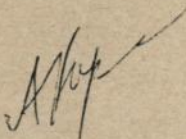


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

На правах рукопису



**БУЛГАКОВ Олексій Борисович**

УДК 661.25

**УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАРЮВАННЯ  
У ВИРОБНИЦТВІ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ.**

Спеціальність 05.13.07 - Автоматизація технологічних процесів і виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

681,5

Дисертація

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751862 (Т)

Роботу виконано в Національному  
"Київський політехнічний інститут"

- Науковий керівник: доктор технічних наук,  
професор Зайченко Ю.П.
- Науковий консультант: кандидат технічних наук,  
доцент Мисак В.Ф.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
професор Сільвестров А.М.;  
кандидат технічних наук,  
Оганесян Р.Ц.

Провідна організація:  
Інститут проблем математичних машин та систем НАН України

Захист дисертації відбудеться *19 травня* 1997 р. о *15* годині на  
засіданні спеціалізованої ради Д 01.02.08 при Національному  
технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за  
адресою : 252056, Київ, пр.Перемоги, 37. *ау. 56-14*

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного  
технічного університету України "Київський політехнічний інститут" за  
адресою : 252056, Київ, пр.Перемоги, 37.

Відгуки на автореферат просимо надсилати на ім'я вченого  
секретаря спеціалізованої ради за зазначеною адресою

Автореферат розіслано "*03*" *квітня* 1997 р.

Учений секретар спеціалізованої ради  
доктор технічних наук, професор

В.Д.Романенко

1

## АНОТАЦІЯ

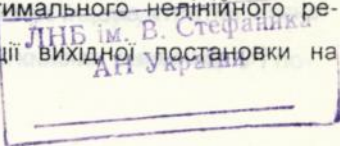
Мета роботи - розробка ефективної системи автоматичного управління процесом випарювання аміачної селітри з використанням мікропроцесорних контролерів і вдосконалення апаратурного оснащення об'єкта автоматизації як необхідної умови ефективного функціонування системи автоматичного управління (САУ).

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі задачі:

- виконано дослідження стадії випарювання як об'єкта автоматичного управління та розроблено математичну модель процесу;
- розроблено методичку синтезу алгоритмів автоматичного регулювання, які забезпечують ефективне управління в умовах значних стрибкоподібних збурень, виконано дослідження синтезованих регуляторів;
- розроблено схему автоматичного управління процесом випарювання та алгоритмічне забезпечення для розв'язання основних задач;
- розроблено і досліджено конструкцію пристрою відбору і обробки проби для отримання термограм охолодження у вимірювачі концентрації аміачної селітри;
- розроблено алгоритми відбраковки кривих охолодження у вимірювачі концентрації селітри;
- розроблено пристрої для внесення добавок в розчин селітри та очистки трубопроводів.

Автор захищає:

- математичну аналітико-експериментальну модель відділення випарювання;
- формулювання задачі синтезу оптимального нелінійного регулятора, яка базується на декомпозиції вихідної постановки на



лінійну та нелінійну частину, а також аналітичні співвідношення, отримані для розрахунків параметрів регулятора;

- алгоритм параметричного оптимального синтезу детермінованого регулятора, в якому використана еталонна модель для задання показників якості управління, процедура послідовного розширення інтервалів оптимізації та процедура оптимізації в кількох підпросторах параметрів регулятора, що апріорно задаються користувачем;
- спосіб підвищення швидкодії пристрою для контролю температури кристалізації та конструкцію пробовідбірника;
- алгоритм розпізнавання та відбраковки термограм з похибками з метою забезпечення високої надійності пристрою для вимірювання температури кристалізації;
- спосіб внесення стабілізуючих добавок у розчин селітри та конструкції кавітаційних змішувачів;
- конструкцію пристрою для автоматичного очищення трубопроводів;

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Визначальним критерієм виробництва аміачної селітри є якість готового продукту. Підвищення фізико-хімічних показників якості селітри знижує втрати готового продукту та енергетичні витрати на його виробництво, підвищує агрохімічну ефективність добрив. Технологічний цикл виробництва аміачної селітри завершують процеси випарювання та грануляції, де в основному формуються якісні показники готового продукту і мають місце значні витрати енергії та сировини.

Підтримання якісних показників на заданому рівні вимагає су-

ворого дотримання норм технологічного регламенту, що можливо за умов застосування сучасних систем автоматичного управління.

Зважаючи на це можна стверджувати, що актуальною проблемою є підвищення ефективності визначального енергомісткого процесу випарювання за рахунок автоматизації та вдосконалення його апаратурного оформлення.

Методи дослідження. Побудова математичної моделі виконана аналітико-експериментальним методом. При синтезі алгоритмів автоматичного управління використовувались метод функції Ляпунова у поєднанні з методом динамічного програмування, методи пошукової параметричної оптимізації, методи адаптивної ідентифікації. При розробці алгоритмів розпізнавання та відбраковки термограм використовувалась теорія нечітких множин.

Наукова новизна. Автором одержано та викладено в дисертаційній роботі такі наукові результати:

- Виконано дослідження збуджуючих дій, які порушують режим нормального функціонування відділення випарювання. Визначено, що основні збурення обумовлені зміною навантаження на стадію і мають стрибкоподібний характер.

- Виконано декомпозицію задачі синтезу оптимального нелінійного регулятора і отримані аналітичні вирази для синтезу лінійної та нелінійної частин регулятора, що дає можливість реалізації ефективної системи регулювання в умовах наявності значних по амплітуді стрибкоподібних збурень.

- Розроблено алгоритм параметричного оптимального синтезу детермінованого регулятора з використанням методу послідовного розширення інтервалів, а також процедури оптимізації в підпросторах параметрів які дозволяють значно скоротити час пошуку.

- Виконано дослідження розроблених нелінійних регуляторів і по-

казана ефективність комплексного підходу до синтезу регуляторів, який базується на попередньому аналітичному синтезі з подальшою пошуковою параметричною оптимізацією.

- Розроблено спосіб підвищення швидкодії пристрою для контролю температури кристалізації завдяки використанню теплоносія для розігріву та оригінальної конструкції спеціального пристрою відбору проби.

- Проведено дослідження роботи пристрою для контролю температури кристалізації і запропоновано спосіб для підвищення надійності вимірювача температури кристалізації за рахунок застосування алгоритма розпізнавання та відбраковки кривих охолодження з похибками.

- Запропоновано використати кавітаційний змішувач для введення стабілізуючих добавок в розчин селітри, розроблена конструкція апарата для реалізації запропонованого підходу, показана висока ефективність змішування.

Практична цінність. Розроблено аналітико-експериментальну модель, яка дає можливість на стадії розробки виконувати параметричний синтез регуляторів, з її використанням побудована та впроваджена у виробництво схема автоматизації відділення випарювання, запропоновано пристрій для контролю температури кристалізації розчину селітри (новизна захищена авторським свідоцтвом), який впроваджено у складі системи автоматичного управління процесу випарювання селітри. Розроблене програмне забезпечення для параметричного синтезу САУ з використанням методів синтезу регуляторів використовується при розрахунках та в навчальному процесі.

Запропонований пристрій для очищення трубопроводів дозволяє значно збільшити міжремонтний період роботи устаткування і підвищити надійність роботи систем управління. Розробка захищена

авторськими свідоцтвами.

Запропонована та пройшла промислові випробування система введення стабілізуючих добавок з використанням кавітаційного змішувача, конструкції якого захищені авторськими свідоцтвами та патентами.

Реалізація результатів роботи. Розроблені методи, алгоритми та апарати використані при впровадженні автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) випарювання на Череповецькому азотно-туковому заводі. Пристрій кавітаційного змішування знайшов застосування в інших галузях промисловості, зокрема на Кременчуцькому заводі технічного вуглецю, ТЕЦ АТ "Мосенерго", ТЕЦ АК "Київенерго".

Методи синтезу регуляторів використовуються в навчальному процесі в курсі "Адаптивні і оптимальні системи управління".

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних семінарах "Сучасні методи і засоби автоматизації та механізації хімічних виробництв" (Київ, 1987), "Інтенсифікація виробництв на базі комплексної автоматизації та роботизації". (Яремча, 1988), "Моделювання, ідентифікація та синтез управління багатовимірними динамічними об'єктами (Київ, 1993); міжнародному конгресі "Екологія Росії" (Москва, 1993).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 6 наукових праць та 1 методичний посібник, одержано 4 авторських свідоцтва та 5 патентів на винаходи.

Структура та обсяг роботи. Робота складається із вступу, чотирьох глав, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У вступі обґрунтовується актуальність та сформульована мета роботи.

У першій главі досліджені технологічні особливості виробництва аміачної селітри як об'єкта управління, проаналізовано стан автоматизації відділення випарювання, сформульовано задачі досліджень.

Друга глава присвячена розробці і перевірці на адекватність математичної моделі відділення випарювання стосовно технологічної схеми Череповецького азотно-тукового заводу. Приведені результати моделювання.

У третій главі розроблені і досліджені методика та алгоритми параметричного оптимального синтезу нелінійних регуляторів для об'єктів, які зазнають значних стрибкоподібних збурень разом зі збуреннями хвильового типу.

Четверта глава присвячена розробці системи автоматичного керування відділенням випарювання, а також технічних пристроїв для контролю концентрації аміачної селітри по температурі кристалізації, кавітаційного змішування та автоматичної очистки трубопроводів. Наведені алгоритми регулювання процесом випарювання, відбраковки термограм з похибками.

В кінці роботи сформульовані основні висновки за одержаними результатами.

В додатках наведені результати експериментальних досліджень, промислових випробувань та впроваджень автоматичних систем і пристроїв. Подані також документи про впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В дисертаційній роботі розроблена автоматична система

управління процесом випарювання у виробництві аміачної селітри, а також розроблені і досліджені основні складові частини системи: математичне, алгоритмічне та технічне забезпечення.

Проведені дослідження і аналіз технологічних особливостей процесу випарювання у виробництві аміачної селітри показали, що процес супроводжується значними по амплітуді (10-50% від номіналу) збурюваннями з частотою 1...5 разів на годину, які мають переважно стрибкоподібний характер у сполученні зі збуреннями хвильового типу. В зв'язку з цим постає задача побудови регуляторів, які б успішно функціонували в умовах таких збурень і були малочутливі до їх величини.

Синтез і аналіз регуляторів потребує побудови математичної моделі процесу, тому що відомі моделі не відповідають особливостям схемної реалізації і апаратурному оформленню процесу.

Аналіз механізму формування якісних показників селітри показав, що введення стабілізуючих малорозчинних добавок стає ефективним за умов високого ступеня змішування, яке може бути досягнуте шляхом використання кавітаційних гідродинамічних змішувачів.

Показано, що основний недолік існуючих систем автоматичного управління полягає в відсутності надійних вимірювачів концентрації селітри, у зв'язку з чим виникає задача вдосконалення конструкції пристрою для вимірювання концентрації по температурі кристалізації, а також розробки алгоритмів обробки термограм охолодження.

Для побудови моделі об'єкту управління запропоновано аналітико-експериментальний підхід.

При розробці математичної моделі прийняті такі основні припущення:

- тепловою ємністю металу корпусу, гріючих труб та плівки води

на поверхні труб нехтуємо;

- теплові втрати постійні;

- випарювальний апарат вважається об'єктом з зосередженими параметрами.

Визначені основні зовнішні збурювання процесу: витрати розчину селітри на вході (навантаження) -  $S_0$ ; витрати пари -  $D_0$ , концентрація розчину селітри на вході -  $b_0$ ; температури плаву і пару на вході -  $t_0$ ,  $T_0$ . До внутрішніх збурювань віднесені: температури вторинної пари і розчину селітри на виході -  $T_1, t_1$ , кількість вторинної пари -  $W_1$  та ін.

З використанням рівнянь матеріального та теплового балансу отримані передаточні функції по різних каналах випарювального апарату, парозволожувача, проміжних ємкостей. Окремо визначені транспортні запізнення для всіх каналів регулювання. Так, зокрема, для каналів "  $S_0 - b$  ", "  $T_0 - b$  ", "  $b_{14} - b$  " отримані такі передаточні функції :

$$W_{S_0-b} = \frac{19 \cdot 10^{-3} p + 6.8 \cdot 10^{-3}}{1.3 \cdot 10^{-2} p^3 + 0.18 p^2 + 0.74 p + 1} e^{-0.021 p}$$

$$W_{T_0-b} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{4.9 \cdot 10^{-2} p^2 + 0.46 p + 1} e^{-0.024 p}$$

$$W_{b_{14}-b} = \frac{0.31}{0.16 p + 1} e^{-0.033 p}$$

де  $b_{14}$  - концентрація плаву на виході з буферного баку,

$b$  - концентрація плаву на виході стадії випарювання.

Порівняння розрахункових характеристик з експериментальними даними (максимальна середньоквадратична похибка не перевищує 10%) дозволяє зробити висновок про можливість використання моделі для аналізу функціонування системи та отримання стартових оцінок параметрів регуляторів.

Аналіз збурюючих дій процесу показав присутність детермінованих стрибкоподібних збурень у сполученні зі збуреннями хвильового типу, у зв'язку з чим виникає задача побудови регуляторів, які б однаково успішно функціонували в умовах малих і великих збурень. Вказаним умовам відповідають нелінійні регулятори, зокрема регулятори у вигляді нелінійних поліномів від змінних стану.

Загальна задача синтезу має вигляд

$$\bar{x} = f(\bar{x}, \bar{u}), \quad \bar{x}(t_n) = \bar{x}_n \in V_x, \quad \bar{y} = \bar{y}(\bar{x})$$

$$\bar{x} \in V_x \subset \mathbb{R}^n, \quad \bar{u} \in V_u \subset \mathbb{R}^m, \quad \bar{y} \in V_y \subset \mathbb{R}^r, \quad (1)$$

$$I = \int_0^{\infty} f_0(\bar{x}, \bar{u}) \rightarrow \min_{\bar{u} \in V_u}$$

де  $\bar{x}, \bar{u}, \bar{y}$ -вектори стану, виходу і управління,

$\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m, \mathbb{R}^r$ -евклідові простори з вимірами  $n, m, r$ ,

$V_x, V_y, V_u$ - припустимі відкриті множини зміни стану, виходу та управління.

В зв'язку з тим, що в робочому діапазоні зміщення вхідних змінних поведінка об'єкту може бути описана лінійним векторно-матричним рівнянням, задача (1) для більшості практичних застосувань має такий вигляд:

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u}, \quad \bar{x}(t_n) = \bar{x}_n \in V_x, \quad \bar{y} = \bar{c}\bar{x}$$

$$\bar{x} \in V_x \subset \mathbb{R}^n, \quad \bar{u} \in V_u \subset \mathbb{R}^m, \quad \bar{y} \in V_y \subset \mathbb{R}^r, \quad (2)$$

$$I = \int_0^{\infty} f_0(\bar{x}, \bar{u}) \rightarrow \min_{\bar{u} \in V_u}$$

У сформульованих задачах задання показника якості проводиться шляхом добору вигляду функціоналу  $I$ .

Відомо, що аналітичні методи вимагають значних спрощень як

моделі об'єкту, так і розрахункових залежностей. В роботі запропоновано комплексний підхід, при якому на першому етапі розв'язується задача аналітичного синтезу, а на другому - проводиться уточнення параметрів регулятора з використанням пошукової параметричної оптимізації.

Задача аналітичного конструювання має такий вигляд:

$$\bar{\dot{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u}, \quad \bar{x}(t_n) = \bar{x}_n \in V_x, \quad \bar{y} = c\bar{x},$$

$$I = \int_0^{\infty} (\alpha V(\bar{x}) + \bar{u}^T R \bar{u}) dt \rightarrow \min_{\bar{u}(\bar{x})} \quad (3)$$

$$\frac{dV(\bar{x})}{dt} = -(\alpha V(\bar{x}) + \bar{u}^T R \bar{u}), \quad \alpha = \alpha_{зад}$$

де  $V(\bar{x})$  - функція Ляпунова  $2^{ro}$ ,  $4^{ro}$ ,  $6^{ro}$  або  $8^{ro}$  порядку.

$\alpha$  - ступінь згасання;  $R$  - матриці вагомості;  $u$  - вектор параметрів.

Задача пошукової параметричної оптимізації:

$$I = I(\bar{y}, u(\bar{q}, \bar{x}), \bar{e}, \bar{e}) \rightarrow \min_{q \in V_q}$$

$$\bar{\dot{x}} = \varphi(\bar{x}, \bar{u}, t), \quad \bar{x}(t) = \bar{x}, \quad (4)$$

$$\bar{y} = \bar{y}(\bar{x}, t), \quad \bar{u} = \bar{u}(\bar{y}, \bar{q}),$$

де  $\bar{e}, \bar{e}$  - вектори коефіцієнтів функціоналу,  $\bar{q}$  - вектор параметрів регулятора.

Розглянуто розв'язання першої задачі для функції Ляпунова-Беллмана  $V(\bar{x}) = V_2(\bar{x}) + V_4(\bar{x})$ ,

де  $V_2(\bar{x}), V_4(\bar{x})$  - форми другої та четвертої степені.

Тепер загальна задача синтезу може бути піддана декомпозиції, внаслідок чого можна обокремити лінійну і нелінійну задачі, які розв'язуються незалежно.

Рішення лінійної задачі має такий вигляд:

$$U_n = -0.5R^{-1}B^T \text{grad } V_2(\bar{x}),$$

а нелінійної

$$U_{\text{нл}} = -0.5R^{-1} B^T \text{grad } V_4(\bar{x}).$$

Коефіцієнти функції Ляпунова визначаються з системи лінійних рівнянь, які отримані для об'єктів 2-го – 4-го порядку.

Друга задача вирішується з використанням методів пошукової оптимізації. З метою прискорення збіжності запропоновано використовувати метод що значно підвищує швидкість, знижує обчислювальні витрати.

Метод складається з наступних процедур:

1. Задавання показників якості з використанням еталонної моделі.
2. Використання процедури інтервалів, що поширюються, для відсікання нестійких моделей, що зменшує час пошуку.
3. Оптимізація в підпросторі параметрів, кількість і склад яких визначає розробник за апріорною інформацією.

Черговість підпросторів при оптимізації параметрів нелінійного регулятора може встановлюватись жорстко або переключатись за будь якою ознакою, наприклад, по амплітуді збурення, яке викликає перехідні процеси в системі.

Запропонований алгоритм оптимізації має такий вигляд:

$$\bar{q}_v^{(k+1)} = \arg \min_l (q_1^{(k+1)}, q_2^{(k+1)}, \dots, q_{v-1}^{(k+1)}, q_v, \bar{q}_{v+1}^{(k)}, \dots, q_s^{(k)}),$$

$$v \in \bar{1}, S, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \frac{T_m}{T_k},$$

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_s \end{bmatrix}, \quad \bar{q}_1 = \{q_{j_1}, \dots, q_{s_1}\}, \quad \bar{q}_s = \{q_{j_s}\},$$

$$j_1 \in D_1, \dots, j_s \in D_s,$$

$$k \in 0, \frac{T_m}{T_k}, \quad T_m^{(t)} = T_m^{(t-1)} + A \cdot k,$$

де  $D_1, \dots, D_s$  - множини індексів параметрів, які настроюються;

$A$  - постійна величина, наприклад 0,5;

$t=1,2,\dots,l$ ;

$T_m$  - інтервал оптимізації;

$T_k$  - період дискретизації.

$D_1, \dots, D_S$  - визначаються розробником під конкретну задачу.

Черговість оптимізації по векторах параметрів  $\bar{q}_v$  добирається шляхом призначення індексів  $v$  в залежності від параметрів та величини сигналу збурення.

Оптимізація системи по векторах  $\bar{q}_v$  виконується методом нульового порядку (Хука-Дживса, випадкового пошуку) з урахуванням можливих обмежень.

В дисертаційній роботі значне місце присвячено розробці системи автоматичного управління (САУ) процесу випарювання, а також технічних пристроїв для контролю концентрації аміачної селітри і автоматичного очищення внутрішньої поверхні трубопроводів.

Основними функціями запропонованої САУ є:

1. Стабілізація концентрації розчину селітри за допомогою каскадної системи регулювання.
2. Стабілізація рівней та витрат розчину селітри.
3. Розрахунок концентрації селітри після буферного баку за термограмою охолодження селітри.

Перший каскад системи регулювання отримує інформацію про усереднену концентрацію за допомогою адаптивної моделі:

$$b_{1i} = A_i^T \cdot x_i, \quad A_i^T = [a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}],$$

$$x_i^T = [1, x_{1i}, x_{2i}], \quad i = 1, 2;$$

де  $x_{1i}, x_{2i}$  - нормовані значення витрати і температури розчину селітри;

$b_{1i}$  - концентрація селітри після 1-го і 2-го випарувального апаратів.

Для підстройки параметрів моделі використовується узагальнений алгоритм. Проведені порівняльні дослідження узагальненого та однокрокового алгоритмів ідентифікації показали, що в умовах, коли входи корельовані, узагальнений алгоритм має суттєві переваги.

Алгоритм роботи регулятора 1-го каскаду обрано нелінійним. Його розрахунок виконано з використанням алгоритмів, які отримані у главі 3. У дискретній формі цей закон управління має такий вигляд:

$$P_i = P_{i-1} + q_0 \varepsilon_i + q_1 \varepsilon_{i-1} + q_2 \varepsilon_{i-2} + q_3 \varepsilon_i^2 \Delta \varepsilon_i + q_4 \varepsilon_i \Delta \varepsilon_i^2 + q_5 \varepsilon_i^3 + q_6 \Delta \varepsilon_i^3.$$

Порівняльний аналіз лінійного та нелінійного регуляторів показав значні переваги останнього, особливо при діях стрибкоподібних збурювань по завданню та початковим умовам.

Другий каскад системи здійснює корегування завдання цифровому регулятору 1-го каскаду по концентрації плава на виході буферної ємкості. Концентрація розраховується за температурою кристалізації, яка вимірюється розробленим пристроєм.

В роботі запропоновано систему автоматичного контролю технологічними процесами за температурою фазового переходу. До складу системи входить проточна або занурювальна чарунка, в яку подається розчин і теплоносій, а також контролер, функціями якого є керування вимірювальною чарункою та обробка термограм охолодження. Система контролю концентрації має універсальний характер і крім виробництва мінеральних добрив (аміачна селітра, карбомід) може використовуватися в інших виробництвах, де хід процесів контролюється за температурою кристалізації.

З метою скорочення вимірювального циклу розроблена конструкція відбірного пристрою, який містить в собі камеру, до якої подається теплоносій для розігріву, а вимірювальна частина з'єднана з поплавцем і має можливість пересування.

Термограма охолодження, яка використовується для розрахунку концентрації селітри, може мати похибки, що ускладнює визначення температури кристалізації. З використанням теорії нечітких множин розроблено алгоритм ідентифікації, для якого запропановані такі функції приналежності:

$$\mu_{x_1} \text{ "ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ"} = \frac{1}{1 + 0.02 \cdot U_1^2}$$

$$\mu_{x_1} \text{ "СЛАБИЙ НАХИЛ"} = \frac{1}{1 + 0.02 \cdot |U_1 - 4| + 0.006 \cdot |U_1 - 4|^2}$$

$$\mu_{x_1} \text{ "СИЛЬНИЙ НАХИЛ"} = \frac{1}{1 + 0.02|U_1 - 34| + 0.006|U_1 - 34|^2}$$

$$\mu_{x_2} \text{ "МАЛИЙ"} = \frac{1}{1 + 0.04U_2 + 0.002U_2^2}$$

$$\mu_{x_2} \text{ "ВЕЛИКИЙ"} = \frac{1}{1 + 0.04 \cdot |U_2 - 34| + 0.002 \cdot |U_2 - 34|^2}$$

$$\mu_{x_3} \text{ "ДОСТАТНІЙ"} = \begin{cases} \frac{1}{1 - 4.5 \cdot U_3 + 2.5 \cdot U_3^2}, & \text{як що } 0 \leq U_3 \leq 4.5; \\ 0, & \text{як що } U_3 > 4.5 \end{cases}$$

$$\mu_{x_3} \text{ "НЕДОСТАТНІЙ"} = \begin{cases} \frac{1}{1 - 4.5 \cdot U_3 + 2.5 \cdot U_3^2}, & \text{як що } 0 \leq U_3 \leq 4.5; \\ 0, & \text{як що } U_3 > 4.5 \end{cases}$$

$x_1, x_2, x_3$  - лінгвістичні змінні, які характеризують кут нахилу термограми в зоні кристалізації, середньоквадратичні похибки вимірювання температури кристалізації та ширину горизонтальної частини термограми відповідно.

$$u_1 \in [0^\circ, 90^\circ], u_2 \in [0, 0.05], u_3 \in [0 \text{ жыл.}, 10 \text{ жыл.}] - \text{числові множини,}$$

які відповідають лінгвістичним змінним  $x_1, x_2, x_3$ .

Розв'язальне правило має вигляд: якщо  $\{(x_1 = \text{"горизонтальна"}) \vee (x_1 = \text{"слабкий нахил"})\} \wedge \{(x_2 = \text{"малий"}) \wedge (x_3 = \text{"достатній"})\}$ , тоді  $\{\text{"виміряти температуру кристалізації"}\}$ . В іншому випадку, якщо

$\{(x_1 = \text{"сильний нахил"}) \vee (x_2 = \text{"великий"})\}$ , тоді {"вимірювання неможливе"}. В іншому випадку, якщо  $\{(x_1 = \text{"горизонтальна"}) \vee (x_1 = \text{"слабкий нахил"}) \wedge (x_2 = \text{"малий"}) \wedge (x_3 = \text{"недостатній"})\}$  тоді {"продовжувати фіксувати термограму"}.

Використання такого алгоритму суттєво підвищує надійність ідентифікації температури кристалізації і відповідно всієї системи управління.

У ряді випадків введення стабілізуючих добавок в розчин селітри пов'язано зі значними технічними труднощами, які обумовлені необхідністю отримання стійкої суспензії. Швидке розшарування суспензії призводить до нерівномірності розподілу добавок у розчині селітри, а також до відкладання осаду на внутрішніх стінках трубопроводів і датчиків. В дисертації запропоновано систему внесення домішок з використанням кавітаційних змішувачів. Розроблено декілька конструкцій, які захищені авторськими свідоцтвами та патентами.

Відкладання осаду на внутрішніх поверхнях трубопроводів спричиняє скорочення міжремонтних періодів роботи устаткування і знижує ефективність АСР відділення випарювання. Перспективним засобом боротьби з цим недоліком є використання автоматичних пристроїв для періодичного очищення внутрішньої поверхні трубопроводів. В роботі розроблена конструкція пристрою, який дозволяє виконувати періодичне очищення трубопроводів. Оригінальність конструкції захищена авторськими свідоцтвами.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Виконано аналіз функціонування процесу випарювання аміачної селітри та варіантів реалізації технологічного процесу. Показано, що головними задачами при створенні системи автоматизації є побудова

математичної моделі відповідно до конкретного апаратного оформлення процесу, вдосконалення системи регулювання концентрації селітри на різних стадіях випарювання, вдосконалення пристрою контролю концентрації по температурі кристалізації, використання спеціальних нелінійних регуляторів, малочутливих до величини збурювання, в тому числі і ступеневого характеру, вдосконалення об'єкту автоматизації завдяки створенню ефективної технології введення стабілізуючих добавок, що дозволяє використовувати дешеві малорозчинні добавки у вигляді суспензій, а також використання спеціальних автоматичних пристроїв для очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів.

2. Розроблено аналітико-експериментальну модель відділення випарювання відповідно до апаратного оформлення технологічного процесу Череповецького азотно-тукового заводу. Модель представлена у вигляді передаточних функцій окремих технологічних дільниць і дозволяє отримувати характеристики процесу з основних каналів управління та збурювання. Перевірка адекватності моделі реальному об'єкту автоматизації показала, що аналітична модель дає похибки 30-100 %, а уточнена аналітико-експериментальна — 5-10 %. Отримана модель використана як стартова при розробці адаптивного алгоритму управління процесу, а також дозволяє будувати моделі для будь-якої конфігурації технологічного процесу випарювання селітри.

3. Запропоновано двохкаскадну систему автоматичного управління процесу випарювання, яка включає контури стабілізації концентрації селітри з використанням адаптивної моделі та корекції завдання стабілізуючого регулятора за температурою кристалізації селітри, причому підстройка моделі також виконується за температурою кристалізації.

4. Сформульовано та розв'язано задачу синтезу нелінійного регулятора, малочутливого до величини ступеневого збурювання за початковим значенням змінних стану та по завданню, яка складається з задач синтезу лінійного, нелінійного регуляторів та параметричного синтезу з використанням пошукових методів оптимізації.

Отримані аналітичні вирази для розв'язання задачі синтезу лінійного і нелінійного регуляторів з використанням методу динамічного програмування та методу функцій Ляпунова - Беллмана і Ляпунова - Красовського - Беллмана.

5. Розроблено алгоритм параметричного оптимального синтезу детермінованих регуляторів з використанням методу інтервалів, які поширюються для пошуку екстремуму.

Реалізований в діалоговому режимі алгоритм показав можливість суттєвого скорочення часу для пошуку оптимума (в 2-3 рази).

6. Запропоновано конструкція пристрою для контролю температури кристалізації аміачної селітри, яка складається: а) з поплавця, жорстко зв'язаного з вимірювальною посудиною, яка має можливість пересування, б) з додаткових камер, в які подається теплоносії для прискорення розігріву закристилізованої проби, що дозволяє суттєво скоротити цикл вимірювання.

Новина пристрою захищена авторським свідоцтвом на винахід.

7. З метою підвищення надійності функціонування пристрою контролю температури кристалізації запропоновано метод обробки кривих охолодження, який включає алгоритм розпізнавання та відбраковки викривлених термограм і ґрунтується на використанні нечітких множин.

8. Запропоновано підхід і пристрій для введення в селітру стабілізуючих малорозчинних добавок. Основним елементом

пристрою є кавітаційний змішувач, новина якого захищена кількома авторськими свідоцтвами та патентами.

Стійкість суспензії, яку отримують в такому пристрої, знижує відкладання твердого осаду на поверхнях випарних апаратів та в магістральних трубопроводах.

9. З метою збільшення періоду регенерації обладнання відділення випарювання запропоновано пристрій автоматичного очищення внутрішніх поверхонь трубопроводів, який визнано винаходом.

10. Результати роботи використано при впровадженні АСУ ТП аміачної селітри на Череповецькому азотно-туковому заводі, впроваджені в навчальний процес кафедри АТЕП теплоенергетичного факультету НТУУ "КПІ", а також знайшли широке використання на теплових електричних станціях АТ "Мосенерго" та АК "Київенерго" для зниження шкідливих викидів в навколишнє середовище при спалюванні мазута, а також в машинобудуванні - з метою утилізації рідин з домішками мазуту і мастил.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ:

1. Булгаков А.Б. Алгоритм синтеза квазиоптимальных систем управления // Математическое моделирование и программное обеспечение в АСУ ТП: Сб. тр. - К.: Институт автоматизи, 1987. - 3 с.

2. Кваско М.З., Бидюк П.И., Булгаков А.Б. Микропроцессорная система оптимального управления процессом выпаривания // Химическое машиностроение: Респ. межвед. сб. - 1988. - Вып.48. - С. 93-96.

Автором запропановано структуру та основні контури управління процесом випарювання.

3. Автоматизация процесса упаривания аммиачной селитры / А.П.Мовчан, А.Б.Булгаков, В.Ф.Мысак, Ю.А.Кононицын // Автоматизированные системы контроля и управления АПК. - К.: Ин-т автоматизи, 1988. - С.62-68.

Автором запропановано критерій управління та розроблено математичну модель відділення випарювання.

4. Булгаков А.Б. Повышение быстродействия систем управления химико-технологическими процессами // Химическое машиностроение: Респ. межвед. сб. - 1988. - Вып.48. - С. 89-92.

5. Мовчан А.П., Демченко А.М., Мысак В.Ф., Булгаков А.Б., Довгаль А.А. Измерение концентрации плава по температуре фазового перехода. НТУУ "КПИ". Рукоп. депонир. в ГНТБ Украины. - К. - № 1771- Ук 96. 1996 - 8 с.

Автором розроблено алгоритм розпізнавання та відбраковки термограм з похибками пристрою для вимірювання температури кристалізації плаву аміачної селітри.

6. Плесконос А.К., Булгаков А.Б., Миленский В.В. Исследование особенностей использования алгоритмов адаптации. Рукоп. депонир. в УкрНИИНТИ. - К. - № 931 Ук - 85. Деп. 1985 - 8 с.

Автором виконано порівняльний аналіз алгоритмів адаптації математичної моделі процесу випарювання, проведено дослідження розрахункових та експериментальних характеристик моделі.

7.А.С.1603267 SU. Устройство для определения температуры фазового перехода / А.П.Мовчан, В.Ф.Мысак, Ю.А.Кононицын, М.А.Галициян, А.Б.Булгаков.-1990.- Бюл.№ 40.

Автором розроблено спосіб підвищення швидкодії пристрою для контролю температури кристалізації та конструкція пробовідбірника.

8.А.С.1442285 SU. Устройство для очистки внутренней поверхности трубопровода/ Л.А.Каплинский, А.Б.Булгаков, Ю.П.Зайченко и др.-1988.- Бюл.№ 45.

Автором розроблено конструкцію робочого елемента та алгоритм роботи пристрою.

9.А.С.1535562 SU. Устройство оптимальной остановки выпарной установки на очистку / А.К.Плесконос, М.З.Кваско, А.Б.Булгаков и др.-1990.- Бюл.№ 2.

Автором розроблено алгоритм функціонування та запропоновано технічну реалізацію пристрою оптимальної зупинки випарювального апарату на очищення.

10.А.С.1569812 SU. Многозарядный накапливающий пневматический сумматор / В.П.Романцов, А.Б.Булгаков, Ю.П.Зайченко, А.П.Мовчан.- 1990.- Бюл.№ 21.

Автором запропоновано технічну реалізацію методу підвищення швидкодії складових блоків системи управління хіміко-технологічним процесом.

11.Патент на винахід № 9648 А Україна. Змішувач. Булгаков Б.Б., Булгаков О.Б.- 1996.- Бюл.№ 3.

Автором розроблено конструкцію кавітаційних елементів.

12.Решение о выдаче патента РФ от 09.01.1996 г. по заявке № 95106245/26(01530). Смеситель. Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б.

Автором запропановано технічну реалізацію кавітаційного змішувача, який може використовуватися для обробки суміші стабілізуючих добавок з розчином селітри.

13.Решение о выдаче патента РФ от 13.12.1995 г. по заявке № 94018284/26(017900). Кавитационный смеситель. Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б.

Автором розроблено блок послідовно розташованих кавітаційних елементів змішувача.

14.Решение о выдаче патента РФ от 23.09.1994 г. по заявке № 94018286/26(017902). Смеситель. Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б., Преснов Г.В.

Автором розроблено механізм регулювання продуктивності кавітаційного змішувача.

15.Решение о выдаче патента РФ от 28.06.1994 г. по заявке № 94018285/26(017901). Статический смеситель. Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б.

Автором запропановано конструкцію вузла введення компонентів.

16.Мовчан А.П., Булгаков А.Б. Методы синтеза оптимальных систем управления. Метод. указания. -К.-: КПИ, 1990.- 44 с.

Автором розроблено алгоритм параметричного синтезу оптимального нелінійного регулятора.

Булгаков А.Б. Управление процессом выпаривания в производстве аммиачной селитры. Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - Автоматизация технологических процессов и производств. Национальный технический университет Украины "КПИ". Киев, 1997г.

Защищаются метод и алгоритмы для аналитического синтеза нелинейных регуляторов, алгоритм поисковой параметрической оптимизации, а также аналитико-экспериментальная модель процесса выпаривания и технические способы и устройства повышения эффективности функционирования системы управления процессом выпаривания в производстве аммиачной селитры.

Цель исследований - разработка эффективной системы автоматического управления процессом выпаривания аммиачной селитры с использованием микропроцессорных контроллеров и усовершенствование аппаратурного оформления объекта автоматизации как необходимое условие эффективного функционирования системы автоматического управления. Разработан метод синтеза алгоритмов автоматического управления в условиях существенных скачкообразных возмущений, проведено исследование синтезированных регуляторов. Предложен метод распознавания термограмм плава аммиачной селитры, основанный на применении теории нечетких множеств при анализе кривых охлаждения плава в датчике концентрации.

Bulgakov A.B. The regulation of evaporation process under manufacture of ammonia nitre. Manuscript. - Automation of technological processes and productions, National Technical University of Ukraine "KPI", Kiev, 1997.

The method and algorithms to analytical synthesis of non linear regulators optimal parameters searching algorithm and also the analytical experimental model of process of evaporation and technical processes and facilities of increasing the efficiency of regulation system of process of evaporation under manufacture of ammonia nitre are defended.

The purpose of investigations are - to work out the effective system of automatic regulations under the process of evaporation of ammonia nitre with using micro controllers and to improve the facilities of object as necessary condition of effective functioning the system of automatic regulation.

The method of synthesis of algorithms of automatic regulation providing effective work under the condition of sufficient spasmodic disturbance was worked out. And also investigations of synthesized regulators were conducted.

The method of recognizing the heat diagrams of ammonia nitre fuse based on using the theory of slipshood multitude under the analyze of curve cooling of fusing in sensing element of concentration was elaborated.

Ключові слова: аналітико-експериментальна модель, оптимізація, нелінійний регулятор, нечіткі множини, температура кристалізації, кавітаційний змішувач.



Подписано к печати 02.04.97. Формат 60х90 1/16.  
Бумага типографская № 2. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1, 39. Физ. печ. л. 1, 5.  
Заказ 468. Тираж 100.  
Ул. Суворова, 4/6. КСС.



125342

**AV 37.363**