

#### Висновки

Розроблено алгоритми, що на основі аналізу електротермічного й термопружного станів виробів під час кампанії графітації в печі Ачесона забезпечують оптимальне керування процесом, дозволяючи одержувати продукцію високої якості за будь-якого режиму підведення потужності.

На якість оцінювання стану печі вирішальним чином впливає точність визначення параметрів моделей. Визначення властивостей пічних матеріалів за високих температур буде предметом подальших досліджень.

#### Список використаної літератури

1. *Соседов, В. П.* Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
2. *Коржик, М. В.* Керування стадією розігріву печі графітації [Текст] / М. В. Коржик // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – № 2. – С. 69-78.
3. *Коржик, М. В.* Розробка системи керування процесом графітації в печах Ачесона [Текст] / М. В. Коржик, Г. І. Гурчик // Вісн. НТУУ «КПІ» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – № 1. – С. 98-103.
4. *Коржик, М. В.* Модель температурного поля печі графітації [Текст] / М. В. Коржик, С. В. Кутузов // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2007. – № 1. – С. 17-23.
5. *Коржик, М. В.* Вдосконалення регламенту графітації електродних виробів [Текст] / М. В. Коржик, І. Л. Шилович, А. І. Жученко, О. Ю. Уразліна // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 2. – С. 107-109.
6. *Цирлин, А. М.* Оптимальное управление технологическими процессами [Текст] / А. М. Цирлин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

*There is developed control algorithm of graphitization process in Acheson kiln which, on the basis of the analysis of a thermoelastic condition of products during campaign, allows to receive final quality products both in routine, and abnormal mode of a supply of capacity.*

**Keywords:** *graphitization Acheson kiln, control algorithm, thermoelastic state.*

Надійшла до редакції 12.01.2012

---

УДК 681.51 : 681.3

ДУБІК Р. М., асп.; ЛАДІЄВА Л. Р., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНТАКТНОЮ МЕМБРАННОЮ ДИСТИЛЯЦІЄЮ З ВИКОРИСТАННЯМ $\mu$ -СИНТЕЗУ

*Розв'язано задачу оптимального керування контактною мембранною дистиляцією за умов невизначеності. Розглянуто систему керування з субоптимальним  $\mu$ -регулятором, проаналізовано робастність замкненої системи.*

**Ключові слова:** *система керування, субоптимальний  $\mu$ -регулятор, контактна мембранна дистиляція.*

#### Постановка проблеми

Керування контактною мембранною дистиляцією (КМД) ускладнюється протягом експлуатації мембранного модуля (ММ) внаслідок зміння характеристик мембрани, наприклад її пористості, та усередненого коефіцієнта теплопередачі. Синтез закону керування за умов невизначеності здійснювали з метою підвищення робастності перехідних характеристик, що актуально для керування процесом. Для розв'язку поставленої задачі досліджували можливість застосування  $\mu$ -регулятора.

**Метою** статті є проектування системи керування КМД за допомогою  $\mu$ -синтезу, яка б забезпечувала достатню якість перехідних характеристик, необхідну точність і робастність за умов невизначеності. Вимоги до систем керування висували в частотній і часовій області за неповного вимірювання вектора стану.

© Дубік Р. М., Ладієва Л. Р., 2012

**Виклад основного матеріалу**

Система керування, розроблена на базі  $H_\infty$  оптимізації [2], у нашому випадку дає надійну стійкість проти параметричних збурень і номінальну якість. Щоб досягти більш надійної робастної стійкості та якості, застосовували метод, що базується на структурованому сингулярному числі  $\mu$ , значення якого використовують для аналізу робастності. Розглядали параметричні збурення в системі керування.

Щоб скористатися технологією  $\mu$ -синтезу, наведемо у вигляді дробово-лінійного перетворення (ДЛП) математичну модель, розроблену в праці [5] (рис. 1). Тут  $P(s)$  – узагальнений об’єкт керування, що враховує вагові передатні функції;  $s$  – змінна Лапласа;  $u_{ij}(t)$ ,  $y_{ij}(t)$  – додаткові входи й виходи, спричинені параметричними збуреннями;  $w(t)$  – узагальнене збурення, що складається з  $v_{ij}(t)$  і  $d(t)$ ;  $v_{ij}(t)$  – збурення внаслідок невизначеностей об’єкта;  $z(t)$  – вектор похибки об’єкта. Розглядали нижнє ДЛП для номінального об’єкту (без невизначеностей) (рис. 2).

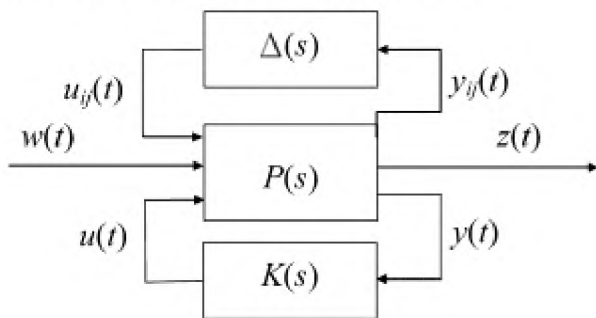


Рис. 1 – Дробово-лінійне перетворення

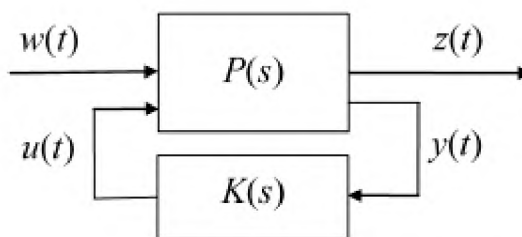


Рис. 2 – Зведення до нижнього ДЛП

Система, зведена до нижнього ДЛП, описується рівняннями:

$$\begin{bmatrix} z(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(s) \\ u(s) \end{bmatrix}, \quad u(s) = K(s)y(s), \quad (1)$$

де розмірності блоків  $P_{ij}(s)$  відповідають вхідним і вихідним векторам та отримують відповідним розбиттям матриці передатних функцій. Виключивши з системи рівнянь (1)  $u(t)$  і  $y(t)$ , одержали нижнє ДЛП  $F_L(P, K)$ , що зв’язує між собою  $w(t)$  і  $z(t)$ :

$$M(s) = P_{11}(s) + P_{12}(s)K(s)(I - P_{22}(s)K(s))^{-1}P_{21}(s) = F_L(P, K). \quad (2)$$

Увівши матрицю  $\Delta(s)$ , що описує невизначеності коефіцієнтів рівнянь динаміки [1], а також додаткові входи  $u_{ij}(t)$  і виходи  $y_{ij}(t)$ , що породжуються цими невизначеностями, одержимо верхнє ДЛП (рис. 3).

Розглядали структуровані параметричні збурення, що описуються верхніми й нижніми межами елементів матриць А, В, С і D математичної моделі об’єкта в просторі станів [3]. У цьому випадку  $\Delta(s)$  є дійсною діагональною матрицею. Зв’язок між векторами виходу  $z(t)$  і входу  $w(t)$  є матрицею передатних функцій верхнього ДЛП

$$F_U(P, K) = M_{11}(s) + M_{12}(s)\Delta(s)(I - M_{11}(s)\Delta(s))^{-1}M_{12}(s), \quad (3)$$

де блоки  $M_{ij}(s)$  одержали відповідним розбиттям матриці  $M(s)$ . Верхнє ДЛП зведено до  $M$ - $\Delta$ -конфігурації (рис. 4).

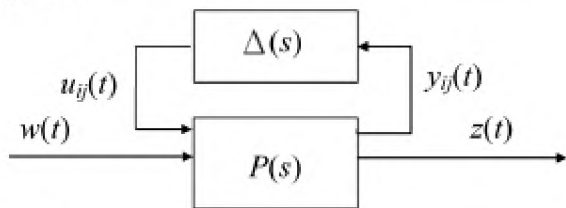


Рис. 3 – Зведення до верхнього ДЛП

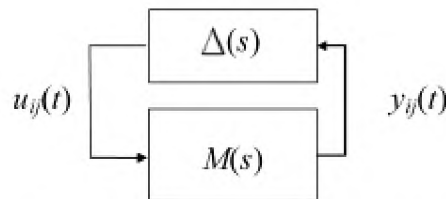


Рис. 4 – Зведення до  $M$ - $\Delta$ -конфігурації

Матриця  $M(s)$  детально відображає  $M(P, K)$ , сформованою  $M_{ij}(s)$  залежно від  $P_{ij}(s)$  і  $K(s)$ . На основі  $M$ - $\Delta$ -конфігурації визначали структуроване сингулярне число

$$\mu_{\Delta}^{-1}(M) = \min_{\Delta \in \Delta} \{ \delta(\Delta(j\omega)) : \det(I - M(j\omega)\Delta(j\omega)) = 0 \}. \quad (4)$$

де  $\bar{\Delta} = \left\{ \text{diag} [\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_s I_{r_s}, \Delta_{f_1}, \dots, \Delta_f] : \delta_i \in \mathbb{C}, \Delta_j \in C^{m_j \times m_j} \right\}$  – множина матриць  $\Delta(j\omega)$ , що задовольняє виразу (4) і визначається залежно від матриці перетворень  $M \in C^{m \times n}$ ;  $\sum_{i=1}^s r_i + \sum_{j=1}^f m_j = n$  – розмірність блоку  $\Delta(j\omega)$ .

Щоб оцінити робастну якість і стійкість замкненої системи застосовували критерій

$$\sup_{\omega \in \mathfrak{R}} \mu \left[ M(P(j\omega), K(j\omega)) \right] < 1. \quad (6)$$

Матрична ланка зворотного зв'язку визначалася за виразом

$$\inf_{K(s)} \sup_{\omega \in \mathfrak{R}} \mu \left[ M(P(j\omega), K(j\omega)) \right]. \quad (7)$$

Метод  $D$ - $K$ -ітерацій в пакеті MATLAB відбувається в інтерактивному режимі, на кожній ітерації на екрані відображається значення (7). Виходячи з питання робастної стійкості, використовували діагональну матрицю масштабування  $D(j\omega)$ , що комутує з  $\Delta(j\omega)$ , тобто

$$\Delta(j\omega) : \Delta(j\omega)D(j\omega) = D(j\omega)\Delta(j\omega). \quad (8)$$

Застосуванням  $\mu$ -синтезу за допомогою  $D$ - $K$ -ітерацій вирішують задачу оптимізації для матричної ланки  $K(s)$  і скалярної діагональної матриці  $D$

$$\inf_{K(s)} \sup_{\omega \in \mathfrak{R}} \inf_{D \in \mathcal{D}} \bar{\sigma} \left[ DM(P(j\omega), K(j\omega))D^{-1} \right], \quad (9)$$

де  $\bar{\mathcal{D}}$  – множина матриць, комутованих з  $\Delta(j\omega)$ . Тобто підбирали таку матрицю, що

$$\mu \left[ M(P(j\omega), K(j\omega)) \right] \leq \inf_{D \in \bar{\mathcal{D}}} \bar{\sigma} \left[ DM(P(j\omega), K(j\omega))D^{-1} \right], \quad \forall \omega \in \mathfrak{R}. \quad (10)$$

З урахуванням (6) стійкість регулятора

$$\sup_{\omega \in \mathfrak{R}} \inf_{D \in \bar{\mathcal{D}}} \bar{\sigma} \left[ DM(P(j\omega), K(j\omega))D^{-1} \right] < 1 \quad (11)$$

У методі  $D$ - $K$ -ітерацій послідовно для  $K$  і  $D$  кроків виконують мінімізацію (9) і зменшення (11). Для фіксованої матриці  $D$ , що обчислюють за виразом (9), стандартна задача  $H_\infty$  оптимізації:

$$\inf_{K(s)} \left\| DM(P(s), K(s))D^{-1} \right\|_\infty. \quad (12)$$

Додатково розраховують

$$\inf_{K(s)} \left\| DF_L(P(s), K(s))D^{-1} \right\|_\infty = \inf_{K(s)} \left\| F_L(\tilde{P}(s), K(s)) \right\|_\infty, \quad (13)$$

$$\text{де } \tilde{P}(s) = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} P(s) \begin{bmatrix} D^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}.$$

З іншого боку, за фіксованого значення  $K(s)$ ,  $\inf_{D \in \bar{\mathcal{D}}} \bar{\sigma} \left[ DM(P(j\omega), K(j\omega))D^{-1} \right]$ ,  $\forall \omega \in \mathfrak{R}$ , є опуклою задачею оптимізації. Після мінімізації в заданому діапазоні частот результуючу діагональ матриці  $D(s)$  апроксимують раціональною передатною матрицею  $D(s)$ , що буде використана в подальшому для  $K$ .

$D$ - $K$ -ітерації  $\mu$ -синтезу виконували так:

1. Задавали початкову матрицю  $D(j\omega)$  як одиничну, тобто  $D = I$ ;

2. Для фіксованої матриці  $D(j\omega)$  розв'язували задачу оптимізації  $K(s) = \arg \inf_{K(s)} \left\| F_L(\tilde{P}(s), K(s)) \right\|_\infty$ .

3. За фіксованого  $K(s)$  розв'язували задачу опуклої оптимізації для  $D(j\omega)$  на кожній із заданого діапазону частот

$$D(j\omega) = \arg \inf_{D \in \bar{\mathcal{D}}} \bar{\sigma} \left[ D(j\omega)F_L(P(j\omega), K(j\omega))D^{-1}(j\omega) \right], \quad \forall \omega \in \mathfrak{R}$$

4. Одержану  $D(j\omega)$  апроксимували стійкою й мінімально-фазовою  $D(s)$ , після чого поверталися до кроку 2 і повторювали операції, поки не досягалася задана точність чи максимально-задана кількість ітерацій в (11).

Робастну якість замкненої системи гарантує виконання умови

$$\left\| \begin{bmatrix} W_P(s)(I + F_U(G, \Delta)K)^{-1} \\ W_U(s)(I + F_U(G, \Delta)K)^{-1} \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1, \quad (14)$$

де  $W_P(s)$ ,  $W_U(s)$  – відповідні вагові функції;  $F_U$  – верхнє дробово-лінійне перетворення.

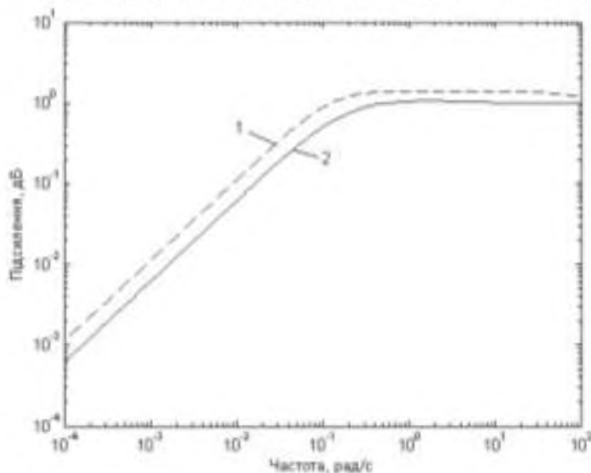
Після чотирьох ітерацій одержано регулятор п'ятого порядку з кінцевим значенням  $\gamma = 1,010$  і верхньою межею для  $\mu = 1,000$ .

#### Аналіз замкненої системи з $\mu$ -регулятором

Установлено, що функцію чутливості замкненої системи розташовано нижче оберненої вагової функції (рис. 1). Це означає, що досягнуто якість номінальної системи.

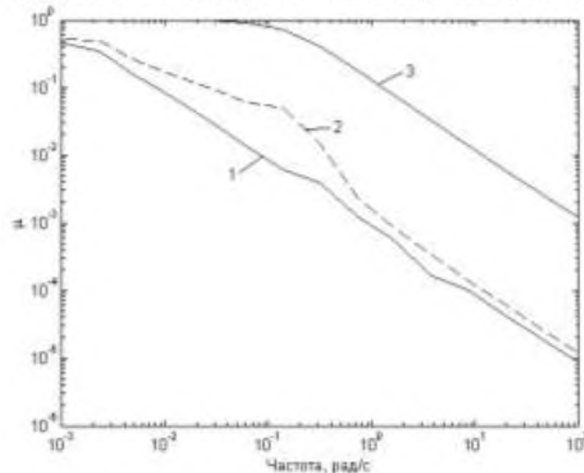
Стійкість системи зберігається для  $\|\Delta\|_\infty < 1/0,8$  (рис. 2). Умови (11) і (12) виконуються, максимальне значення  $\mu = 0,97$  (рис. 3). Це означає, що для кожного діагонального елемента  $\Delta$ , де  $\|\Delta\|_\infty < 1$ , досягнуто робастної стійкості.

Функції чутливості збурень в замкненій системі розташовано нижче оберненої вагової функції (рис. 4).



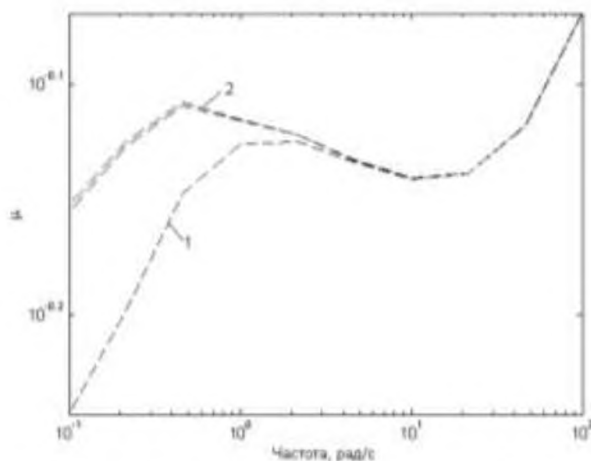
1 – обернена вагова функція  $W_p(s)$ ;  
2 – функція чутливості замкненої системи

**Рис. 1 – Функція чутливості та обернена вагова функція  $W_p(s)$**



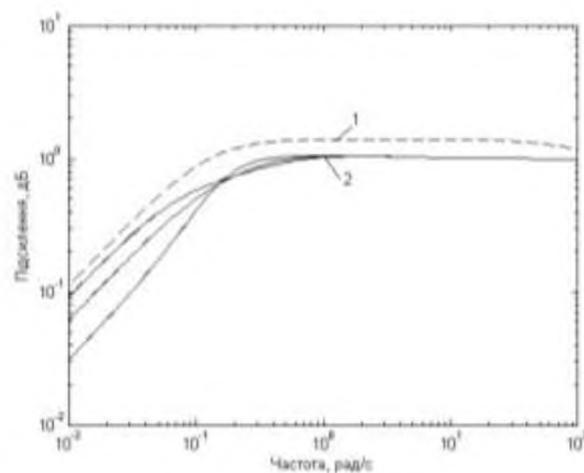
1, 3 – нижня й верхня межі структурованого сингулярного числа  $\mu$ ; 2 – робастна стійкість

**Рис. 2 – Робастна стійкість**



1 – номінальна якість; 2 – робастна якість

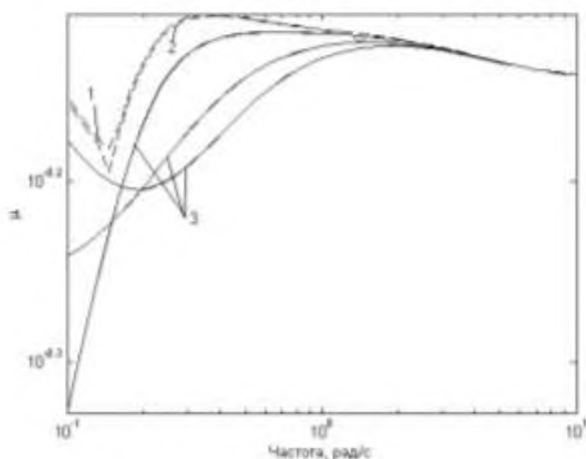
**Рис. 3 – Номінальна й робастна якість**



1 – обернена вагова функція  $W_p(s)$ ;  
2 – криві функцій чутливості збурень

**Рис. 4 – Функції чутливості збуреної системи та обернена вагова функція**

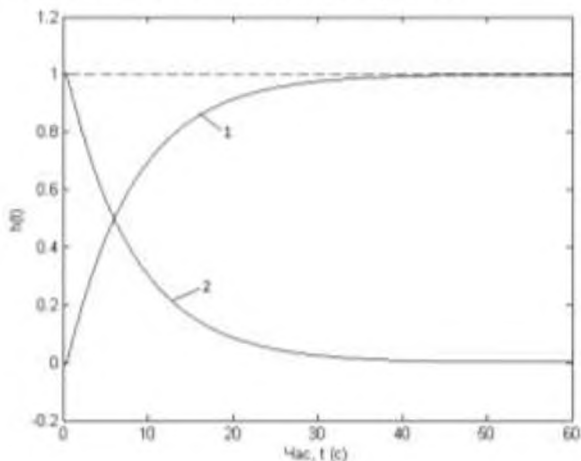
Частотні характеристики збурень перебувають нижче розрахованого критерію робастної якості (рис. 5). Замкнена система з  $\mu$ -регулятором подавляє збурення до допустимого рівня на всьому діапазоні частот (рис. 6).



1, 3 – робастна та номінальна якість;  
2 – частотні характеристики збурень

Рис. 5 – Якість системи з невизначеностями

Перехідні характеристики в системі з  $\mu$ -регулятором мають аперіодичний характер; тривалість регулювання становить близько 30 с (рис. 7).

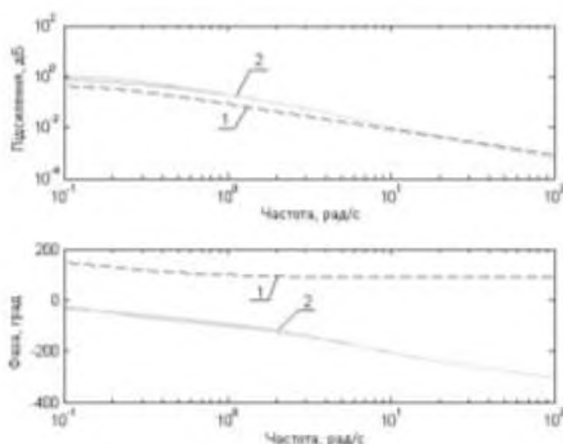


1 – канал «температура розчину на вході в ММ – перепад температур на виході з ММ»;  
2 – канал «зовнішнє збурення на виході з ММ – перепад температур на виході з ММ»

Рис. 7 – перехідні характеристики

[Текст] / Л. Р. Ладієва, Р. М. Дубік // Вісн. НТУУ «КПІ»; сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2 (8). – С. 128-133.

3. Ладієва, Л. Р. Математичне моделювання процесу контактної мембранної дистиляції [Текст] / Л. Р. Ладієва, Р. М. Дубік // Вісн. НТУУ «КПІ»; сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2 (6). – С. 119-122.
4. Дубік, Р. М. Математична модель розділення неоднорідних рідких систем [Текст] / Р. М. Дубік, Л. Р. Ладієва // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – № 1 (23). – С. 49-54.



1 – частотна характеристика виходу системи;  
2 – частотні характеристики збурень

Рис. 6 – Діаграми Боде замкненої системи з невизначеностями

#### Висновки

Розроблено систему керування процесом КМД із  $\mu$ -регулятором за умов параметричної невизначеності. Хоч одержано майже однакові властивості робастності систем,  $\mu$ -регулятор дає кращі перехідні характеристики, аніж  $H_\infty$  регулятор [2]. З огляду на це, для керування процесом залежно від висунутих вимог можна застосовувати обидва регулятора.

Керування процесом КМД ведуть за каналом «температура розчину на вході в ММ – перепад температур на виході з ММ».

#### Список використаної літератури

1. Дубік, Р. М. Моделювання контактної мембранної дистиляції за умов невизначеності [Текст] / Р. М. Дубік, Л. Р. Ладієва // Вісн. НТУУ «КПІ»; сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 1 (7). – С. 110-114.
2. Ладієва, Л. Р. Робастна система керування процесом контактної мембранної дистиляції

5. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления [Текст] / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Э. Сальгадо ; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2004. – 911 с.

*The solution to the problem optimal control of process contact membrane distillation under conditions of uncertainty, which is designed to isolate the toxic components of heterogeneous liquid system, is proposed. The control system with a suboptimal  $\mu$ -controller and an analysis the robustness of the closed-loop system is developed.*

**Keywords:** optimal control, suboptimal  $\mu$ -controller, contact membrane distillation.

Надійшла до редакції 22.03.2012

УДК 65.012.122

КВАСКО М. З., к.т.н., проф.; ЖУРАКОВСЬКИЙ Я. Ю., ст.викл.;  
ЧЕГРИНЕЦЬ К. І., магістрант; НОСОВ А. О., студент  
Національний технічний інститут України «Київський політехнічний інститут»

## РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДВОКОНТУРНОЇ ДИСКРЕТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПАРНОЮ УСТАНОВКОЮ

*Розроблено методику розрахунку програмуючої функції для реалізації дискретної системи керування випарюванням у протитечійній багатокорпусній випарній установці.*

**Ключові слова:** система керування випарюванням, протитечійна багатокорпусна випарна установка.

### Постановка проблеми

На основі аналізу процесу випарювання та схем його автоматизації зроблено висновок, що ефективною системою керування має бути не одно-, а двоконтурна з використанням прямого показника якості випарюваного продукту – його концентрації й непрямого – температурної депресії.

**Метою** статті є розрахунок програмуючої функції контурів температури й концентрації.

### Виклад основного матеріалу

Попередні дослідження свідчать, що перехідні процеси за каналом зміна подачі пари – зміна температури випарювання відбуваються на один-два порядки швидше, ніж за каналом зміна подачі пари – зміна концентрації випарюваного продукту.

Спроба керувати концентрацією, використовуючи лише температурний канал, спричинює значні помилки. Використання ж каналу концентрації є надто інерційним. Більш досконалою є двоконтурна система автоматизації (рис. 1).

У протитечійній багатокорпусній випарній установці (БВУ) на концентрацію й температуру розчину в основному впливають показники першого за ходом пари та останнього за ходом розчину корпусу. Розраховуючи систему керування концентрацією, будемо брати до уваги динамічні властивості першого за ходом пари корпусу, що легко визначити аналітично чи експериментально.

На відміну від аналогової, реалізація дискретної системи керування БВУ надасть можливість застосувати мікропроцесорну техніку, вирішивши питання статичної й динамічної точності.

Розглянемо два контури цифрової системи, що взаємодіють: внутрішній (температури) і зовнішній (концентрації) (рис. 2). Тут  $D_1(z)$ ,  $D_2(z)$  – регулятори температури й концентрації;  $W_{от}(p)$  і  $W_{ок}(p)$  – передатні функції об'єктів температури і концентрації;  $Y^\circ$  і  $X^\circ$  – завдання основному регулятору (концентрації) і регулятору температури;  $Y$ ,  $X$  – концентрація й температура; ЕНП<sub>1</sub>, ЕНП<sub>2</sub> – екстраполятори нульового порядку;  $\Delta Y = Y^\circ - Y$ ,  $\Delta X = X^\circ - X$  – відхилення заданих концентрації й температури від плинних значень;  $U$  – керівний вплив (зміна подачі пари);  $f_1$  і  $f_2$  – зовнішні збурення;  $T_1$  і  $T_2$  – періоди дискретизації системи за внутрішнім і зовнішнім контуром.

© Кваско М. З., Жураковський Я. Ю., Чегринець К. І., Носов А. О., 2012