \bar{u}(kT_0); \quad /1/$$

$$\bar{x}_2[(k+1)T_0] = F_{21} \bar{x}_1(kT_0) + \dots + F_{2p} \bar{x}_p(kT_0) + G_2 \bar{u}(kT_0); \quad /2/$$

⋮

$$\bar{x}_p[(k+1)T_0] = F_{p1} \bar{x}_1(kT_0) + \dots + F_{pp} \bar{x}_p(kT_0) + G_p \bar{u}(kT_0); \quad /3/$$

$$\bar{y}(kT_0) = C_1 \bar{x}_1(kT_0) + C_2 \bar{x}_2(kT_0) + \dots + C_p \bar{x}_p(kT_0); \quad /4/$$

де  $\bar{x}(kT_0) - n$  - вимірний вектор стану, який складається відповідно з  $n_1, n_2, \dots, n_p$  - вимірних векторів  $\bar{x}_1(kT_0), \bar{x}_2(kT_0), \dots, \bar{x}_p(kT_0)$ . Якщо складна система /1/ - /4/ має неявно-виражену властивість функціонування у  $p$  масштабах часу, то  $n$  власних значень системи можна розділити на  $n_2$  повільних мод,  $n_2$  менш повільнозмінних мод і  $\dots$   $n_p$  швидкозмінних мод, зв'язаних відповідно із змінними стану  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{p-1}, \bar{x}_p$ . Асимптотично стійкі швидкі моди виявляють вплив тільки протягом короткого початкового періоду, після якого відповідні перехідні процеси досягають усталених значень. Після цього режим роботи системи можна описати за її повільними модами. Якщо закінчились швидкодіючі перехідні процеси, які зв'язані з вектором  $\bar{x}_i$  ( $i = p, p-1, \dots, 2$ ), то можна припустити, що у квазіусталеному стані  $\bar{x}_i[(k+1)T_0] = \bar{x}_i(kT_0)$ .

При збільшеному періоді квантування

$$h = m T_0, \quad (15/)$$

де  $m$  - ціле число, більше одиниці, а також при умові

$$\bar{u}_n(rh + iT_0) = \bar{u}_n(rh), \quad 0 \leq i < m, \quad (16/)$$

перша повільнодіюча підсистема /III/ представлена у формі

$$\bar{x}_{1n}[(r+1)h] = R_{11} \bar{x}_{1n}(rh) + \dots + R_{1(\rho-1)} \bar{x}_{(\rho-1)n}(rh) + \\ + \left[ \sum_{i=0}^{m-2} F_{11n}^i G_{1n} + \dots + \sum_{i=0}^{m-1} F_{1(\rho-1)n}^i G_{(\rho-1)n} \right] \bar{u}_n(rh); \quad (17/)$$

$$\bar{x}_{2n}[(r+1)h] = R_{21} \bar{x}_{1n}(rh) + \dots + R_{2(\rho-1)} \bar{x}_{(\rho-1)n}(rh) + \\ + \left[ \sum_{i=0}^{m-2} F_{21}^i G_{1n} + \dots + \sum_{i=0}^{m-1} F_{2(\rho-1)}^i G_{(\rho-1)n} \right] \bar{u}_n(rh);$$

---


$$\bar{x}_{(\rho-1)n}[(r+1)h] = R_{(\rho-1)1} \bar{x}_{1n}(rh) + \dots + R_{(\rho-1)(\rho-1)} \bar{x}_{(\rho-1)n}(rh) + \\ + \left[ \sum_{i=0}^{m-2} F_{(\rho-1)1}^i G_{1n} + \dots + \sum_{i=0}^{m-1} F_{(\rho-1)(\rho-1)}^i G_{(\rho-1)n} \right] \bar{u}_n(rh); \quad (18/)$$

$$\bar{y}_n(rh) = C_{1n} \bar{x}_{1n}(rh) + \dots + C_{(\rho-1)n} \bar{x}_{(\rho-1)n}(rh) + D_n \bar{u}_n(rh)$$

Математичний опис самої швидкодіючої підсистеми /III/ виконаний на основі припущення, що протягом часу швидких перехідних процесів, спричинених зміною  $\bar{x}_p(kT_0)$ , проміжні повільнодіючі змінні  $\bar{x}_{1n}, \bar{x}_{2n}, \dots, \bar{x}_{(\rho-1)n}, \bar{u}_n$  будуть постійними. Тоді модель самої III, яка функціонує у швидкому масштабі часу, буде мати вигляд

$$\bar{x}_{p\Delta}[rh + (i+1)T_0] = F_{p\Delta} \bar{x}_{p\Delta}(rh + iT_0) + G_p \bar{u}_\Delta(rh + iT_0), \quad (11/)$$

де  $\bar{x}_{p\Delta} = \bar{x}_p - \bar{x}_p$ ;  $\bar{u}_\Delta = \bar{u} - \bar{u} = \bar{u} - \bar{u}_n$ ,  $i = 0, 1, \dots, m-1$   
Рівняння вимірювання самої швидкодіючої підсистеми

$$\bar{y}_\Delta(rh + iT_0) = C_p \bar{x}_{p\Delta}(rh + iT_0) \quad (12/)$$

Друга проміжна III при збільшеному періоді квантування

$$\theta = \mu h, \quad (13/)$$

де  $\mu$  - ціле число, більше одиниці, а також при умові

$$\bar{u}_{n\mu}(e\theta + jh) = \bar{u}_{n\mu}(e\theta), \quad 0 \leq j < \mu \quad (14/)$$

представлена у формі

$$\bar{x}_{1n_m}[(\ell+1)\theta] = N_{11} \bar{x}_{1n_m}(\ell\theta) + N_{12} \bar{x}_{2n_m}(\ell\theta) + \dots + \quad /15/$$

$$+ N_{1(p-2)} \bar{x}_{(p-2)n_m}(\ell\theta) + B_1 \bar{u}_{n_m}(\ell\theta);$$

$$\bar{x}_{(p-1)n_m}[(\ell+1)\theta] = N_{(p-1)1} \bar{x}_{1n_m}(\ell\theta) + N_{(p-1)2} \bar{x}_{2n_m}(\ell\theta) + \quad /16/$$

$$+ \dots + N_{(p-1)(p-2)} \bar{x}_{(p-2)n_m}(\ell\theta) + B_{(p-2)} \bar{u}_{n_m}(\ell\theta),$$

де

$$B_1 = \sum_{j=0}^{M-1} R_{11}^j H_1 + \dots + \sum_{j=0}^{M-1} R_{1(p-2)}^j H_{p-2};$$

⋮

$$B_{(p-2)} = \sum_{j=0}^{M-1} R_{(p-2)1}^j H_1 + \dots + \sum_{j=0}^{M-1} R_{(p-2)(p-2)}^j H_{(p-2)} \quad /17/$$

Рівняння вимірювання другої проміжної III:

$$\bar{y}_{n_m}(\ell\theta) = C_{1n_m} \bar{x}_{1n_m}(\ell\theta) + \dots + C_{(p-2)n_m} \bar{x}_{(p-2)n_m}(\ell\theta) + D_{n_m} \bar{u}_{n_m}(\ell\theta) \quad /18/$$

Математичний опис другої III, яка являє собою відповідно повільнодіючу в порівнянні з підсистемою /II/, /I2/, розроблений на основі припущення, що протягом часу перехідних процесів, які виникають при зміні  $\bar{x}_{(p-1)}(rk)$ , проміжні повільнодіючі змінні  $\bar{x}_{2n}(rk), \dots, \bar{x}_{(p-2)n}, \bar{u}_n(rk)$  будуть постійними. У результаті модель другої менш швидкодіючої підсистеми, яка функціонує у другому масштабі часу, представлена у формі

$$\bar{x}_{(p-2)n_p}[\ell\theta + (i+1)k] = R_{(p-2)(p-2)} \bar{x}_{(p-2)n_p}(\ell\theta + jk) + \quad /19/$$

$$+ H_{(p-2)} \bar{u}_{n_p}(\ell\theta + jk),$$

де  $\bar{x}_{(p-2)n_p}(rk) = \bar{x}_{(p-2)n}(rk) - \bar{x}_{(p-2)n}$ ;  $\bar{u}_{n_p}(rk) = \bar{u}(rk) - \bar{u}_{n_p}(rk)$ ;

$\bar{x}_{(p-2)n}$  - квазиустале значення вектора  $\bar{x}_{(p-2)n}$ . Рівняння вимірювання другої III:

$$\bar{y}_{n_p}(\ell\theta + jk) = C_{(p-2)n} \bar{x}_{(p-2)n_p}(\ell\theta + jk) + D_{n_p} \bar{u}_{n_p}(\ell\theta + jk) \quad /20/$$

Продовжуючи таким чином процес декомпозиції математичної моделі складної системи на підсистеми, які функціонують у  $p$  масштабах часу, розроблено рівняння стану і вимірювання самої повільнодіючої підсистеми:

$$\bar{x}_{1/m \dots m} [(s+1)\Omega] = \Psi_M \bar{x}_{1/m \dots m} (s\Omega) + Q_{p1} \bar{u}_{1/m \dots m} (s\Omega); \quad /21/$$

$$\bar{y}_{1/m \dots m} (s\Omega) = C_{1/m \dots m} \bar{x}_{1/m \dots m} (s\Omega) + D_{1/m \dots m} \bar{u}_{1/m \dots m} (s\Omega),$$

де  $\bar{x}_{1/m \dots m}$  - самий повільнодіючий вектор стану;  $\bar{u}_{1/m \dots m}$  - сама повільнодіюча складова вектора вихідних вимірювань. Період квантування, який застосовується для самої повільнодіючої підсистеми

$$\Omega = \lambda \Delta = \lambda x \dots x \mu m T_0 \quad /22/$$

2. Спосіб різнотемпової дискретизації при синтезі адаптивних БЦР.

Запропоновано нову багатовимірну різнотемпову дискретну модель у вигляді авторегресії і ковзного середнього з детермінованим збуренням для лінійних об'єктів з багатьма різними невідомими і змінними запізненнями:

$$A(\bar{z}^{-1}) \bar{y}[n; T_{0i}] = B(\bar{z}^{-1}) \text{diag}\{z_i^{-d_{i \min}}\} \bar{u}[n; T_{0i}]; \quad /23/$$

$$\text{де } A(\bar{z}^{-1}) = I + A_1 \text{diag}\{z_i^{-1}\} + \dots + A_m \text{diag}\{z_i^{-k}\}; \quad /24/$$

$$B(\bar{z}^{-1}) = B_1 \text{diag}\{z_i^{-1}\} + \dots + B_{p \max} \text{diag}\{z_i^{-p \max}\},$$

Порядок розширеної поліноміальної матриці  $B(\bar{z}^{-1})$  з урахуванням максимальних запізнювань в усіх каналах:

$$p \max = k + \max_{i \in \bar{1}, m} (d_{i \max} - d_{i \min}), \quad /25/$$

де  $d_{i \min} = \lceil \tau_i / T_{0i} \rceil$  - відоме мінімальне запізнення. Можливість реалізації моделі /23/ - /24/ можна довести на основі

Твердження 2.1. Якщо для моделі багатовимірного об'єкта  $p$ -канонічної структури з  $m$ -входами і  $m$ -виходами, в якому існують різні і змінні запізнення  $\tau_1 \neq \tau_2 \neq \dots \neq \tau_m$  по керульним діям  $u_1, \dots, u_m$ , причому,  $\tau_{i \min} \ll \tau_{j \max}$ , а  $\tau_{ii} = \tau_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m$ ), визначений мінімальний період квантування  $T_{0i \min} \leq \tau_{i \min}$  по  $i$ -му каналу керування  $u_i$  і вимірювання  $y_i$  з мінімальним запізненням, то в інших

( $m-1$ ) каналах, в яких  $\tau_j \gg \tau_{i \min}$ , можна допустити дискретизацію при збільшених періодах  $T_{0j} = \mu_j T_{0i \min}$ , де  $\mu_j = 2^{q_j}$  при  $q_j = 1, 2, 3, \dots$ , якщо  $T_{0j} \leq \pi/\omega_{j \max}$  при обмеженні  $T_{0j} \leq \tau_{jj \min}$  де  $\omega_{j \max}$  - максимальна частота у спектрі вихідної координати  $y_j$ .

Синтез різномісцевих оптимальних БЦР виконано на основі бажаної дискретної моделі багатовимірної замкнутої системи

$$\bar{y}[n_i T_{0i}] = [I - \text{diag}\{e^{-\lambda_{ii} T_{0i}} z_i^{-1}\}]^{-1} \cdot \quad (26)$$

$$\cdot \text{diag}\{1 - e^{-\lambda_{ii} T_{0i}}\} B^{-1}(1) B(\bar{z}^{-1}) \text{diag}\{z_i^{-d_{i \min}}\} \bar{G}[n_i T_{0i}]$$

відповідно до якої забезпечується аперіодичний перехідний процес вектора  $\bar{y}$  при подачі на завдачі діяння  $\bar{G}$  ступінчастих збурень. В результаті синтезу рівняння оптимального БЦР представлено у формі

$$\{I - \text{diag}\{e^{-\lambda_{ii} T_{0i}} z_i^{-1}\} - \text{diag}\{1 - e^{-\lambda_{ii} T_{0i}}\} B^{-1}(1) \cdot$$

$$B(\bar{z}^{-1}) \text{diag}\{z_i^{-d_{i \min}}\}\} A^{-1}(\bar{z}^{-1}) B(\bar{z}^{-1}) \cdot \quad (27)$$

$$\cdot \text{diag}\{z_i^{-d_{i \min}}\} \bar{u}[n_i T_{0i}] = \text{diag}\{1 - e^{-\lambda_{ii} T_{0i}}\} \cdot$$

$$\cdot B^{-1}(1) B(\bar{z}^{-1}) \text{diag}\{z_i^{-d_{i \min}}\} \bar{E}[n_i T_{0i}],$$

де вектор помилок регулювання  $\bar{E}[n_i T_{0i}] = \bar{G}[n_i T_{0i}] - \bar{y}[n_i T_{0i}]$ , які визначаються у дискретні моменти часу  $t = n_i T_{0i}$ ;  $\bar{G}[n_i T_{0i}]$  - вектор завдачих діянь.

Твердження 2.2. Якщо в математичній моделі замкнутої системи /26/ апроксимація вектора запізнення виражена у цифровому фільтрі  $B^{-1}(1) B(\bar{z}^{-1})$ , де матриця  $B(1)$  має вигляд

$$B(1) = \begin{bmatrix} B_{11}(1) & B_{21}(1) & \dots & B_{m1}(1) \\ B_{12}(1) & B_{22}(1) & \dots & B_{m2}(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{1m}(1) & B_{2m}(1) & \dots & B_{mm}(1) \end{bmatrix},$$

то лінійна багатовимірна розізнена система цифрового керування з об'єктом /23/ і МЦР /27/ буде автономною в усталеному режимі.

Для реалізації адаптивного БЦР розроблено алгоритм різнотемпової реалізації рекурентного методу найменших квадратів /РМНК/ для оцінки параметрів дискретної моделі об'єкта /23/:

$$\hat{\theta}_j^T [[n/2^q] T_{0j}] = \hat{\theta}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] + \bar{P}_j^T [[n/2^q] T_{0j}] \cdot \bar{X}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \{ y_j^T [[n/2^q] T_{0j}] - \bar{X}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \hat{\theta}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \}; \quad /28/$$

$$\bar{P}_j^T [[n/2^q] T_{0j}] = \frac{1}{\beta_j} \{ \bar{P}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] -$$

$$\frac{\bar{P}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \bar{X}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \bar{X}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \bar{P}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}]}{\beta_j + \bar{X}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \bar{P}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}] \cdot \bar{X}_j^T [([n/2^q] - 1) T_{0j}]} \},$$

де  $\bar{P}_j^T [n/2^q]$  - матриця коваріації, діагональні елементи якої пропорціональні дисперсіям помилок при оцінках параметрів вектора

$$\hat{\theta}_j^T. \text{ На основі функцій Ляпунова: } V_j^T [[n/2^q] T_{0j}] = \Delta \hat{\theta}_j^T [[n/2^q] T_{0j}] \cdot \bar{P}^{-1} [[n/2^q] T_{0j}] \cdot \Delta \hat{\theta}^T [[n/2^q] T_{0j}] \geq 0$$

здійснений синтез стійкості різнотемпової оцінки параметрів по РМНК /28/. Доведена збіжність адаптивного закону керування різнотемпового БЦР.

Твердження 2.3. Якщо для здійснення оцінки вектора параметрів  $\hat{\theta}_j^T [[n/2^q] T_{0j}]$  багатовимірного об'єкта використовується алгоритм РМНК /28/, то закон адаптивного керування МЦР, визначений на основі рівняння /27/ і представлений через оцінки параметрів, глобально збігається, тобто послідовність керуючих дій  $\{ u_i [n_i T_{0i}] \}$ ,  $(i = 1, 2, \dots, m)$  буде обмежена на часовому інтервалі  $t = [n_i T_{0i}]$ ,  $n_i = 1, 2, \dots, \infty$ .

3. Виконано модифікацію методу синтезу адаптивних БЦР

для багатовимірних стохастичних лінійних об'єктів з багатьма різними запізненнями в каналах керування, представленими моделлю авторегресії і ковзного середнього з допоміжним вхідним сигналом

$$A(\bar{z}^{-1})\bar{y}_t = B(\bar{z}^{-1}) \text{diag}\{\bar{z}^{-d_i}\}\bar{u}_t + C(\bar{z}^{-1})\bar{x}_t + \bar{v}, \quad /29/$$

у якій  $d_i = [\tau_i/\tau_0] + 1$  - відоме дискретне запізнення по каналу  $u_i - y_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). Матричні поліноми  $A, B, C$  вимірності  $(m \times m)$  представлені у вигляді  $A(\bar{z}^{-1}) = I + A_1 \bar{z}^{-1} + \dots + A_k \bar{z}^{-k}$ ;  $B(\bar{z}^{-1}) = B_0 + B_1 \bar{z}^{-1} + \dots + B_k \bar{z}^{-k}$ ;  $C(\bar{z}^{-1}) = I + C_1 \bar{z}^{-1} + \dots + C_k \bar{z}^{-k}$ .

Припускаємо, що в моделі /29/ запізнення упорядковані

$$d_1 < d_2 < \dots < d_m.$$

На основі діофантового рівняння

$$\tilde{C}(\bar{z}^{-1}) = \tilde{E}(\bar{z}^{-1})A(\bar{z}^{-1}) + \text{diag}\{\bar{z}^{-d_{min}}\}\tilde{F}'(\bar{z}^{-1}), \quad /30/$$

для якого справедлива тотожність  $\tilde{C}(\bar{z}^{-1})E(\bar{z}^{-1}) = \tilde{E}(\bar{z}^{-1})C(\bar{z}^{-1})$ , розроблена процедура оптимального завбачення вектора  $\bar{y}_t$  на  $d_{min}$  періодів квантування

$$\bar{y}_{t+d_{min}|t} = [\tilde{C}(\bar{z}^{-1})]^{-1} [\tilde{F}'(\bar{z}^{-1})\bar{y}_t + \tilde{E}(\bar{z}^{-1})B(\bar{z}^{-1})$$

$$\cdot \text{diag}\{\bar{z}^{-d_i}\}\bar{u}_t + \bar{\delta}']; \quad \bar{\delta}' = \tilde{E}(1) \cdot \bar{v},$$

де  $d_{min}$  - мінімальне дискретне запізнення керування.

**Теорема 3.1.** Якщо випадкова складова вектора вихідних координат

$\bar{y}_t$  представляє стохастичний дискретний процес  $\{\bar{y}_t, t \in T\}$ , який при  $\bar{u}_t = 0, \bar{v} = 0$  відповідно моделі /29/ має зображення процесу авторегресії і ковзного середнього  $A(\bar{z}^{-1})\bar{y}_t = C(\bar{z}^{-1})\bar{x}_t$ , де усі корені поліномів  $A(\bar{z}^{-1}), C(\bar{z}^{-1})$  знаходяться на полі круга одиничного радіуса, а  $\{\bar{x}_t, t \in T\}$  представляє послідовність незалежних випадкових змінних з нульовим математичним сподіванням і дисперсією, то завбачення вектора вихідних координат  $\bar{y}_t$  на  $d_{min}$  періодів квантування, при якому мінімізується дисперсія помилки завбачення, буде мати вигляд  $\bar{y}_{t+d_{min}|t} = [\tilde{C}(\bar{z}^{-1})]^{-1} \tilde{F}'(\bar{z}^{-1})\bar{y}_t$  де матричний поліном  $\tilde{F}'(\bar{z}^{-1})$  визначається з тотожності /30/.

При цьому вектор помилок завбачення  $\tilde{y}_{t+d_{min}|t} =$

$$= \bar{y}_{t+d_{min}} - \bar{y}_{t+d_{min}}^* = \bar{e}_{t+d_{min}}$$

являє собою ковзні середні  $\bar{e}_{t+d_{min}} = E(\bar{z}^{-1}) \bar{z}_{t+d_{min}}$

На основі мінімізації на кожному періоді квантування критерію оптимальності

$$J = M \left\{ \|\bar{y}_{t+d_{min}} - \bar{e}_{t+d_{min}}\|^2 + [\text{diag}\{\bar{z}^{-\Delta d_i}\}] \right. \quad /32/$$

$$\left. \cdot (\bar{u}_t - \bar{u}_{t-1}) \right\}^T \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_m\} [\text{diag}\{\bar{z}^{-\Delta d_i}\} (\bar{u}_t - \bar{u}_{t-1})],$$

де  $M$  - оператор математичного сподівання;  $\Delta d_i = d_i - d_{min}$ ; виконано розробку рівняння оптимального МЦР:

$$\tilde{C}(\bar{z}^{-1}) \bar{y}_{t+d_{min}|t}^* = \tilde{F}(\bar{z}^{-1}) \bar{y}_t + \tilde{R}(\bar{z}^{-1}). \quad /33/$$

$$\cdot \text{diag}\{\bar{z}^{-\Delta d_i}\} \bar{u}_t + \tilde{H}(\bar{z}^{-1}) \bar{e}_t + \bar{\delta} = 0,$$

де матричні поліноми:  $\tilde{F}(\bar{z}^{-1}) = \tilde{F}(\bar{z}^{-1})$ ;  $\tilde{R}(\bar{z}^{-1}) = [\tilde{E}(\bar{z}^{-1}) B(\bar{z}^{-1}) + \tilde{C}(\bar{z}^{-1}) (B_0^T)^{-1} \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_m\} (\bar{z}^{-1})]$ ;  $\tilde{H}(\bar{z}^{-1}) = -\tilde{C}(\bar{z}^{-1})$ , а вектор зсуву на вході  $\bar{\delta} = \bar{\delta}^t$ . Рівняння /33/ визначає структуру оптимального ВЦР, в якому на кожному періоді квантування формується вектор керування  $\text{diag}\{\bar{z}^{-\Delta d_i}\} \bar{u}_t$ .

Розроблено процедуру РМНК для оцінки параметрів  $\hat{F}(\bar{z}^{-1})$ ,  $\hat{R}(\bar{z}^{-1})$ ,  $\hat{H}(\bar{z}^{-1})$ ,  $\hat{\delta}$  ВЦР /33/, яка модифікована для величини запізнювання  $d_{min}$ .

Проведено дослідження стійкості замкнутої багатовимірної системи керування, яка включає об'єкт /29/ і ВЦР /33/.

4. Розроблено метод синтезу адаптивних регуляторів для нелінійних багатовимірних стохастичних об'єктів з різними запізнюваннями в каналах керування, представлених матричною поліноміальною дискретною моделлю

$$A(\bar{z}^{-1}) \bar{y}_t = \sum_{i=1}^N B_i X_{i,t-1} \text{diag}\{\bar{z}^{-d_j}\}. \quad /34/$$

$$\cdot [u_1^{r_{12}}, \dots, u_m^{r_{im}}]^T + C(\bar{z}^{-1}) \bar{z}_t + \bar{v},$$

де функція  $X_{i,t-1}$  визначається наступним чином:

$$X_{i,t-1} \equiv \bar{g}_i [\bar{y}_{t-1-e}, (e=0,1,\dots);]; \text{diag}\{z^{-d_j}\} \bar{u}_{t-N}, \quad /35/$$

$$(\nu=1,2,\dots), (i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,m),$$

де  $\bar{g}_i$  - відомі стаціонарні матричні діагональні функції вимірності  $(m \times m)$ . Матричні поліноми  $A, C$  мають вигляд:  $A(z^{-1}) = I + A_1 z^{-1} + \dots + A_{K_A} z^{-K_A}$ ;  $C(z^{-1}) = I + C_1 z^{-1} + \dots + C_{K_C} z^{-K_C}$ ; матриця  $B_i$  параметрів системи. Коефіцієнти  $N, r_{i1}, \dots, r_{im}, K_A, K_C$  - відомі цілі числа з  $r_{ij} \geq 0$  ( $j=1, \dots, m$ ). Приведений до виходу вектор стохастичних збурень  $\bar{z}_t$  представляє послідовності незалежних випадкових змінних з нульовими середніми.

На основі діофантового рівняння

$$C(z^{-1}) = F(z^{-1}) + z^{-1} F(z^{-1}) \quad /36/$$

розроблено процедуру завбачання вектора  $\bar{y}_t$  на  $d_{\min}$  періодів квантування:

$$\bar{y}_{t+d_{\min}}^* | t = \bar{y}_{t+d_{\min}} - \bar{z}_{t+d_{\min}} = [C(z^{-1})]^{-1} \{ F(z^{-1}) \cdot \bar{y}_{t+d_{\min}-1}^* + \sum_{i=1}^N B_i \tilde{X}_{i,t+d_{\min}-1} \cdot \text{diag}\{z^{-d_j}\} [u_{1,t}^{r_{i1}}, \dots, u_{m,t}^{r_{im}}]^T + \bar{v} \},$$

де  $\bar{y}_{t+d_{\min}-1}^*$  - оцінка вектора вихідних змінних, яка виконується відповідно

$$\bar{y}_{t+2}^* = z [I - A(z^{-1})] \bar{y}_{t+1}^* + \sum_{i=1}^N B_i \tilde{X}_{i,t+1}^* \cdot \text{diag}\{z^{-d_j}\} [u_{1,t+1}^{r_{i1}}, \dots, u_{m,t+1}^{r_{im}}]^T + \bar{v}$$

при  $2=1,2,\dots,d_{\min}-1$ . Оцінка функції  $\tilde{X}_{i,t+d_{\min}-1}$  визначається на основі /35/.

Для синтезу БІР застосовується квадратичний критерій оптимальності /32/, на основі мінімізації якого по вектору змінних керування  $\text{diag}\{z^{-d_j}\} \bar{u}_t$  визначено структуру нелінійного БІР:

$$\left\{ \sum_{i=1}^N B_i \tilde{X}_{i,t+d_{\min}-1} \cdot \text{diag}\{r_{ij} u_j^{r_{ij}-1}\} \right\}^T C^{-1}(z^{-1}) \left\{ \sum_{i=1}^N B_i \tilde{X}_{i,t+d_{\min}-1} \cdot \text{diag}\{z^{-d_j}\} [u_{1,t}^{r_{i1}}, \dots, u_{m,t}^{r_{im}}]^T + \bar{v} \right\} + \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_m\} \text{diag}\{z^{-d_j}\} (\bar{u}_t - \bar{u}_{t-1}) = 0,$$



$A_{21} = \tilde{A}_{21}/\mu$ ;  $A_{22} = \tilde{A}_{22}/\mu$ ;  $B_2 = \tilde{B}_2/\mu$ . При  $\mu \rightarrow 0$  математичний опис III набуває вигляду

$$\dot{\bar{x}}_M(t) = A_M \bar{x}_M(t) + B_M \bar{u}_M(t); \quad /43/$$

$$\bar{y}_M(t) = C_{MH} \bar{x}_M(t) + D_{MH} \bar{u}_M(t), \quad /44/$$

де  $A_M = A_{11} - A_{12} A_{22}^{-1} A_{21}$ ;  $B_M = B_1 - A_{12} A_{22}^{-1} B_2$ ;

$$C_{MH} = C_1 - C_2 A_{22}^{-1} A_{21}; \quad D_{MH} = -C_2 A_{22}^{-1} B_2 \quad /45/$$

при умові, що  $A_{22}$  - невироджена матриця.

Для синтезу повільнодіючого дискретного регулятора підсистема /43/, /44/ представлена у дискретній формі з періодом квантування  $h = mT_0$  відповідно /5/:

$$\bar{x}_M[(r+1)h] = \Psi_M(h) \bar{x}_M(rh) + H_M(h) \bar{u}_M(rh), \quad /46/$$

де  $\Psi_M(h) = e^{A_M h}$ ;  $H_M(h) = \int_0^h \Psi_M(\tau) B_M d\tau$  при умові, що  $\bar{u}_M(t) = \bar{u}_M(rh)$ ,  $rh \leq t < rh + h$ .

Закон керування повільнодіючого регулятора представлено у вигляді

$$\bar{u}_M(rh) = -K_M \hat{\bar{x}}_M[rh | (r-1)h], \quad /47/$$

де вектор  $\hat{\bar{x}}_M$  оцінюється за допомогою спостерігача

$$\hat{\bar{x}}_M[(r+1)h | rh] = \Psi_M(h) \hat{\bar{x}}_M[rh | (r-1)h] + H_M(h) \bar{u}_M(rh) + R_M \{ \bar{y}_M(rh) - C_{MH} \hat{\bar{x}}_M[rh | (r-1)h] - D_{MH} \bar{u}_M(rh) \}$$

Матриця підсилення  $K_M$  синтезується на основі мінімізації квадратичного критерію оптимальності

$$J_M = \sum_{r=0}^{\infty} \left[ \bar{x}_M^T(rh) \quad \bar{u}_M^T(rh) \right] \begin{bmatrix} \hat{Q}_{1M} & \hat{Q}_{12M} \\ \hat{Q}_{12M}^T & \hat{Q}_{2M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_M(rh) \\ \bar{u}_M(rh) \end{bmatrix} \quad /48/$$

Математичний опис III розроблений за умови, коли повільні змінні в системі /40/, /41/ будуть сталими протягом перехідних процесів швидких змінних. При цьому  $\dot{\bar{x}}_2(t) = 0$ , а

$$\dot{\bar{x}}_B(t) = A_{22} \bar{x}_B(t) + B_2 \bar{u}_B(t) \quad /49/$$

$$\bar{y}_B(t) = C_2 \bar{x}_B(t), \quad /50/$$

де  $\bar{x}_B(t) = \bar{x}_2(t) - \bar{x}_2^*(t)$ ;  $\bar{u}_B(t) = \bar{u}(t) - \bar{u}^*(t)$ ;  $\bar{y}_B(t) = \bar{y}(t) - \bar{y}^*(t)$ .

Шляхом уведення позначень  $\Psi_B(t) = e^{A_{22}t}$ ,  $H_B(t) = \int \Psi_B(\tau) B_2 d\tau$   
і за умови  $\bar{U}_B(t) = \bar{U}_B(rh + i' T_0)$ ,  $(rh + i' T_0) \leq t < [rh + (i+1) T_0]$

"швидка" підсистема /49/ представлена в дискретній формі

$$\bar{X}_B[rh + (i+1) T_0 | rh + i' T_0] = \Psi_B(T_0) \bar{X}_B[rh + i' T_0] + H_B(T_0) \bar{U}_B / 51 /$$

Закон керування "швидкої" підсистеми проектується у формі

$$\bar{U}_B(rh + i' T_0) = -K_B \hat{X}_B[rh + i' T_0 | rh + (i-1) T_0], \quad / 52 /$$

де вектор  $\hat{X}_B$  оцінюється за допомогою спостерігача

$$\hat{X}_B[rh + (i+1) T_0 | rh + i' T_0] = \Psi_B(T_0) \hat{X}_B[rh + i' T_0 | rh + (i-1) T_0] + H_B(T_0) \bar{U}_B(rh + i' T_0) + R_B \{ \bar{Y}_B(rh + i' T_0) - C_2 \hat{X}_B[rh + i' T_0 | rh + (i-1) T_0] \},$$

а матриця підсилення  $\bar{K}_B$  визначається на основі мінімізації критерію

$$J_B = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} \left[ \bar{X}_B^T(rh + i' T_0) \begin{matrix} \hat{Q}_{1B} & \hat{Q}_{12B} \\ \hat{Q}_{12B}^T & \hat{Q}_{2B} \end{matrix} \begin{matrix} \bar{X}_B(rh + i' T_0) \\ \bar{U}_B(rh + i' T_0) \end{matrix} \right] / 53 /$$

Розроблена методика визначення матриць  $\hat{Q}_{1B}$ ,  $\hat{Q}_{12B}$ ,  $\hat{Q}_{2B}$ ,  $\hat{Q}_{1B}$ ,  $\hat{Q}_{2B}$ . Отже, закон керування складеного різномірного регулятора формується у вигляді

$$\bar{U}_B(rh + i' T_0) = \bar{U}_M(rh) + \bar{U}_B(rh + i' T_0) = -K_B \hat{X}_2(rh + i' T_0) - [K_B A_{22}^{-1} (A_{21} \Phi_{M,i} - B_2 K_M) + K_M] \hat{X}_1(rh),$$

де  $\Phi_{M,i+1} = \Psi_M(T_0) \Phi_{M,i} - H_M(T_0) K_M$ ;  $\Phi_{M,0} = I$

6. Розроблено методику проектування складеного РЦР стану для багатовимірних об'єктів з запізненням з компенсацією повільно-змінних збурень з середньов величин, відмінних від нуля. Неперервна модель об'єкта

$$\dot{\bar{X}}_1(t) = A_{11} \bar{X}_1(t) + A_{12} \bar{X}_2(t) + B_1 \bar{U}(t-\tau) + B_{1v} \bar{V}(t); \quad / 54 /$$

$$\dot{\bar{X}}_2(t) = A_{21} \bar{X}_1(t) + A_{22} \bar{X}_2(t) + B_2 \bar{U}(t-\tau) + B_{2v} \bar{V}(t); \quad / 55 /$$

$$\dot{\bar{V}}(t) = C_1 \bar{X}_1(t) + C_2 \bar{X}_2(t) \quad / 56 /$$

відрізняється від моделі /40/ - /42/, тому що в неї уведено запізнення  $\tau$  по вектору керування і вектор збурень  $\bar{V}(t)$ , який

вміщує тільки повільно змінні складові.

На основі методу різнотемпової дискретизації неперервних систем у детермінованому середовищі /43/ - /46/ і /49/ - /51/ розроблено неперервні математичні моделі повільно- і швидкодіючої підсистем. Шляхом зображення запізнення  $\mathcal{L}$  через великий і малий періоди квантування  $\mathcal{L} = (d_1 - 1)h + \mathcal{L}_1$ ;  $\mathcal{L} = (d_2 - 1)T_0 + \mathcal{L}_2$  розроблено моделі повільно- і швидкодіючої підсистем у дискретній формі:

$$\begin{cases} \bar{X}_{Mn}[(r+1)h] = \Psi_M(h) \bar{X}_{Mn}(rh) + H_M(h) \bar{U}_M(rh) + \bar{V}(rh + \mathcal{L}, h); & /57/ \\ \bar{Y}_{Mn}(rh) = C_M \bar{X}_{Mn}(rh - \mathcal{L}) + D_M \bar{U}_M(rh - \mathcal{L}) + \bar{D}_M \bar{V}(rh); \\ \bar{X}_{Bn}[(k+1)T_0] = \Psi_B(T_0) \bar{X}_{Bn}(kT_0) + H_B(T_0) \bar{U}_B(kT_0); & /58/ \\ \bar{Y}_B(kT_0) = C_B \bar{X}_{Bn}(kT_0 - \mathcal{L}) = C_B \bar{X}_B(kT_0), \end{cases}$$

де завбачені значення векторів стану на час запізнення  $\mathcal{L}$  рів-

$$\begin{aligned} \bar{X}_{Mn}(rh) &= \hat{X}_M[rh + (d_1 - 1)h + \mathcal{L}_1 | rh] = \\ &= \Psi_M(\mathcal{L}) \hat{X}_M^{\wedge}[rh | rh] + G_{Mn} \bar{U}_M(rh) & /59/ \end{aligned}$$

$$\text{при } G_{Mn} = \left\{ \Psi_M[(d_1 - 1)h] H_M(\mathcal{L}_1) \quad \Psi_M[(d_1 - 2)h] H_M(h) \dots \right.$$

$$\left. \dots \Psi_M(h) H_M(h) \quad H_M(h) \right\};$$

$$\bar{U}_M(rh) = \left\{ \bar{u}_M[(r - d_1)h] \quad \bar{u}_M[(r - d_1 + 1)h] \dots \bar{u}_M[(r - 1)h] \right\}^T; \quad /60/$$

$$\bar{X}_{Bn}(kT_0) = \hat{X}_B[kT_0 + (d_2 - 1)T_0 + \mathcal{L}_2 | kT_0] = \Psi_B(\mathcal{L}) \hat{X}_B^{\wedge}(kT_0 | kT_0) + G_{Bn} \bar{U}_B(kT_0)$$

$$\text{при } G_{Bn} = \left\{ \Psi_B[(d_2 - 1)T_0] H_B(\mathcal{L}_2) \quad \Psi_B[(d_2 - 2)T_0] H_B(T_0) \dots \right.$$

$$\left. \dots \Psi_B(T_0) H_B(T_0) \quad H_B(T_0) \right\};$$

$$\bar{U}_B(kT_0) = \left\{ \bar{u}_B[(k - d_2)T_0] \quad \bar{u}_B[(k - d_2 + 1)T_0] \dots \bar{u}_B[(k - 1)T_0] \right\}^T$$

Використання повільно- і швидкодіючого завбачених векторів стану /59/, /60/ у моделях /57/, /58/ дозволяє перенести запізнення  $\mathcal{L}$  в математичному описі об'єкта з входу на вихід. Внаслідок цього вимірності векторів  $\bar{X}_{Mn}$  і  $\bar{X}_{Bn}$  в моделях стану /57/, /58/ не будуть залежати від запізнення  $\mathcal{L}$  при різних періодах квантування.

Шляхом застосування різницевих операторів III і III зображені в приростах змінних

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta_k \bar{x}_{Mn} [(r+1)k] &= V_M(k) \Delta_k \bar{x}_{Mn}(rk) + H_M(k) \Delta_k \bar{u}_M(rk); \quad /61/ \\ \Delta_k \bar{y}_M(rk) &= C_M \Delta_k \bar{x}_{Mn}(rk - \tau) + D_M \Delta_k \bar{u}_M(rk - \tau); \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta_{T_0} \bar{x}_{Bn} [(k+1)T_0] &= V_B(T_0) \Delta_{T_0} \bar{x}_{Bn}(kT_0) + H_B(T_0) \Delta_{T_0} \bar{u}_B(kT_0); \quad /62/ \\ \Delta_{T_0} \bar{y}_B(kT_0) &= C_B \Delta_{T_0} \bar{x}_{Bn}(kT_0 - \tau) = C_B \Delta_{T_0} \bar{x}_{Bn}(kT_0), \end{aligned} \right.$$

що дозволяє виключити вплив повільнодіючих збурень, тому що

$$\Delta_k \bar{v}(rk) = \bar{v}(rk) - \bar{v}[(r-1)k] = 0; \quad \Delta_{T_0} \bar{v}(kT_0) = \bar{v}(kT_0) - \bar{v}[(k-1)T_0] = 0$$

Проектування РЦ виконується для підсистем /61/, /62/ відповідно наступним законам керування:

$$\Delta_k \bar{u}_M(rk) = -K_M \Delta_k \bar{x}_{Mn}(rk) = -K_M \cdot \Delta_k \hat{\bar{x}}_M(rk + \tau | rk); \quad /63/$$

$$\Delta_{T_0} \bar{u}_B(rk) = -K_B \Delta_{T_0} \bar{x}_{Bn}(kT_0) = -K_B \cdot \Delta_{T_0} \hat{\bar{x}}_B(kT_0 + \tau | kT_0); \quad /64/$$

де  $\hat{\bar{x}}_M(rk + \tau | rk)$ ,  $\hat{\bar{x}}_B(kT_0 + \tau | kT_0)$  - оцінки векторів /70/, /71/.

Матриці підсилення  $K_M, K_B$  синтезуються на основі мінімізації квадратичних критеріїв оптимальності.

Для зручності реалізації на ЕОМ закони керування /63/, /64/ представлені у формі позиційних алгоритмів з урахуванням /5/:

$$\bar{u}_M(rk) = \bar{u}_M [(r-1)k] - K_M \Delta_k \bar{x}_{Mn}(rk);$$

$$\bar{u}_B(rk + i T_0) = \bar{u}_B [rk + (i-1)T_0] - K_B \Delta_{T_0} \bar{x}_{Bn}(rk + i T_0)$$

7. Запропоновано паралельну стратегію проектування різнометрового складеного ЛК-регулятора з спостерігачем стану і ЛК-регулятора стану у подвійному масштабі часу для технологічних процесів, представлених дискретними моделями в детермінованому і стохастичному середовищі. Узагальнена дискретна модель об'єкта з інваріантними за часом параметрами:

$$\bar{x}_1 [(k+1)T_0] = F_1 \bar{x}_1(kT_0) + F_2 \bar{x}_2(kT_0) + G_1 \bar{u}(kT_0) + \Phi_1 \bar{v}(kT_0); \quad /65/$$

$$\bar{x}_2 [(k+1)T_0] = F_3 \bar{x}_1(kT_0) + F_4 \bar{x}_2(kT_0) + G_2 \bar{u}(kT_0) + \Phi_2 \bar{v}(kT_0); \quad /66/$$

$$\bar{y}(kT_0) = C_1 \bar{x}_1(kT_0) + C_2 \bar{x}_2(kT_0) + \bar{w}(kT_0) \quad /67/$$

з випадковими збуреннями  $\bar{v}(kT_0)$  і завадами при вимірюванні

$\bar{w}(kT_0)$  типу "білого" шуму, яка має неявно-виражені властивості функціонування у двох масштабах часу. Дискретна модель /65/ - /67/ повинна бути асимптотично стійков, повністю досяжнов і спостереженюв. При цьому вихідна модель упорядкована таким чином, що з змінними стану  $\bar{x}$ , зв'язані  $\bar{u}$ , повільні моди, а з  $\bar{x}_2 - \bar{x}_2$  швидкодіючі моди власних значень системи. На основі методики розробки динамічної різнометрової моделі технологічного процесу /1/ - /22/ розроблено модель повільнодіючої підсистеми:

$$\bar{x}_M[(r+1)k] = F_M^m \bar{x}_M(rk) + \sum_{l=0}^{m-1} F_M^l G_M \bar{u}_M(rk) + \sum_{l=0}^{m-1} F_M^{(m-1-l)} \Phi_M \bar{v}(rk + iT_0); \quad /68/$$

$$\bar{y}_M(rk) = C_M \bar{x}_M(rk) + D_M \bar{u}_M(rk) + D_{vM} \bar{v}(rk) + \bar{w}(rk), \quad /69/$$

де  $\bar{x}_M = \bar{x}_1$ ;  $\bar{u}_M = \bar{u}$ ;  $\bar{y}_M$  - повільнодіючі складові відповідних векторів, а матриці  $F_M = F_1 + F_2(I - F_4)^{-1}F_3$ ;  $G_M = G_1 + F_2(I - F_4)^{-1}G_2$ ;  $C_M = C_1 + C_2(I - F_4)^{-1}F_3$ ;  $D_M = C_2(I - F_4)^{-1}G_2$ ;

$$\Phi_M = \Phi_1 + F_2(I - F_4)^{-1}\Phi_2; \quad D_{vM} = C_2(I - F_4)^{-1}\Phi_2$$

Збільшений період квантування  $k$  визначається відповідно /5/.

Дискретна модель швидкодіючої підсистеми:

$$\bar{x}_B[rk + (i+1)T_0] = F_4 \bar{x}_B(rk + iT_0) + G_2 \bar{u}_B(rk + iT_0) + \Phi_2 \bar{v}(rk + iT_0); \quad /70/$$

$$\bar{y}_B(rk + iT_0) = C_2 \bar{x}_B(rk + iT_0) + \bar{w}(rk + iT_0), \quad /71/$$

де  $\bar{x}_B = \bar{x}_2 - \bar{x}_2$ ;  $\bar{u}_B = \bar{u} - \bar{u}_M$ ;  $\bar{y}_B = \bar{y} - \bar{y}_M$ .

Для оцінки невимірюваних повільно- і швидкодіючого вектора стану у детермінованому середовищі ( $\bar{v} = 0, \bar{w} = 0$ ) розроблено методику проектування різнометрових спостерігачів стану для підсистем /68/, /69/ і /70/, /71/:

$$\hat{\bar{x}}_M[(r+1)k | rk] = F_M^m \hat{\bar{x}}_M[rk | (r-1)k] + \sum_{l=0}^{m-1} F_M^l G_M \bar{u}_M(rk) + R_M \{ \bar{y}_M(rk) - C_M \hat{\bar{x}}_M[rk | (r-1)k] - D_M \bar{u}_M(rk) \}; \quad /72/$$

$$\hat{X}_B [rh + (i+1)T_0 | rh + iT_0] = F_4 \hat{X}_B [rh + iT_0 | rh + (i-1)T_0] + \Gamma_{73}/ \\ + G_2 \bar{U}_B (rh + iT_0) + R_B \{ \bar{Y}_B (rh + iT_0) - C_2 \hat{X}_B [rh + iT_0 | rh + (i-1)T_0] \}$$

Визначення "повільних" і "швидких" мод  $\bar{Y}_M, \bar{Y}_B$  у вимірюваннях  $\bar{Y}$  технічно дуже складно, тому рівняння спостерегаців /72/, /73/ перетворені до вигляду, де використовуються виміри  $\bar{Y}$ .

Оцінка повільнодіючого вектора стану  $\bar{X}_M$  у стохастичному середовищі /68/, /69/ здійснюється за допомогою "повільного" фільтра Калмана

$$\hat{X}_M [(r+1)h | rh] = F_M^m \hat{X}_M [rh | (r-1)h] + \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M \bar{U}_M (rh) + \\ + K_{\Phi_M} (rh) \{ \bar{Y}_M (rh) - C_M \hat{X}_M [rh | (r-1)h] - D_M \bar{U} (rh) \};$$

$$K_{\Phi_M} (rh) = [F_M^m P_M (rh) C_M^T + V_{12}] [C_M P_M (rh) C_M^T + V_{22} + W]^{-1};$$

$$P_M [(r+1)h] = [F_M^m P_M (rh) (F_M^m)^T + V_{11}] - K_{\Phi_M} (rh) \cdot$$

$$\cdot [C_M P_M (rh) (F_M^m)^T + V_{21}],$$

де матриці коваріації збурень  $\bar{V}$  і завад при вимірюванні  $\bar{W}$  у моделі /68/, /69/ визначаються відповідно

$$M \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{m-1-i} \Phi_M \bar{V} (rh + iT_0) \\ D_{V_M} \bar{V} (rh) + \bar{W} (rh) \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=0}^{m-1} F_M^{m-1-i} \Phi_M \bar{V} (nh + jT_0) \\ \left[ \bar{V}^T (nh) D_{V_M}^T + \bar{W}^T (nh) \right] \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} + W \end{bmatrix} \delta_{rn,ij},$$

де

$$\delta_{rn,ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } r=n, i=j, \\ 0 & \text{при } r \neq n, i \neq j \end{cases}$$

Оцінка швидкодіючого вектора стану  $\bar{X}_B$  у стохастичному середовищі /70/, /71/ здійснюється за допомогою фільтра

$$\hat{X}_B [rh + (i+1)T_0 | rh + iT_0] = F_4 \hat{X}_B [rh + iT_0 | rh + (i-1)T_0] + \\ + G_2 \bar{U}_B (rh + iT_0) + K_{\Phi_B} (rh + iT_0) \{ \bar{Y}_B (rh + iT_0) - C_2 \hat{X}_B [rh + iT_0] \};$$

$$K_{\varphi_0}(rh+iT_0) = F_4 P_0(rh+iT_0) C_2^T [C_2 P_0(rh+iT_0) C_2^T + W]^{-1}; \quad /175/$$

$$P_0[rh+(i+1)T_0] = F_4 P_0(rh+iT_0) F_4^T - F_4 P_0(rh+iT_0) C_2^T \cdot$$

$$\cdot [C_2 P_0(rh+iT_0) C_2^T + W]^{-1} C_2 P_0(rh+iT_0) F_4^T + \varphi_2 V \varphi_2^T$$

Синтез різнотемпових оптимальних ЛКГ-регуляторів стану виконується на основі теореми розділення шляхом мінімізації повільно- і швидкодіючого квадратичних критеріїв оптимальності. При цьому структура законів керування представлена у формі /47/, /52/.

Визначення "повільних" і "швидких" мод  $\bar{y}_m, \bar{y}_b$  у вимірваннях для фільтрів /74/, /75/ виконується на основі

$$\bar{y}_m(rh) = \bar{y}(rh) - \bar{y}_b(rh) = \bar{y}(rh) - C_2 \hat{x}_b(rh); \quad /176/$$

$$\bar{y}_b(rh+iT_0) = \bar{y}(rh+iT_0) - (C_m - D_m K_m) \hat{x}_m(rh)$$

Виконано дослідження умов стійкості різнотемпових замкнених систем керування з фільтрами /74/, /75/ і ЛКГ-регуляторами /47/, /52/.

8. Розроблено метод синтезу різнотемпових комбінованих ЛКГ-регуляторів стану при випадкових збуреннях з дрейфом низької частоти на основі оцінки векторів стану III і III' і вектора низько-частотних випадкових збурень за допомогою різнотемпових фільтрів Калмана. При цьому розглянуто дискретну модель об'єкта з неявно-вираженими властивостями функціонування у двох масштабах часу:

$$\bar{x}_1[(k+1)T_0] = F_1 \bar{x}_1(kT_0) + F_2 \bar{x}_2(kT_0) + G_1 \bar{u}(kT_0) + [\varphi_1 \varphi_2] \begin{bmatrix} \bar{v}_1(kT_0) \\ \bar{v}_2(kT_0) \end{bmatrix}; \quad /177/$$

$$\bar{x}_2[(k+1)T_0] = F_3 \bar{x}_1(kT_0) + F_4 \bar{x}_2(kT_0) + G_2 \bar{u}(kT_0) + [\varphi_3 \varphi_4] \begin{bmatrix} \bar{v}_1(kT_0) \\ \bar{v}_2(kT_0) \end{bmatrix}; \quad /178/$$

$$\bar{y}(kT_0) = C_1 \bar{x}_1(kT_0) + C_2 \bar{x}_2(kT_0) + \bar{w}(kT_0); \quad /179/$$

де  $\{\bar{v}_2(kT_0)\}, \{\bar{w}(kT_0)\}$  - послідовності стаціонарного білого шуму.

Випадкові збурення  $\bar{v}_i(kT_0)$  мають дрейф низької частоти і не вимірюються. Модель таких збурень представлена процесом авторегресії першого порядку:

$$\bar{v}_i[(k+1)T_0] = \Phi \bar{v}_i(kT_0) + \bar{v}_i^*(kT_0), \quad /80/$$

де  $M\{\bar{v}_i^*(kT_0)\} = 0$ . При  $\Phi = (0,8I \pm 0,9999I)$  модель /80/ представляє інтегратор білого шуму. У спектрі процесу  $\bar{v}_i$  переважають складові низької частоти. Збурення  $\bar{v}_i$  можна оцінювати у повільному масштабі часу за допомогою розширеного фільтра Калмана, якщо модель /80/ об'єднати з рівняннями /77/, /78/ об'єкта. Для цього з загальної моделі /77/ - /79/ виділяється III, а до моделі збурення  $\bar{v}_i$  /80/ застосовується збільшений період квантування  $h = mT_0$ . Після перетворень модель об'єднаної III представлена у вигляді

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_M[(r+1)h] \\ \bar{v}_i[(r+1)h] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_M^m & \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{(m-1-i)} \Phi_{M_1} \Phi^i \\ 0 & \Phi^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_M(rh) \\ \bar{v}_i(rh) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u}_M(rh) + \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=0}^{m-2-i} F_M^{(m-2-j-i)} \Phi_{M_1} \Phi^j \\ \sum_{i=0}^{m-1} \Phi^{(m-1-i)} \end{bmatrix} \cdot \bar{v}_i^*(rh + iT_0) + \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{(m-1-i)} \Phi_{M_2} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{v}_2(rh + iT_0); \quad /81/$$

$$\bar{y}_M(rh) = [C_M \quad D_{V_{M_1}}] \begin{bmatrix} \bar{x}_M(rh) \\ \bar{v}_i(rh) \end{bmatrix} + D_M \bar{u}_M(rh) + D_{V_{M_2}} \bar{v}_2(rh) + \bar{w}(rh),$$

а швидкодіюча підсистема:

$$\begin{aligned} \bar{x}_B[rh + (i+1)T_0] &= F_4 \bar{x}_B(rh + iT_0) + G_2 \bar{u}_B(rh + iT_0) + \\ &+ P_3 \bar{v}_B(rh + iT_0) + \Phi_4 \bar{v}_2(rh + iT_0) \end{aligned} \quad /82/$$

$$\bar{y}_B(rh + iT_0) = C_2 \bar{x}_B(rh + iT_0) + \bar{w}(rh + iT_0)$$

Для оцінки вектора стану  $\bar{x}_M$  і збурень  $\bar{v}_1$  об'єднаної моделі III /ВІ/ розроблено "повільний" фільтр Калмана, реалізація якого можлива при виконанні умов:

a/  $\dim(\bar{y}_M) \geq \dim \bar{v}_1$ ;

в/ система

$$\left\{ \begin{array}{c} F_M^m \quad \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{(m-1-i)} \Phi_{M_1} \Phi^i \\ 0 \quad \quad \quad \Phi^m \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{c} \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=0}^{m-1-i} F_M^{(m-2-j-i)} \Phi_{M_1} \Phi^j \\ \sum_{i=0}^{m-1} \Phi^{(m-1-i)} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{(m-1-i)} \Phi_{M_2} \\ 0 \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{c} C_M \quad D_{V_{M_1}} \end{array} \right\}$$

повинна бути стабілізованою.

Оцінка вектору стану  $\bar{x}_B$  виконується за допомогою швидкодіючого фільтра Калмана. При наявності стохастичних збурень /ВІІ/ з дрейфом низької частоти, які оцінюються за допомогою фільтра, структура закону керування складеного різномірного комбінованого регулятора має вигляд:  $\bar{u}_c(rh + iT_0) = -K_M \hat{\bar{x}}_M[rh|(r-1)k] - K_f \hat{\bar{v}}_1[rh|(r-1)h] - K_B \hat{\bar{x}}_B[rh + iT_0|rh + (i-1)T_0]$ ,

де матриці  $K_M, K_B$  синтезуються на основі теореми розділення для ЛКІ-регулювання, а матриця  $K_f$  визначається поза реальним масштабом часу за формулою:

$$K_f = \left[ C_M \left( I - F_M^m - \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M K_M \right)^{-1} \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M \right]^{-1} C_M \cdot \left( I - F_M^m - \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M K_M \right)^{-1} \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{(m-1-i)} \Phi_{M_1} \Phi^i$$

Стійкість замкненої різнотемпової системи керування визначається розташуванням полюсів характеристичних рівнянь

$$\det [zI - F_M^m + \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M K_M] = 0; \quad \det [zI - \Phi^m] = 0;$$

$$\det [zI - F_M^m + K_{\Phi M_1}(rh) C_M] = 0; \quad \det [zI - \Phi^m +$$

$$+ K_{\Phi M_2}(rh) D_{V_{M_1}}] = 0; \quad \det [zI - F_V + G_2 K_B] = 0;$$

$$\det [zI - F_V + K_{\Phi B} C_2] = 0$$

на полі круга одиничного радіуса, що забезпечується шляхом настройки матриць підсилення фільтрів  $K_{\Phi M_1}$ ,  $K_{\Phi M_2}$ ,  $K_{\Phi B}$  і матриць підсилення регуляторів  $K_M$ ,  $K_B$ .

9. Розв'язано теоретичну задачу розділення стохастичної дискретної моделі об'єкта з змінними параметрами:

$$\bar{x}_1[(k+1)T_0] = F_1(kT_0) \bar{x}_1(kT_0) + F_2(kT_0) \bar{x}_2(kT_0) + G_1(kT_0) \bar{u}(kT_0) + \Phi_1 \bar{v}(kT_0); \quad /83/$$

$$\bar{x}_2[(k+1)T_0] = F_3(kT_0) \bar{x}_1(kT_0) + F_4(kT_0) \bar{x}_2(kT_0) + G_2(kT_0) \bar{u}(kT_0) + \Phi_2 \bar{v}(kT_0); \quad /84/$$

$$\bar{y}(kT_0) = C_1 \bar{x}_1(kT_0) + C_2 \bar{x}_2(kT_0) + \bar{w}(kT_0) \quad /85/$$

на III і IIII, в яких динаміка зміни параметрів представлена шляхом реалізації векторних марковських процесів:

$$\bar{v}_M[(r+1)h] = \Phi_M \bar{v}_M(rh) + \bar{v} \bar{v}_M(rh); \quad /86/$$

$$\bar{v}_B[rh + (i+1)T_0] = \Phi_B \bar{v}_B(rh + iT_0) + \bar{v} \bar{v}_B(rh + iT_0); \quad /87/$$

де вектор параметрів  $\bar{v}_M(rh)$  складається з послідовно з'єднаних рядків розширеної матриці  $[F_M^m(rh) \quad \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i(rh) G_M(rh)]$

повільнодіючої підсистеми. При цьому рівняння вимірювання /69/, /71/ представлені у формі

$$\bar{y}_M(rh) = \Psi_M \{ \bar{x}_M[(r-1)h], \bar{u}_M[(r-1)h] \} \bar{v}_M(rh) + D_M(rh) \bar{u}_M(rh) + C_M(rh) \sum_{i=0}^{m-1} F_M^{(m-1-i)}(rh) \Phi_M \cdot \bar{v}[(r-1)h] + D_{V_M}(rh) \bar{v}(rh) + \bar{w}(rh); \quad /88/$$

$$\bar{y}_B(rh + iT_0) = \Psi_B \{ \bar{x}_B[rh + (i-1)T_0], \bar{u}_B[rh + (i-1)T_0] \} \cdot \quad /89/$$

$$\hat{\sigma}_B^2(rh + i\tau_0) + C_2 P_2 \bar{v}[rh + (i-1)\tau_0] + \bar{w}(rh + i\tau_0);$$

де матриці  $\Psi_M(\bar{x}_M, \bar{u}_M) = C_M \text{diag}\{\bar{x}_M^T \quad \bar{u}_M^T\}$ ;

$$\Psi_B(\bar{x}_B, \bar{u}_B) = C_B \text{diag}\{\bar{x}_B^T \quad \bar{u}_B^T\}$$

10. Розроблено метод роздільного почергового оцінювання векторів змінних стану і змінних динамічних параметрів технологічних процесів з подільними рухами в стохастичному середовищі при різномовній дискретизації.

Роздільне почергове оцінювання динамічних параметрів  $\hat{\sigma}_M, \hat{\sigma}_B$  і змінних стану  $\hat{x}_M, \hat{x}_B$  в реальному масштабі часу виконується за допомогою різномовних фільтрів Калмана на основі інформації про вектори вихідних вимірювань /88/, /89/ при певній "фазировці" даних, відповідно якій оцінка параметрів  $\hat{\sigma}_M[(r+1)h]$ ,  $\hat{\sigma}_B[rh + (i+1)\tau_0]$  реалізується відповідно на основі оцінки змінних стану  $\hat{x}_M[(r-1)h]$ ,  $\hat{x}_B[rh + (i-1)\tau_0]$ . Після оцінки векторів параметрів  $\hat{\sigma}_M[(r+1)h]$ ,  $\hat{\sigma}_B[rh + (i+1)\tau_0]$  проводиться оцінка стану  $\hat{x}_M[(r+1)h]$ ,  $\hat{x}_B[rh + (i+1)\tau_0]$

Основні рівняння фільтрів для оцінки параметрів і стану III мають вигляд

$$\hat{\sigma}_M[(r+1)h] = \Phi_K \hat{\sigma}_M(rh) + K \hat{\varphi}_M \{ \bar{y}_M(rh) - \Psi_M[\hat{x}_M[(r-1)h], \bar{u}_M[(r-1)h] \cdot \hat{\sigma}_M(rh) - D_M(rh) \bar{u}_M(rh) \};$$

$$\hat{x}_M[(r+1)h | rh] = \hat{F}_M^m[(r+1)h] \cdot \hat{x}_M[rh | (r-1)h] + \sum_{i=0}^{m-1} \hat{F}_M^i[(r+1)h] \hat{G}_M[(r+1)h] \bar{u}_M(rh) + K \hat{\varphi}_M(rh) \cdot \{ \bar{y}_M(rh) - C_M \hat{x}_M[rh | (r-1)h] - D_M \bar{u}_M(rh) \}$$

Для оцінки параметрів і стану III основні рівняння фільтрів представлені у формі

$$\hat{\sigma}_B[rh + (i+1)\tau_0] = \hat{\sigma}_B^i(rh + i\tau_0) + K \hat{\varphi}_B(rh + i\tau_0)$$

$$\cdot \{ \bar{y}_B(rh + i\tau_0) - Y_B[\hat{x}_B[rh + (i-1)\tau_0], \bar{u}_B[rh + (i-1)\tau_0] \} \hat{\sigma}_B^i(rh + i\tau_0);$$

$$\hat{x}_B[rh + (i+1)\tau_0 | rh + i\tau_0] = \hat{F}_B^i[rh + (i+1)\tau_0] \cdot \hat{x}_B[rh + i\tau_0 | rh + (i-1)\tau_0] +$$

$+ \hat{G}_2[rh + (i+1)T_0] \bar{u}_B(rh + iT_0) + K_{PB}(rh + iT_0) \{ \bar{y}_B(rh + iT_0) - C_2 \hat{x}_B(rh + iT_0) \}$ ,  
 де  $\hat{F}_M^m[(r+1)h]$ ,  $\sum_{i=0}^{m-1} \hat{F}_M^i[(r+1)h] \hat{G}_M^i[(r+1)h]$ ,  $\hat{F}_4[rh + (i+1)T_0]$ ,  
 $\hat{G}_2[rh + (i+1)T_0]$  - оцінки матриць параметрів III і III', які  
 складаються з оцінених векторів параметрів  $\hat{b}_M^i[(r+1)h]$ ,  
 $\hat{b}_B^i[rh + (i+1)T_0]$ .

Проведено дослідження стійкості і збіжності почергового оцінювання параметрів стану /90/ - /93/.

II. Виконано синтез адаптивного повільно- і швидкодіючого ЛКГ-регулятора стану у формі /47/, /52/. Адаптація матриць підсилення  $K_M, K_B$  проводиться після виконання оцінки матриць параметрів  $\hat{F}_M^m, \sum_{i=0}^{m-1} \hat{F}_M^i \hat{G}_M^i, \hat{F}_4, \hat{G}_2$ .

Розроблено оптимальну систему регулювання вектора вихідних вимірювань  $\bar{y}(rh) = \bar{y}_M(rh) + \bar{y}_B(rh + iT_0)$  шляхом введення помилки регулювання в рекурентній формі:  $\bar{E}[rh + (i+1)T_0] = \bar{E}[rh + iT_0] + \bar{g} - \bar{y}(rh + iT_0)$ ,  $E(0) = 0$ , де  $\bar{g}$  - вектор завдаючих дійнь. У цьому випадку закон оптимального керування складеного РЦР має вигляд

$$\bar{u}_c(rh + iT_0) = - [K_M \quad K_B \quad K_1] \begin{bmatrix} \hat{x}_M(rh) \\ \hat{x}_B(rh + iT_0) \\ \bar{E}(rh + iT_0) \end{bmatrix} \quad /94/$$

12. Розроблено методику вибору періодів квантування при проектуванні різнотемпової системи керування на основі введення у вихідну математичну модель неперервної системи малого параметра з наступним аналізом залежності малого періоду квантування від відношення  $O(\mu)$ . Якщо III задана дискретною моделлю /68/, то можна припустити, що  $h = O(\mu)$  і відповідні матриці в моделях /46/ і /68/ в детермінованому середовищі будуть рівнятись

$$F_M^m = F_M^m(h) + O(\mu); \quad \sum_{i=0}^{m-1} F_M^i G_M^i = H(h) + O(\mu).$$

Швидкодіюча підсистема /51/ узгоджується з результатами /70/, якщо не брати до уваги похибки першого порядку  $O(\delta^M)$ , тобто  $F_y = \Psi_B(\mathcal{T}_0) + O(\delta^M)$ ;  $G_2 = H_B(\mathcal{T}_0) + O(\delta^M)$ . Вихідні матриці  $C_{MN}$ ,  $D_{MN}$  у виразі /44/ відповідають вихідним матрицям ПП /69/, якщо не брати до уваги похибки першого порядку  $O(\delta^M)$ .

На основі здобутих у роботі теоретичних результатів розроблено математичне і програмне забезпечення наступних систем керування багатовимірними технологічними процесами.

1. Розроблено математичне забезпечення двовимірної різномірнової адаптивної системи керування відпарною колоною на установці каталітичного риформінгу бензинів на основі різномірнової дискретизації при синтезі адаптивних МЦР в детермінованому середовищі. Двовимірна адаптивна система забезпечує високу точність стабілізації температури  $Y_2$  на контрольній тарілці і витрат  $R_1$  готового продукту, який поступає на реактор риформінгу, що забезпечує найбільш сприятливий режим роботи каталізатора в реакторі. Система реалізує слідування величини рівня в кубі колони  $Y_1$  за зміною завдання  $G_1 = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2$ , де  $X_1$  - тиск у колоні, а  $X_2$  - керуваний сигнал на клапан витрат готового продукту. Керуваними діями в системі є витрати сировини  $U_1$  і витрати теплоносія  $U_2$  в колону. Час запізнення  $\mathcal{T}_1$  в каналі витрат сировини змінюється в межах  $2 + 5$  с, а в каналі витрат теплоносія:  $\mathcal{T}_2 = 15 \div 42$  с. Для синтезу МЦР в першому каналі "  $U_1 - Y_1$  " період квантування каналу  $\mathcal{T}_{01} = 2$  с;  $\mathcal{T}_{02} = 2^q \mathcal{T}_{01} = 8$  с при  $q = 2$  по другому каналу керування "  $U_2 - Y_2$  ".

Синтезована різномірна система цифрового керування забезпечує оцінку по РМНК /28/ двадцяти коефіцієнтів дискретної різномірнової моделі об'єкта при швидкодії настройки від 20 до 40 малих періодів  $\mathcal{T}_{01}$  по першому каналу і 10-ти великих періодів  $\mathcal{T}_{02}$  по другому каналу. Швидкодія замкненої різномірнової системи

в перехідному режимі складає 48 періодів  $T_0$ , або 12 періодів  $T_{0k}$ . Замкнена система забезпечує автономне керування в установлених режимах.

2. На основі методу синтезу лінійних адаптивних МЦР для багатовимірних стохастичних лінійних об'єктів з багатьма різними запізненнями в каналах керування розроблено математичне і програмне забезпечення для двовимірної системи цифрового керування ректифікаційною колоною. На основі моделювання встановлено, що швидкодія перехідних процесів у замкненій адаптивній системі керування разом з оцінкою параметрів МЦР по РМНК рівняється 50-ти періодам квантування ( $T_0 = 5c$ ). Точність системи керування в установлених режимах  $\pm 0,2\%$ .

3. Виконано проектування оптимального нелінійного двовимірного адаптивного цифрового регулятора для керування хімічним реактором ідеального змішування, кінетична модель якого має вигляд

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q}{V}(c_i - c) - K_0 c \exp\left[-\frac{E}{RT_p}\right]; \quad /95/$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{V}(T_i - T_p) - K_0 \frac{\Delta H}{\rho C_p} c \exp\left[-\frac{E}{RT_p}\right] - \frac{\rho_c C_{pc}}{V \rho C_p} \cdot Q_c(T_c - T_i), \quad /96/$$

де  $c$  - концентрація вихідного продукту;  $T_p$  - температура реактора. Основна задача керування реактором, в якому протікає екзотермічна реакція з виділенням тепла, полягає в забезпеченні високої точності регулювання концентрації  $c$  на основі стабілізації температури  $T_p$  при зміні  $Q, Q_c, T_i, c_i, T_c, V$ .

Оптимальний закон керування нелінійного МЦР сформовано на основі /38/, в якому витрати реагуючої суміші  $Q$  і потоку охолоджуючої води  $Q_c$  використовуються як керуючі діяння. Проведено моделювання адаптивної системи керування реактором ідеального змішування /95/, /96/ з різними запізненнями  $d_1 = 3, d_2 = 4$  при

$T_c = 2$  с. Показано, що швидкодія замкненої системи в перехідному режимі дорівнює 15-ти періодам квантування, а точність в установленому режимі  $\pm 0,05\%$ . Оцінка по РМІК 13-ти параметрів адаптивного цифрового регулятора здійснюється за 30 періодів квантування при значних відхиленнях початкових значень оцінок від оптимальних.

4. Розроблено стохастичну різнотемпову п'ятивимірну дискретну модель двокорпусного випарного апарату з періодами квантування  $\Delta t = 120$  с і швидкодіючої підсистеми  $T_c = 12$  с, тобто  $\mu = 10$  відповідно [5]. Розроблено програмне забезпечення і проведено моделювання різнотемпової системи керування двокорпусним випарним апаратом, яке включає оцінку змінних стану в двох масштабах часу за допомогою різнотемпових фільтрів Калмана і реалізацією різнотемпового ЛКІ-регулятора. Показано, що при розстроєних початкових оцінках 4-х змінних стану  $\Pi_1$  на 15% від номінальних оптимальна оцінка повільних змінних стану відбувається за 9 - 12 періодів  $\Delta t$ . Показано збіжність векторів керування і стану до ustalених значень. На основі моделювання показано, що в результаті застосування різнотемпової дискретизації при реалізації п'ятивимірної системи керування, яка розділена на чотиривимірну повільнодіючу і одновимірну швидкодіючу підсистеми з ЛКІ-регуляторами, обчислювальні витрати зменшуються в 9 разів в порівнянні з однотемповою системою керування.

5. Розроблено програмне забезпечення і проведено моделювання двовимірної адаптивної різнотемпової системи керування термозмішувальною установкою з почерговою оцінкою змінних стану і динамічних параметрів при випадкових збуреннях типу білого шуму. В результаті моделювання встановлено, що вірогідна оцінка трьох параметрів  $\Pi_1$  за допомогою фільтра Калмана здійснюється за 10 - 20 періодів квантування  $\Delta t$ , а оцінка трьох параметрів  $\Pi_2$

відбувається за 17 - 22 коротких періодів квантування  $T_0$ . Стійка і вірогідна оцінка змінних стану III і III здійснюється на основі різнотемпових фільтрів Калмана відповідно за 20 довгих  $h$  і за 65 коротких періодів квантування  $T_0$ .

6. Виконано модифікацію принципів різнотемпового керування для взаємозв'язаних ієрархічних систем з розділяючими рухами, які відрізняються швидкозмінною динамікою в локальних підсистемах нижнього рівня і повільнозмінною динамікою на другому рівні керування, для якого підходить повільний темп квантування з періодом  $h = mT_0$ .

7. Розроблено мікропроцесорну адаптивну систему керування двовимірними об'єктами з компенсацією змінних запізнювань при різнотемповій дискретизації, яка включає розробку функціональної схеми, технічну реалізацію на МП засобах і керувачий алгоритм для синхронізації роботи окремих технічних пристроїв МП системи керування.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Розроблено теоретичні положення і методологію проектування адаптивних і різнотемпових систем керування багатовимірними технологічними процесами з розділяючими рухами, які ґрунтуються на наступних результатах і висновках.

І. Запропоновано новий спосіб застосування різнотемпової дискретизації при синтезі адаптивних МЦР для багатовимірних лінійних об'єктів з різними невідомими і змінними запізненнями, представлених дискретною матричною поліноміальною моделлю типу "вхід - вихід", в якій передбачена дискретизація вхідних і вихідних координат об'єкта з різними періодами квантування.

Розроблено метод синтезу різнотемпових оптимальних БЦР на основі бажаної дискретної моделі багатовимірної замкненої системи

тилу "вхід - вихід". Розроблено алгоритм різнотемпової реалізації РМНК для оцінки параметрів багатовимірної дискретної моделі об'єкта.

Проведено аналіз стійкості різнотемпової процедури РМНК на основі застосування модифікованих функцій Ляпунова. Проведено доведення збіжності адаптивної системи керування з різнотемповим БЦР.

2. Виконано модифікацію методу синтезу адаптивних БЦР для багатовимірних стохастичних лінійних об'єктів з різними запізненнями в каналах керування, представлених моделлю авторегресії і ковзного середнього з допоміжним вхідним сигналом, на основі розділення рухів об'єкта, які зміщені на величини пристроїв запізнювань відносно найменшого запізнювання  $d_{min}$ . Доведено теорему про мінімізацію дисперсії помилок завбачення вектора вихідних змінних на час найменшого запізнювання.

3. Розроблено метод синтезу нелінійних адаптивних БЦР для багатовимірних нелінійних стохастичних об'єктів з різними запізненнями в каналах керування, який забезпечує проектування структури закону керування БЦР, незалежної від запізнювання об'єкта.

4. Розроблено інженерну методику розділення вихідної однотемпової дискретної моделі технологічного процесу, який має неявно виражені властивості функціонування в  $P$  масштабах часу, на  $p$  різнотемпових підсистем у просторі стану.

5. Розроблено методологію проектування оптимальних РЦР стану для об'єктів з подільними рухами в детермінованому і стохастичному середовищі. При цьому:

- розроблено паралельну стратегію проектування складених різнотемпових дискретних ЛК- і ЛКГ-регуляторів стану для технологічних процесів, представлених інваріантними за часом моделями у просторі стану;

- запропоновано методику проектування різнотемпових спостерігачів і фільтрів для оцінки невимірюваних повільно- і швидкодіючих змінних стану. Проведено дослідження асимптотичної стійкості різнотемпових замкнених систем керування з спостерігачами і фільтрами змінних стану;

- розроблено методику проектування складеного РЦР стану для багатовимірних об'єктів з запізненнями з компенсацією повільно-змінних збурень з середньою величиною, відмінною від нуля. Методика дозволяє виконати математичний опис повільно- і швидкодіючої підсистем об'єкта з вимірностями векторів стану, незалежними від запізнення і різних періодів квантування;

- розроблено методику вибору періодів квантування при проектуванні різнотемпової системи керування;

- розроблено метод синтезу різнотемпових комбінованих ЛКГ-регуляторів стану при випадкових збуреннях з дрейфом низької частоти на основі оцінки векторів стану III і IIII, і вектора низькочастотних збурень за допомогою різнотемпових фільтрів Калмана.

6. Розроблено теоретичні положення по проектуванню різнотемпових адаптивних систем керування багатовимірними стохастичними процесами з подільними рухами з почерговою оцінкою змінних стану і динамічних параметрів. При цьому:

- розв'язано теоретичну задачу розділення стохастичної дискретної моделі об'єкта з змінними параметрами на повільно- і швидкодіючу підсистему, в яких динаміка зміни параметрів представлена реалізацією векторних марковських процесів;

- розроблено різнотемпові фільтри для почергового розділеного субоптимального оцінювання векторів змінних стану і динамічних параметрів III і IIII на основі загального вектора вихідних вимірювань;

- проведено аналіз стійкості і збіжності почергового

оцінювання динамічних параметрів і змінних стану при різномірно-  
вій дискретизації;

- проведено проектування складеного різномірного адаптивного  
ЛКГ-регулятора.

7. На основі одержаних у роботі теоретичних результатів роз-  
роблено математичне і програмне забезпечення: двовимірної різно-  
мірної адаптивної системи керування відпарною ректифікаційною  
колоною на установці каталітичного риформінгу бензинів, двовимір-  
ної адаптивної системи керування хімічним реактором ідеального  
змішування; різномірної п'ятивимірної системи керування дво-  
корпусним випарним апаратом; адаптивної різномірної системи  
керування термозмішувальною установкою. Виконано проектування  
універсальної мікропроцесорної адаптивної системи керування дво-  
вимірними об'єктами з компенсацією змінних запізнювань об'єктами  
при різномірній дискретизації.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В НАСТУПНИХ РОБОТАХ

1. Романенко В.Д. Синтез самонастраивающихся регуляторов для  
многомерных стохастических объектов с различными запаздываниями  
в каналах управления //Адаптив.системы автомат.упр.: Респ. меж-  
вед.науч.-техн.сб. - 1989. - Вып.17. - С.31-40.

2. Романенко В.Д. Оптимальное адаптивное управление нелиней-  
ными многомерными технологическими объектами с оценкой параметров  
и переменных состояния //Там же. - 1988. - Вып.16. - С.12-20.

3. Романенко В.Д. Принцип асинхронной дискретизации при синте-  
зе многомерных самонастраивающихся цифровых регуляторов для  
объектов с неизвестными различными запаздываниями //Там же. -  
1988. - Вып.16. - С.38-47.

4. Романенко В.Д. Микропроцессорная самонастраивающаяся

система управления нестационарными многомерными химико-технологическими объектами с неизвестными различными запаздываниями //Там же. - 1989. - Вып.17. - С.41-50.

5. Романенко В.Д. Проектирование самонастраивающихся многомерных регуляторов для нелинейных объектов с различными запаздываниями при случайных возмущениях //Там же. - 1990. - Вып.18. - С.7-18.

6. Романенко В.Д. Микропроцессорная самонастраивающаяся робастная система управления неустойчивыми и неминимально-фазовыми объектами //Там же. - 1991. - Вып.19. - С.

7. Романенко В.Д. Синтез разнотемпового регулятора с наблюдателем состояния для непрерывных объектов, функционирующих в двух масштабах времени //Там же. - 1992. - Вып.20. - С.94-104.

8. Романенко В.Д. Проектирование разнотемповых регуляторов при случайных возмущениях с оценкой состояния в двух масштабах времени //Вестн.Киев.политехн.ин-та. Техн.кибернетика. - 1992. - Вып.16. - С.3-11.

9. Романенко В.Д. Синтез адаптивных многомерных цифровых регуляторов с компенсацией различных неизвестных и изменяющихся запаздываний объекта //Там же. - 1990. - Вып.14. - С.11-18.

10. Романенко В.Д. Устойчивость самонастраивающихся многомерных систем с различными неизвестными запаздываниями при разнотемповой дискретизации //Там же. - 1989. - Вып.13. - С.3-9.

11. Романенко В.Д. Оптимальное дискретное управление многомерным объектом с оценкой переменных состояний и возмущений //Адаптив.системы автомат.упр.: Респ.мехвед.науч.-техн.об. - 1987. - Вып.15. - С.33-39.

12. Романенко В.Д. Автоматическая настройка системы непосредственного цифрового управления процессом нейтрализации //Там же. - 1978. - Вып.6. - С.33-38.

13. Романенко В.Д., Игнатенко В.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ: Уч.пособие для студ. вузов. - К.: Вища школа, 1990. - 334 с.

14. Zgurovsky M.Z., Romanenko V.D. Comparison of adaptive control algorithms of multivariable processes with varying delays //Evaluation of adaptive control strategies in industrial applications, Proceedings of the IFAC Workshop, Tbilisi, USSR, 17-20 October 1989. - Pergamon press, 1990, Number 7. - P.29-34.

15. Романенко В.Д. Методы проектирования многомерных регуляторов с разнотемповой дискретизацией в контурах управления //Тр. IV международн. конф. "Проблемы комплексной автоматизации". Секция 2. - Киев, 1990. - С.123-127.

16. Романенко В.Д. Синтез многомерных регуляторов состояния с компенсацией медленно изменяющихся возмущений при разнотемповой дискретизации //Вестн.Киев.политехн.ин-та. Техн.кибернетика, - 1991. - Вып.15. - С.3-11.

17. Романенко В.Д. Адаптивное цифровое управление нелинейными химико-технологическими объектами с нестационарными параметрами //Химическая технология. - 1988. - № 3. - С.58-63.

18. Романенко В.Д. Обобщение математического обеспечения самонастраивающихся систем управления нестационарными многомерными объектами с различными запаздываниями //Тез.докл. VI всесоюзн. конф. "Опыт создания специального программного обеспечения АСУ ТП". - Черновцы, 1-8 ноября 1988. - С.29.

19. Медведев Р.Б., Бондарь Д.Д., Романенко В.Д. АСУ ТП в металлургии: Уч.пособие. - М.: Металлургия, 1987. - 256 с.

20. Романенко В.Д. Автоматическая настройка параметров регулятора НЧУ и периода квантования /Алгоритмический и программный модули/ //Тез.докл. всесоюзн. науч.-техн. конф. "Проблемы математ., програм. и информац.обеспеч. АСУ ТП" Ч. I. - Черновцы, 1979.

21. Романенко В.Д. Теоретическое обобщение методов проектирования разнотемповых цифровых систем управления //Тез.докл. международн.школы-семинара "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами". - Туапсе, 1992.

22. Згуровский М.З., Романенко В.Д., Якимчук Н.К., Тимошук О.Л. Адаптивное цифровое управление промышленными объектами в условиях параметрической неопределенности //Тез.докл. У всесоюзн.конф."Проблемы и задачи создания и внедрения программного обеспечения АСУ ТП" /М.: ЦНИИЭИ. Приборы, средства автоматиз. и упр., 1986. - Вып.4. - С.11.

23. Kostjuk V.I., Azhugin V.V., Korol V.V., Movchan A.P., Romanenko V.D. Automated control system of neutralization in mineral fertilizer production //6th congress IFAC Boston Cambridge, U.S.A., 1975.

24. Романенко В.Д., Бидюк П.И., Моргун В.А. Микропроцессорная система адаптивного управления технологическими объектами с переменным запаздыванием //Вестн.Киев.политехн.ин-та. Техн.кибернетика. - 1988. - Вып.12. - С.14-18.

25. А.С.990795, СССР, МКИ С 10 35/04. Устройство для автоматического управления блоком гидроочистки, установки каталитического риформинга /В.В.Ажогин, А.М.Демченко, В.Д.Романенко, Б.И.Ковальский и др. Опубл.23.01.83, Бюл.№ 3. - I с.

26. Ажогин В.В., Згуровский М.З., Романенко В.Д., Ильин В.П. Математическое и информационное обеспечение АСУ ТП установки каталитического риформинга бензинов //Науч.-техн.реферат.сб."Автоматизация и контр.-измерит.приборы". - М.: ЦНИИЭнефтехим. - 1983. - Вып.5. - С.2-6.

27. А.С.1095921, СССР, МКИ В 01 3/42. Система автоматического управления тепловым режимом ректификационной колонны /В.В.Ажогин, В.Д.Романенко, А.М.Демченко, И.Я.Шалиро. Опубл.07.06.84, Бюл.

Киев. политехн. ин-та. Техн. кибернетика. - 1976. - Вып. 2. - С. 43-46.

№ 21. - 2 с.

28. А.С.1316689, СССР, МКИ В 01 3/24. Самонастраивающаяся система автоматического цифрового управления ректификационной колонной /В.Д.Романенко, М.З.Згуровский, П.И.Бидок. Оpubл. 05.11.85, Бюл.№ 22. - 2 с.

29. А.С.1357423, СССР, МКИ С 10 35/00. Устройство для автоматического управления тепловым режимом установки каталитического риформинга бензинов /С.С.Руденко, М.З.Згуровский, В.Д.Романенко, П.И.Бидок. Оpubл.07.12.87, Бюл.№ 45. - 3 с.

30. А.С.1447839, СССР, МКИ С 10 35/00. Устройство для автоматического управления тепловым режимом установки каталитического риформинга /С.С.Руденко, П.И.Бидок, В.Д.Романенко. Оpubл. 30.12.88, Бюл.№ 48. - 2 с.

31. А.С.1143763, СССР, МКИ С 10 9/20. Устройство для автоматического управления процессом нагрева сырья в трубчатой печи /М.З.Згуровский, В.Д.Романенко, С.С.Руденко и др. Оpubл.07.03.85, Бюл.№ 9. - 2 с.

32. А.С.874746, СССР, МКИ С 10 9/20. Устройство для автоматического управления трубчатой печью /В.В.Ажогин, М.З.Згуровский, В.Д.Романенко и др. Оpubл.23.10.81, Бюл.№ 39. - 2 с.

33. А.С.1107887, СССР, МКИ В 01 37/04. Система автоматического управления процессом промывки барабанного вакуумного фильтра /В.В.Ажогин, В.Д.Романенко, М.З.Згуровский и др. Оpubл.15.08.84, Бюл.№ 30. - 2 с.

34. А.С.1297009, СССР, МКИ 05 В 13/02. Адаптивная система управления объектами с запаздыванием /В.В.Ажогин, М.З.Згуровский, П.И.Бидок, В.Д.Романенко и др. Оpubл.15.03.87, Бюл.№ 10. - 1 с.

35. А.С.1189474, СССР, МКИ В 01 9/02. Система автоматического управления блоком регенеративных кристаллизаторов в производстве парафинов /В.В.Ажогин, М.З.Згуровский, П.И.Бидок, В.Д.Рома-

ненко и др. Оpubл.07.II.85, Бюл.№ 41. - I с.

36. А.С.И181675, СССР, МКИ В 01 9/02. Система автоматического управления тепловым режимом блока регенеративных кристаллизаторов производства парафинов /В.В.Ажогин, П.И.Бидюк, М.З.Згуровский, В.Д.Романенко и др. Оpubл.30.09.85, Бюл.№ 36. - I с.

37. А.С.765212, СССР, МКИ С 01 С I/18. Система автоматического регулирования реактором-нейтрализатором в производстве аммиачной селитры /В.И.Костюк, В.В.Ажогин, В.Д.Романенко и др. Оpubл. 23.09.80, Бюл.№ 35. - I с.

38. А.С.И126593, СССР, МКИ С 10 33/00. Устройство для автоматического управления процессом обезвоживания и обессоливания нефти в отстойном аппарате /В.В.Ажогин, М.З.Згуровский, В.Д.Романенко и др. Оpubл.30.II.84, Бюл.№ 44. - 2 с.

39. А.С.691177, СССР, МКИ В 01 I/22. Способ управления процессом абсорбции в производстве минеральных удобрений /В.И.Костюк, В.В.Ажогин, В.Д.Романенко и др. Оpubл.15.10.79, Бюл.№ 39. - I с.

40. А.С.716976, СССР, МКИ С 01 С I/18. Устройство для автоматического управления процессом нейтрализации /В.И.Костюк, В.В.Ажогин, В.Д.Романенко и др. Оpubл.25.02.80, Бюл.№ 7. - I с.

41. А.С.789715, СССР, МКИ 01 25/04. Устройство для определения температуры кристаллизации плава /В.В.Ажогин, Ш.А.Кононицын, А.П.Мовчан, В.Д.Романенко. Оpubл.23.12.80, Бюл.№ 47. - I с.

42. А.С.704898, СССР, МКИ С 01 С I/18. Система автоматического управления процессом промывки сокового пара в производстве аммиачной селитры /В.И.Костюк, В.В.Ажогин, В.Д.Романенко и др. Оpubл. 25.12.79, Бюл.№ 47. - I с.

43. Ажогин В.В., Романенко В.Д. Адаптивная система управления процессом нейтрализации в производстве аммиачной селитры //Вестн. Киев.политехн.ин-та. Техн.кибернетика. - 1978. - Вып.2. - С.45-48.

44. Ажогин В.В., Романенко В.Д., Згуровский М.З. Система оптимального машинного управления блоком каталитического реформинга бензинов //Вестн.Киев.политехн.ин-та. Техн.кибернетика. - 1981. - Вып.5. - С.3-6.

45. Ажогин В.В., Романенко В.Д., Болтянский Г.В., Згуровский М.З. Оптимизации параметров многосвязных систем регулирования на основе принципа автономности //Адаптив.системы автомат.упр.: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - 1981. - Вып.9. - С.31-38.

46. А.С.851222, СССР, МКИ ОI 25/02. Устройство для измерения температуры кристаллизации веществ /В.В.Ажогин, А.П.Мовчан, В.Д.Романенко и др. Опубл.30.07.81, Бюл.№ 28. - I с.

47. Романенко В.Д. Параллельная стратегия синтеза составного разнотемпового дискретного регулятора с наблюдателем состояния //Кибернетика и вычислительная техника. - 1993. - Вып.97. - С. 78-86.



Нап. до друку. 19.07.93 Формат 60 × 84/16 Папір офс.

Друк. офс. Умови друку. арк. 2.5 Обл.-лн. арк. 2.8 тир. 100

Зач. 3-1090

Книзьця книжков. друкарня наукової книги. Київ, Реція, 4.

470902

AB 26.844

**AB 26.844**