

Національний університет  
харчових технологій

На правах рукопису

УДК 681.513.5:664.12

Луцька Наталія Миколаївна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ  
ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ  
НЕПЕРЕРВНОГО ТИПУ

05.13.07 Автоматизація технологічних процесів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ-2006

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій.

Науковий керівник: доктор технічних наук,  
професор Ладанюк Анатолій Петрович,  
НУХТ, зав.кафедрою автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій,  
заслужений діяч науки і техніки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
професор Жученко Анатолій Іванович,  
професор кафедри Автоматизації хімічних  
виробництв Національного технічного  
університету НТУУ "КПІ"

кандидат технічних наук,  
доцент Маноха Людмила Юріївна,  
доцент кафедри Інформаційних систем НУХТ

Провідна установа: НВК "Київський інститут автоматики",  
Міністерство промислової політики, м. Київ

Захист відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 року о \_\_\_ годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за  
адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська, 68, ауд. \_\_\_\_\_.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових  
технологій за адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

В.М.Філоненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Необхідність та ефективність автоматизації виробництва визначаються потребами управління ним, що дає можливість досягти високих техніко-економічних показників за рахунок зменшення витрат кінцевого продукту, витрат сировини, палива, енергії. Ефективні автоматичні та автоматизовані системи управління різного рівня дають можливість не лише забезпечувати підтримку окремих технологічних параметрів на заданому рівні, а й здійснювати оперативне управління з визначенням оптимальних технологічних режимів роботи як окремих об'єктів, так і технологічних комплексів (ТК).

Особливо актуальними стають досконалі системи автоматизації, які за статистичними оцінками дозволяють зменшити витрати енергоносіїв на 10...12%. Крім того, за даними діяльності передових фірм 25% ефекту в роботі підприємств досягається за рахунок інформаційного забезпечення і лише 6% - за рахунок нових технологій. Все це призводить до необхідності підвищення ефективності систем контролю та управління окремими технологічними агрегатами та підсистемами. Ці підсистеми мають сукупність координат, що регулюються окремо (локально) та як наслідок негативно впливають на роботу ТК, до якого вони входять.

Таким чином, розробка нових підходів при управлінні підсистемами ТК на основі оптимальних та робастних регуляторів є актуальною науково-технічною проблемою.

В даній роботі **об'єктом досліджень** є підсистеми теплообміну нахиленої дифузійної установки (ДУ) та рівнів випарної установки (ВУ) цукрового виробництва, оскільки їх оптимальне регулювання веде до покращення якості готової продукції та зменшення енергетичних витрат всього виробництва в цілому.

Так як існуючі схеми регулювання вказаних підсистем не задовольняють необхідній якості регулювання, а локальні регулятори не враховують перехресних зв'язків за каналами управління та збурення, необхідно використати багатовимірні оптимальні регулятори, в тому числі робастні.

**Метою роботи** є підвищення техніко-економічних показників функціонування ТК цукрового заводу і зменшення витрат енергоносіїв шляхом створення автоматизованої системи управління на основі багатовимірних оптимальних регуляторів, що розроблені з використанням адекватних математичних моделей.

При синтезі оптимальних регуляторів для вказаних підсистем визначені такі основні задачі:

- розробка методів оцінки координат стану об'єкта;
- оперативна оптимізація технологічних режимів ВУ та ДУ (їх пошук та підтримання);

- розробка комплексу задач оптимального регулювання об'єктами ВУ та ДУ, що включає:
  - оптимальну стабілізацію параметрів підсистем ТК;
  - задачу оптимальної швидкодії (пуск, перехід з режиму на режим, зупинка);
  - робастне управління.

**Наукова новизна.** При вирішенні поставлених задач одержані нові наукові результати:

- виявлені однакові характеристики для підсистем ДУ та ВУ, що дало змогу виділити клас об'єктів з однаковими властивостями;
- доведено, що для даного класу об'єктів доцільно використовувати багатовимірні оптимальні регулятори, які побудовані за алгоритмами аналітичного конструювання оптимальних регуляторів та робастними регуляторами ( $H_2$ ,  $H_\infty$ );
- виведені та адаптовані математичні моделі підсистем ДУ та ВУ, зокрема в просторах параметрів стану, на основі яких розроблені оптимальні регулятори;
- на базі статистичного аналізу змінних підсистем та імітаційного моделювання виявлені умови, при яких даний клас об'єктів з оптимальними регуляторами має найкращі перехідні процеси, що дало змогу побудувати систему автоматичного керування на основі оптимальних регуляторів за однією з трьох структур.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена система автоматичного управління підсистемами ДУ та ВУ в складі ТК цукрового виробництва. На основі алгоритмів оптимальних регуляторів розроблено програмне забезпечення мікропроцесорної автоматизованої системи управління ТК.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету харчових технологій кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та передані для впровадження на цукровий завод, що підтверджено відповідними довідками.

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових конференціях Національного університету харчових технологій в 2002-2005 рр.; Міжнародних конференціях з автоматичного управління "Автоматика-2003" (м.Севастопіль, 2003), "Автоматика-2004" (м.Київ, 2004) та "Автоматика-2005" (м.Харків, 2005); Міжнародній науково-практичній конференції "Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології" (м.Чернівці, 2004р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 15 друкованих праць, в яких викладено основний зміст виконаних досліджень, з них 5 статей в фахових виданнях, один деклараційний патент, тези доповідей на наукових конференціях.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, списку літератури з 110 найменувань і 6 додатків. Повний обсяг дисертації 225 стор., з яких зміст викладено на 133 стор. друкованого тексту, містить 29 рисунків, 2 таблиці та 6 додатків.

**Основні положення, що виносяться на захист:** результати досліджень властивостей підсистем ТК цукрового заводу (нахиленої дифузійної та багатокорпусної випарної установок) та процесів їх функціонування; критерії та задачі оптимізації роботи підсистем; математичні моделі підсистем; математичні методи, алгоритми, структура та параметри оптимальних регуляторів для вказаних підсистем; технічне та програмне забезпечення для реалізації оптимальних регуляторів.

**Особистий внесок у розробку наукових результатів.** Особисто автором розроблені положення, викладені в розділі автореферату "Основні положення, що виносяться на захист". В публікаціях у співавторстві особистий внесок автора полягає в наступному: в [1, 7] виведені аналітичні розв'язки оптимальних регуляторів та отримані результати моделювання систем з розподіленими параметрами; в [2, 12] розроблено комплекс критеріїв та структурна схема на базі інтелектуальної підсистеми підтримки прийняття рішень (ІППР) для ВУ цукрового заводу; в [3] розроблено автоматизовану систему управління ВУ на основі ІППР; в [4, 13, 14] за алгоритмом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів синтезовано оптимальний регулятор для підсистеми ДУ на основі виведеної математичної моделі та зроблено порівняльний аналіз результатів моделювання системи з оптимальними та локальними регуляторами; в [5, 15] розроблено комплекс критеріїв та задач оптимізації роботи підсистем ТК харчової промисловості, в тому числі задачі робастності; в [6] виведено математичну модель підсистеми ДУ; в [8-11] за алгоритмом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів синтезовано оптимальний регулятор для підсистеми ВУ на основі виведеної математичної моделі та зроблено порівняльний аналіз результатів моделювання системи з оптимальними та локальними регуляторами.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ.** Показана актуальність роботи з точки зору важливості синтезу багатовимірних оптимальних регуляторів для ТК цукрової промисловості з урахуванням розвитку інформаційних технологій та переходу на мікропроцесорну техніку. Сформульована мета та задачі дослідження. Визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Вказано на апробацію результатів дисертації та кількість публікацій.

**Перший розділ** присвячений аналізу особливостей підсистем ТК цукрового виробництва, аналізу існуючих розробок з використанням оптимальних регуляторів та постановці задачі досліджень.

Виходячи з методології системного аналізу, виділено клас об'єктів, які характеризуються такими властивостями:

- мають  $n \geq 4$  однакових координат стану однієї фізичної природи;
- мають внутрішні взаємозв'язки між змінними;
- описуються схожими за структурою математичними моделями;
- регулюються за подібними схемами.

До цього класу віднесли підсистему ВУ цукрового заводу, в якій регулюється рівень в кожному з корпусів ( $n = 4, 5$ ) та збірниках перед і після ВУ, а також підсистему ДУ, в якій регулюються  $n \geq 4$  температури в різних зонах. Показана доцільність застосування багатовимірних оптимальних регуляторів саме для цього класу об'єктів.

Проведений аналіз робіт показав, що представлені в технічній літературі методи синтезу оптимальних регуляторів не враховують специфіку ТК та режими їх функціонування. Відсутні математичні моделі підсистем ТК, які в явному вигляді можна використати для синтезу оптимальних регуляторів. Тому потребують подальшого вдосконалення та адаптування до специфіки ТК математичні моделі та алгоритми оптимальних та робастних регуляторів.

Визначені науково-технічні основи роботи та основні напрямки досліджень.

**Другий розділ** присвячений розробці комплексу критеріїв та задач для підсистем ТК, виведенню математичних моделей підсистем нахиленої дифузійної та багатокорпусної випарної установок та проведенню статистичного аналізу технологічних змінних підсистем.

Так як прибуток виробництва визначається сумою економічних ефективностей функціонування окремих стадій виробництва, тобто сумою втрат та витрат кожної підсистеми ТК, кількістю випущеної продукції, цінами на сировину, додаткові матеріали, паливо та цільовий продукт, то мінімізація локальних критеріїв оптимальності виділених підсистем ТК веде до максимізації прибутку та забезпечення необхідної якості напівпродукту на кожній стадії виробництва.

У якості основних локальних критеріїв оптимізації розглянуті наступні.

#### 1. Інтегрально-квадратичний критерій (задача АКОР)

$$I = \Delta x^T(t_k)G\Delta x(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} (\Delta x^T(t)P\Delta x(t) + \Delta u^T(t)D\Delta u(t))dt, \quad (1)$$

де перша складова визначає відхилення реального стану системи від бажаного в кінцевий момент часу, друга – на всьому проміжку, а третя – мінімізацію енергетичних витрат. Матриці  $G, P, D$  – вагові матриці відповідних розмірностей,  $t_0, t_k$  – початковий та кінцевий час регу-

лювання. Для підсистем ДУ та ВУ вектор координат стану  $\Delta x(t)$  складається з температур по зонах та рівнів у корпусах відповідно, а вектор управлінь  $\Delta u(t)$  – витрати пари в кожен зону та витрати соку між корпусами відповідно.

2. Норма  $\|H\|_2$  (задача  $H_2$  - оптимального синтезу)

$$\|H\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[H^T(-j\omega)H(j\omega)]d\omega}. \quad (2)$$

де  $H(s)$  – матрична передаточна функція від входу вектору збурень до вектору контрольованих виходів ( $s = j\omega$ ), аналітична в правій півплощині ( $\text{Re } s > 0$ ),  $\text{tr}(\cdot)$  – слід відповідної матриці. Як частинний випадок розглядається лінійно-квадратична гаусівська задача (LQG) оптимального синтезу.

3. Норма  $\|H\|_{\infty}$  (задача  $H_{\infty}$  - оптимального синтезу)

$$\|H\|_{\infty} = \max_{\omega \in [0, \infty)} \bar{\sigma}(\omega), \quad (3)$$

де  $\bar{\sigma}(\omega)$  – максимальне сингулярне число матриці  $H(j\omega)$  (корінь квадратний з максимального власного значення ермітової матриці  $H(j\omega)^T H(j\omega)$ ).

Введення цього критерію обумовлене тим, щоб єдиним регулятором забезпечити стійкість замкненої системи не тільки для номінального (без врахування помилок моделі) об'єкта, але й для будь-якого об'єкта, що належить до множини "збурених" об'єктів, яка задається класом невизначеності.

Сформульовано комплекс задач для побудови оптимальної системи автоматичного управління підсистемами ТК, що включає: задачу управління; задачу оцінки стану; задачу стохастичного управління; задачу оцінки параметрів; задачу адаптивного управління; задачу робастного управління; задачу координації; задачу ІПППР.

Виведено математичні моделі підсистеми теплообміну ДУ та підсистеми рівнів для ВУ та приведено їх до виду в просторах параметрів стану. Аналіз математичних моделей показав наявність множини зв'язаних між собою регульованих координат, що підтвердило доцільність використання багатовимірних оптимальних регуляторів.

Проведено статистичний аналіз технологічних змінних на основі експериментальних виробничих даних. Визначено, що всі змінні є випадковими, які розподілені за нормальним законом, а також існують ситуації, коли в них з'являється детермінована складова.

В **третьому розділі** подано алгоритми оптимальних регуляторів для об'єктів з зосередженими та розподіленими параметрами з урахуванням особливостей підсистем, робастних регуляторів, а також їх моделювання та порівняння.

Розглядається задача синтезу оптимального регулятора - лінійно-квадратична задача з гаусівськими збуреннями (LQG). В цьому випадку підсистему ВУ та ДУ розглядають як таку, на яку діють випадкові збурення, що за природою є стохастичними, спостереженням доступні лише спотворені шумами деякі змінні стану об'єкта. Тут побудова оптимального управління складається з двох етапів: на першому – оцінюється стан системи, на другому – розробляється регулятор зі зворотним зв'язком від оцінки стану. Обидві операції – оцінка стану та управління можуть бути ввімкнені в єдиний процес прийняття рішення.

Об'єкт описується рівняннями виду

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t); \\ y_v &= Cx(t) + Du(t) + Hw(t) + v(t); \\ x(t_0) &= x_0;\end{aligned}\tag{4}$$

де  $y_v(t)$  – вектор вимірювань, що складається з температур сокостружкової суміші в зонах ДУ та рівнів в корпусах ВУ;  $w(t)$ ,  $v(t)$  – випадкові процеси відповідно в каналах управління (збурення) та вимірювання, що розглядаються як білі гаусівські шуми з математичними сподіваннями  $M(w)=M(v)=0$ ,  $M(ww^T)=Q_1$ ,  $M(vv^T)=R_1$ ,  $M(wv^T)=N_1$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $G$ ,  $H$  – постійні матриці з розмірностями для ДУ –  $[8 \times 8]$ ,  $[8 \times 4]$ ,  $[4 \times 8]$ ,  $[4 \times 4]$ ,  $[8 \times 7]$ ,  $[4 \times 7]$ , для ВУ –  $[5 \times 5]$ ,  $[5 \times 5]$ ,  $[5 \times 5]$ ,  $[5 \times 5]$ ,  $[5 \times 6]$ ,  $[5 \times 6]$  відповідно. Мінімізується інтегрально-квадратичний критерій виду

$$I(u) = \int_{t_0}^{\infty} (y_v^T Q_2 y_v + u^T R_2 u + 2 y_v^T N_2 u) dt \rightarrow \min_u,\tag{4}$$

де матриці  $Q_2$ ,  $R_2$ ,  $N_2$  – вагові матриці відповідних розмірностей ( $Q_2 \geq 0$ ,  $R_2 > 0$ ,  $N_2 \geq 0$ ). Оцінку вектора  $\hat{x}(t)$  визначають з мінімізації похибки оцінки ( $\lim_{t \rightarrow \infty} M((x - \hat{x})(x - \hat{x})^T)$ ).

Використовуючи принцип максимуму Понтрягіна, а також фільтр Калмана, лінійно-квадратичний регулятор приведено до виду

$$\begin{aligned}\frac{d \hat{x}(t)}{dt} &= [A - LC - (B - LD)K] \hat{x}(t) + Ly_v, \\ u(t) &= -K \hat{x}(t),\end{aligned}\tag{5}$$

де  $K$ ,  $L$  – матриці підсилення відповідно регулятора та фільтра, що визначаються шляхом розв'язання алгебраїчних рівнянь типу Ріккати.

Для побудови робастного управління об'єкт представляється наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t); \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{12} u(t); \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t); \\ u(t) = Ky(t). \end{cases} \quad (6)$$

де  $x(t)$  – вектор стану,  $y(t)$  – вектор вимірювань,  $z(t)$  – вектор контрольованих виходів,  $u(t)$  – вектор управління,  $w(t)$  – зовнішній вхід системи.

Постановка задачі для  $H_2$  та  $H_\infty$  - субоптимальних регуляторів. Для лінійної моделі (6) в класі лінійних управлінь

$$u(s) = K(s)y(s), \quad (7)$$

знайти управління  $u^*$  (де  $s$  – комплексна змінна), яке гарантує оцінку:

$$\|H\|_2 < g, \quad \|H\|_\infty < g. \quad (8)$$

Єдиний  $H_2$ -оптимальний регулятор визначається формулою

$$K_2(s) \xrightarrow{s} \begin{bmatrix} A_2 & -L_2 \\ F_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де

$$\begin{cases} F_2 = -B_2^T X_2, \\ L_2 = -Y_2 C_2^T, \\ A_2 = A + B_2 F_2 + L_2 C_2, \end{cases} \quad (10)$$

де  $X_2 \geq 0$  та  $Y_2 \geq 0$  отримують шляхом розв'язку алгебраїчних рівнянь Ріккаті

$$\begin{aligned} A^T X_2 + X_2 A - X_2 B_2 B_2^T X_2 + C_1^T C_1 &= 0, \\ AY_2 + Y_2 A^T - Y_2 C_2^T C_2 Y_2 + B_1 B_1^T &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Для  $H_\infty$ -субоптимального регулятора розв'язком є наступне: регулятор для системи (7), який гарантує виконання нерівності (8) існує тоді і тільки тоді, коли

- для всіх  $X_\infty \geq 0$  – розв'язок загального рівняння Ріккаті для управління (GCARE)

$$A^T X_\infty + X_\infty A - X_\infty (B_2 B_2^T - \gamma^{-2} B_1 B_1^T) X_\infty + C_1^T C_1 = 0; \quad (12)$$

- для всіх  $Y_\infty \geq 0$  – розв'язок загального рівняння Ріккаті для фільтрації (GFARE)

$$AY_\infty + Y_\infty A^T - Y_\infty (C_2^T C_2 - \gamma^{-2} C_1^T C_1) Y_\infty + B_1 B_1^T = 0; \quad (13)$$

- спектральний радіус  $\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$ .

При цьому регулятор отримуємо у формі спостерігача

$$K_\infty(s) \xrightarrow{s} \begin{bmatrix} A_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ F_\infty & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

де

$$\begin{cases} A_{\infty} = A + g^{-2} B_1 B_1^T X_{\infty} + B_2 F_{\infty} + Z_{\infty} L_{\infty} C_2, \\ Z_{\infty} = (I - g^{-2} Y_{\infty} X_{\infty})^{-1}, \\ L_{\infty} = -Y_{\infty} C_2^T, \\ F_{\infty} = -B_2^T X_{\infty}. \end{cases} \quad (15)$$

Для побудови субоптимального регулятора використовується ітераційна процедура за  $\gamma$ . На кожному кроці вирішується субоптимальна задача, тобто визначається регулятор  $K_i(s)$ , для якої виконується (8), де  $i$  – номер кроку. Потім величина  $\gamma$  зменшується, субоптимальна задача вирішується доти, поки існує невід’ємний визначений розв’язок алгебраїчного рівняння Ріккати GCARE, GFARE і виконується умова на обмеження спектрального радіусу. Якщо отримане в результаті ітераційної процедури мінімальне значення  $\gamma$ , близьке до  $\gamma_{min}$  з заданим ступенем точності, то розв’язки  $X_{\infty}$  і  $Y_{\infty}$  використовуються для синтезу  $H_{\infty}$ -субоптимального регулятора.

Приведені виведення та результати конструктивного розв’язку задачі аналітичного конструювання оптимальних регуляторів для системи з розподіленими параметрами, в якості якої взята нахилена ДУ.

Проведено розрахунок для підсистем ДУ, ВУ та отримано настройки (матриці) оптимальних та робастних регуляторів для (5), (9), (14), зокрема для ДУ матриці математичної моделі (4)

$$A = \begin{bmatrix} -0.8643 & 0.4667 & 0 & 0 & 0.0259 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3678 & -0.8554 & 0.4619 & 0 & 0 & 0.0257 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3641 & -0.8467 & 0.4572 & 0 & 0 & 0.0254 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3604 & -0.8382 & 0 & 0 & 0 & 0.0251 \\ 11.27 & 0 & 0 & 0 & -11.27 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25.45 & 0 & 0 & 0 & -25.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20.45 & 0 & 0 & 0 & -20.45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 13.99 & 0 & 0 & 0 & -13.99 \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3155.69 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7351.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5858.90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3948.25 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.3717 & -0.2334 & 0.1299 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1198 & 0.0342 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0339 & 0.0254 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0754 & -0.7293 & 0.2766 & 0.1760 & 0.7712 & 0.7712 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

та  $H_{\infty}$ -регулятор мають вигляд

$$\begin{aligned}\dot{\Delta x_c}(t) &= A_c \Delta x_c(t) + B_c \Delta y(t); \\ \Delta u(t) &= C_c \Delta x_c(t).\end{aligned}\tag{20}$$

$$A_c^{H_\infty} = \begin{bmatrix} -0.1333 & 0.01236 & -0.005759 & -0.005757 & -1.77 & -0.2407 & 0.3631 & -0.004293 \\ 0.007797 & -0.1779 & 0.01938 & -0.002169 & 0.2302 & -0.1956 & -1.222 & -0.1085 \\ -0.003352 & 0.01797 & -0.1025 & 0.003738 & -0.1102 & 0.2383 & 0.21 & 0.3589 \\ -0.0034 & -0.001841 & 0.003446 & -0.08692 & -0.1659 & 0.753 & -0.2277 & -0.09742 \\ -0.003002 & 0.0006107 & -0.0002583 & -0.0002159 & -0.1788 & -0.01331 & 0.01873 & 0.0001535 \\ -3.864e-005 & -0.0003018 & -0.000313 & -0.001185 & -0.004562 & -0.08812 & -0.00040930 & 0.0003221 \\ 2.238e-005 & -0.0009112 & 0.0001453 & 0.0004821 & 0.007716 & 0.001301 & -0.09893 & 0.0005956 \\ 0.0001407 & 4.276e-005 & -0.005169 & 0.001413 & 0.0003262 & -0.002356 & -0.01429 & -0.1198 \end{bmatrix}, \tag{21}$$

$$B_c^{H_\infty} = \begin{bmatrix} 1.374e-005 & 5.617e-006 & 1.681e-006 & -9.627e-006 \\ -2.514e-005 & -9.505e-006 & 2.613e-006 & 0.0002495 \\ -0.0001005 & -2.528e-005 & 2.201e-005 & 0.001056 \\ -0.000132 & -2.246e-005 & -1.188e-005 & -0.0001964 \\ -0.01217 & -0.01218 & -0.00546 & 0.003555 \\ -0.0449 & -0.02138 & -0.0007785 & 0.02119 \\ 0.07123 & 0.0986 & 0.1213 & 0.07363 \\ 0.02647 & 0.2336 & 0.6233 & 1.621 \end{bmatrix}, \tag{22}$$

$$C_c^{H_\infty} = \begin{bmatrix} -9.342e-005 & 2.333e-005 & 0.0002602 & 0.001021 & -0.001895 & 0.03089 & -0.008368 & -0.0002089 \\ -0.002327 & 0.0002088 & -1.154e-005 & -5.147e-006 & 0.03643 & 0.002681 & -0.01494 & -0.001108 \\ 0.0008852 & 0.0005736 & -6.601e-005 & 1.515e-005 & -0.01332 & -0.006276 & -0.02085 & -0.003586 \\ 2.061e-005 & -0.0002777 & -0.001192 & 0.0003102 & -0.0001214 & 8.83e-005 & 0.0004805 & -0.01039 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

На основі моделювання підсистем ДУ та ВУ з оптимальними регуляторами виділено наступні загальні умови, переваги та недоліки при їх використанні (схеми наведені на рис.1, 2). Зокрема для LQG-регулятора – умови: збурення - білий шум з визначеними характеристиками, математична модель - чітко описує процес; переваги: покращення якісних характеристик перехідних процесів як при випадкових так і детермінованих збуреннях; недоліки: досить інтенсивні затрати на управління; для  $H_2$ -регулятора – умови: збурення - білий шум, математична модель – змінна; переваги: покращення якісних характеристик перехідних процесів при випадкових збуреннях, мінімальні затрати на управління; недоліки: погіршення якісних характеристик перехідних процесів при детермінованих збуреннях; для  $H_\infty$ -регулятора – умови: збурення - детерміноване, математична модель адитивно та (або) мультіплекативно збурена; переваги: покращення якісних характеристик перехідних процесів при випадкових та детермінованих збуреннях, мінімальні затрати на управління; недоліки: затягує перехідні процеси при детермінованих збуреннях.

В четвертому розділі розроблено три структури автоматизованої системи управління ТК на основі оптимальних регуляторів, вказано технічні та програмні можливості реалізації систем з оптимальними регуляторами, розроблено універсальний віртуальний лабораторний стенд для моделювання оптимальних регуляторів.

Виділено чотири етапи розробки автоматизованої системи управління підсистемами ТК на базі оптимальних регуляторів.

1. Виділити підсистему, що відповідає заданому класу.
2. Вивести математичну модель підсистеми та привести її до виду в просторах параметрів стану.
3. Проаналізувати вхідні сигнали (збурення), що діють на систему за апіорною та (або) дослідною інформацією про ТК.
4. На основі пунктів 1-3 вибрати одну з трьох структур автоматизованої (автоматичної) системи оптимального управління наступним чином:
  - якщо вид вхідного сигналу та (або) параметри (структура) підсистеми задовольняють умовам конкретного алгоритму оптимального регулятора, то обираємо цей алгоритм (5), (9), (14);
  - якщо вид вхідного сигналу та (або) параметри (структура) підсистеми вкладаються в умови алгоритмів оптимальних регуляторів, але при різних режимах (ситуаціях, умовах) її функціонування та ці режими конкретно визначені, то використовуємо структуру з переключеннями, до якої ввійдуть необхідні алгоритми (рис.1).

При цьому критерій якості повинен змінюватися в залежності від поточної ситуації, що виникла на виробництві та збурень, які діють на підсистему ТК, тобто автоматична система управління підмикає необхідний регулятор в залежності від поточної ситуації, що визначається за вхідною поточною інформацією та інформацією про об'єкт. Більш складною умовою переключення може бути повний статистичний аналіз вхідних та вихідних сигналів та використання інших оптимальних регуляторів при їх поєднанні;

- якщо вказане вище зберігається, але умови функціонування, зовнішній та внутрішній вплив на підсистему не чітко визначені, необхідні адаптація та координація підсистем ТК, а також інші алгоритми регулювання, то як варіант вирішення може використовуватися ІПППР окремим або вбудованим модулем реалізації поставленої задачі в рамках всієї системи (ТК, виробництва) .

ІПППР призначена для управління підсистемою ТК шляхом вибору критерію та алгоритму оптимального управління та може бути побудована за існуючими правилами експертної системи. Вона може існувати як окрема складова при управлінні підсистемою ТК

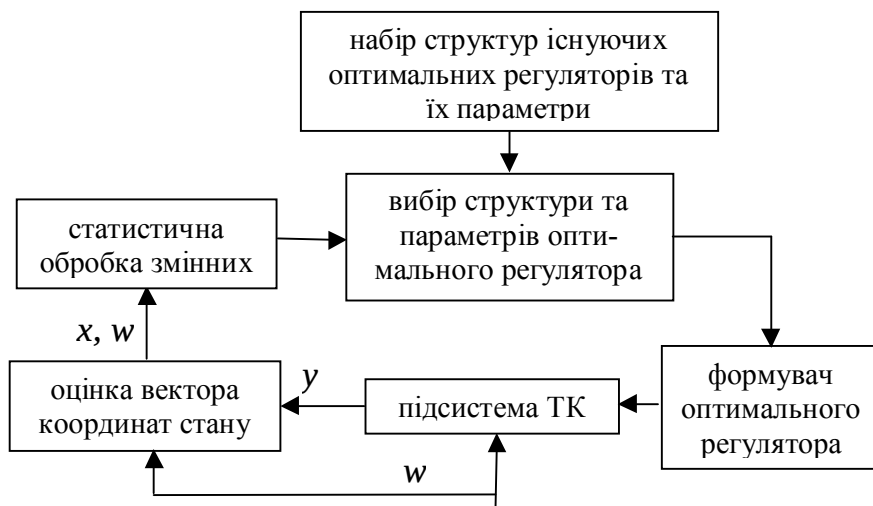


Рис.1. Структура автоматичної системи оптимального управління з переключенням.

або включатися в експертну систему ТК (виробництва). Розпізнавання ситуацій ведеться в режимі реального часу. База ситуацій включає набір ситуацій основного, передаварійного та аварійного режимів ТК, а також шляхів (траєкторій) переходів з одного на інший. Вибір єдиної ситуації визначає вибір єдиного критерію управління, вагові коефіцієнти якого (якщо критерій складений) вибираються за показниками векторів входу, виходу та координат стану. База оптимальних регуляторів складається, як із стандартних законів регулювання, так і алгоритмів багатовимірних оптимальних регуляторів, таких як алгоритми аналітичного конструювання оптимальних регуляторів з різними видами збурень з розподіленими та зосередженими параметрами, робастні регулятори та ін.

Вказані технічні та програмні можливості реалізації оптимальних регуляторів. Зроблено висновок, що вибір одного з варіантів реалізації залежить від автоматизації конкретного ТК виробництва – дифузійного відділення, випарної станції, що допоможе не створювати окремий модуль автоматизації виділених підсистем, а вбудувати подану розробку в існуючу систему.

Розроблено універсальний віртуальний лабораторний стенд для моделювання систем з оптимальними регуляторами та вивчення їх особливостей, який може бути використаний при розробці та налагоджуванні виробничих систем, а також в навчальному процесі фахівців з автоматизації та студентів.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі запропоновано нове рішення науково-технічної задачі підвищення ефективності функціонування технологічних комплексів цукрового заводу і зменшення витрат енергоносіїв за рахунок розробки оптимальних регуляторів для підсистем ТК

(нахиленої дифузійної установки та багатокорпусної випарної установки). Застосування оптимальних регуляторів дає можливість суттєво підвищити точність підтримання технологічних режимів, що сприяє покращенню якості продукції та зменшенню витрат енергоносіїв.

1. На основі системного аналізу ТК дифузійної та випарної установок виділено клас об'єктів, до якого відноситься відповідно підсистеми регулювання температур та рівнів, в яких регульовані координати, кількість яких  $n \geq 4$ , мають одну фізичну природу, описуються схожими математичними моделями, а контури регулювання будуються за однією структурою.

2. Виділено критерії ефективності функціонування підсистем та ТК в цілому, що дозволяє використати їх в залежності від умов та режимів роботи системи. Визначено, що в залежності від виду критерію обирається структура оптимального регулятора, а отже і оптимальна система автоматичного управління підсистемою ТК. Виділено ряд задач оптимального управління.

3. Визначені, виведені та адаптовані математичні моделі підсистем ДУ та ВУ, на основі яких розроблені алгоритми оптимальних регуляторів. Математичні моделі показали наявність прямих та перехресних зв'язків, що підтверджує доцільність використання багатовимірних регуляторів, в тому числі робастних.

4. Проведено статистичний аналіз технологічних змінних відділень ДУ та ВУ. Всі змінні для визначеного класу математичних моделей є випадковими, що розподілені за нормальним законом, та в деяких випадках мають детерміновану складову.

5. Розроблено ряд алгоритмів оптимального керування даними об'єктами на основі вказаних критеріїв та виведених математичних моделей. Проведено математичне моделювання систем з різними регуляторами та при різних збуреннях і визначено найкращі умови, переваги та недоліки їх використання.

6. Визначено, що в залежності від умов роботи підсистеми та характеру збурень обирається структура системи управління з оптимальним регулятором, зокрема при випадкових збуреннях найкращі показники має система з  $H_2$ -оптимальним регулятором, а при наявності детермінованої складової – система  $H_\infty$ -оптимальним регулятором. Приведено три структури для реалізації автоматизованої системи управління на базі оптимальних регуляторів.

7. Приведені варіанти реалізації запропонованих алгоритмів на базі мікропроцесорної техніки та вказані вимоги до їх технічного та програмного забезпечення. Вибір одного з варіантів технічної реалізації залежить від автоматизації конкретного ТК виробництва – дифузійного відділення, випарної станції, що допоможе не створювати окремий модуль автоматизації виділених підсистем, а вбудувати подану розробку в існуючу систему.

8. Розроблено віртуальний лабораторний стенд для моделювання систем з оптимальними регуляторами та вивчення їх особливостей, який може бути використаний при розробці та налагоджуванні виробничих систем, а також в навчальному процесі фахівців з автоматики та студентів.

9. Основні результати роботи перевірено за допомогою імітаційного моделювання та комп'ютерного експерименту. Проведені дослідження дозволили визначити ефективні способи оптимального управління виділеним класом об'єктів, актуальність яких підтверджена отриманими довідками про впровадження у виробничий та навчальний процеси.

Основний зміст дисертації викладено в опублікованих роботах:

1. Лобок О.П., Луцька Н.М. Синтез оптимального керування для технологічних процесів харчової промисловості // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 1 (16). – с. 81–84.
2. Ладанюк А.П., Луцкая Н.Н., Лобок О.П. Оптимальные регуляторы в подсистемах поддержки принятия решений // Проблемы управления и информатики. – 2004. - № 2. – с. 138-142.
3. Ладанюк А.П., Луцька Н.М. Деклараційний патент на винахід. Система управління випарною установкою. Заявка №20031211172, від 15.10.2004.
4. Ладанюк А.П., Луцька Н.М., Лобок О.П. Розробка багатовимірних оптимальних регуляторів для об'єктів одного класу // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2004. - № 1 (13). – 140 – 144 с.
5. Луцька Н.М. Синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2005, № 1 (15). – 148-151 с.
6. Ладанюк А.П., Засць Н.А., Луцька Н.М. Застосування адаптивних систем керування для нестационарних об'єктів технологічних комплексів неперервного типу // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. . – 2005, № 1 (15). – 158-162 с.
7. Луцька Н.М., Лобок О.П. Синтез оптимального управління тепловою системою з розподіленими параметрами. // Програма і матеріали Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч.ІІ- К.:НУХТ, 2002,-119с.
8. Луцька Н.М., Лобок О.П., Ладанюк А.П. Постановка задачі та дослідження оптимальних регуляторів для складних об'єктів // Програма і матеріали 69-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч.ІІ- К.:НУХТ, 2003,-129с.

9. Ладанюк А.П., Лобок О.П., Луцька Н.М. Оптимальні регулятори для нестационарних об'єктів складних технологічних комплексів // Матеріали 10-й международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2003», г.Севастополь, 2003, Т. 2. С.64-65.
10. Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Автоматизоване управління рівнями випарної установки з використанням багатовимірних оптимальних регуляторів // Матеріали 11-й міжнародної конференції по автоматичному управлінню «Автоматика-2004», м.Київ, 2004, Т. 2. – 40с.
11. Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Моделювання багатовимірних регуляторів в середовищі Matlab // Програма і матеріали 70-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч.ІІ- К.:НУХТ, 2004,-116с.
12. Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Підсистема підтримки прийняття рішень з використанням оптимальних регуляторів // Тези доповідей учасників міжнародної науково-практичної конференції "Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології", м.Чернівці, 2004р.,- 20-21 с.
13. Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Синтез оптимальних регуляторів для об'єктів одного класу // Матеріали 12-й міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика-2005", м. Харків, 2005, Т.2 – 17 с.
14. Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Синтез багатовимірного оптимального регулятора для підсистеми нахиленої дифузійної установки // Програма і матеріали 71-ої наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Ч.ІІ- К.:НУХТ, 2005,-117с.
15. Луцька Н.М. Порівняння різних підходів при розробленні багатовимірних регуляторів для одного класу об'єктів // Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції "Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи", Ч. II – К.: НУХТ, 2005, - 41с.

Луцька Н.М. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів – Національний університет харчових технологій, Київ, 2006.

Дисертацію присвячено питанням синтезу оптимальних та робастних регуляторів для підсистем технологічних комплексів цукрового виробництва. Розроблені математичні моделі підсистем теплообміну нахиленої дифузійної установки та рівнів багатокорпусної випарної установки. Проведено статистичний аналіз технологічних змінних та імітаційне моделювання підсистем з різними регуляторами, в тому числі локальними, оптимальними та робастними.

Розроблено функціональну структуру для реалізації алгоритмів оптимальних регуляторів, що включає структуру з переключенням та інтелектуальну підсистему підтримки прийняття рішень. Розроблено віртуальний лабораторний стенд для моделювання систем з оптимальними регуляторами та вивчення їх особливостей.

Ключові слова: технологічний комплекс, оптимальні регулятори, робастні регулятори, математичне моделювання.

Луцкая Н.Н. Исследование и синтез оптимальных регуляторов для систем автоматизации технологических комплексов непрерывного типа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2006.

Диссертация посвящена вопросам разработки оптимальных регуляторов для объектов пищевых производств и построение автоматизированной системы управления этими объектами.

Исходя из методологии системного анализа, выделен класс объектов, которые характеризуются такими свойствами:

- имеют  $n \geq 4$  одинаковых координат состояния одной физической природы;
- имеют внутренние взаимосвязи между сменными;
- описываются похожими за структурой математическими моделями;
- регулируются за подобными схемами.

К этому классу отнесли подсистему выпарной установки сахарного завода, в которой регулируется уровень в каждом корпусе ( $n = 4, 5$ ) и сборниках перед и после, а также подсистему наклонной диффузионной установки, в которой регулируются  $n \geq 4$  температуры в зонах. Показанная целесообразность применения многомерных оптимальных регуляторов именно для этого класса объектов.

Разработан комплекс критериев и задач для подсистем технологических комплексов, выведено математические модели подсистем наклонной диффузионной и многокорпусной выпарной установок и проведено статистический анализ технологических переменных подсистем.

Разработаны алгоритмы оптимальных регуляторов для объектов с сосредоточенными и распределенными параметрами с учетом особенностей подсистем, робастных регуляторов, а также проведено их моделирование и сравнение.

Определено, что в зависимости от условий работы подсистемы и характера возмущений избирается структура системы управления с оптимальным регулятором. Приведено три

структуры для реализации автоматизированной системы управления на базе оптимальных регуляторов.

Приведены варианты реализации предложенных алгоритмов на базе микропроцессорной техники и указанные требования к их техническому и программному обеспечению. Выбор одного из вариантов технической реализации зависит от автоматизации конкретного технологического комплекса производства – диффузного отделения, испарительной станции, что поможет не создавать отдельный модуль автоматизации выделенных подсистем, а встроить представленную разработку в существующую систему.

Разработан виртуальный лабораторный стенд для моделирования систем с оптимальными регуляторами и изучение их особенностей, что может быть использован при разработке и наладивании производственных систем, а также в учебном процессе специалистов по автоматике и студентов.

Ключевые слова: технологический комплекс, оптимальные регуляторы, робастные регуляторы, математическое моделирование.

Lutsкая N.N. Investigation and synthesis of optimal regulator for automation system of technological complex of continuous type. – Manuscript.

Dissertation for a candidate degree of technical science by speciality 05.13.07 — automation of technological processes (food industry). — National university of food technologies, Kyiv 2002.

The Thesis is dedicated to questions of the syntheses optimum and robust regulator for subsystems technological complex sugar production. Designed mathematical subsystem models теплообмена bent heat exchange of the installation and level multiple-unit evaporator of the system. They are organized statistical analysis technological variable and simulation modeling of the subsystems with miscellaneous regulator, including local, optimum and robust. The functional structure is designed for realization algorithm optimum regulator that includes the structure with switching and intellectual subsystem of support decision making. The virtual laboratory stand is designed for modeling of the systems with optimum regulator and studies of their particularities.

The Keywords: technological complex, optimum regulators, robust regulators, mathematical modeling.