

Керування процесом контактної мембранної дистиляції в умовах невизначеності

Р.М. Дубік¹, Л.Р. Ладієва¹

Abstract – Approach to solve the problem of optimal control of process contact membrane distillation under uncertainty, which is designed to remove toxic components from a heterogeneous liquid system. Considered Robust control system with H_∞ controller.

Keywords – Contact membrane distillations, Membrane module, H_∞ controller.

I. ВСТУП

Задачі отримання чистої і високоякісної води з вод різної солоності, очистка стічних вод, концентрування солей з промивних вод можуть вирішуватись за допомогою перспективного методу контактної мембранної дистиляції (КМД). Ефективність процесу значно зростає при оптимізації цього процесу. При оптимальному керуванні процесом основні проблеми пов'язані з невизначеностями, що виникають в процесі експлуатації мембранного модуля (ММ).

Дослідження процесу КМД показали, що невизначеність параметрів мембрани, таких як поруватість та ефективний радіус пор значно впливають на якість процесу. Впродовж часу експлуатації ММ, змінюється пропускна здатність мембрани, яка пов'язана з утворенням забруднень, що утворюється з боку розчину на мембрані. Як наслідок відбувається збільшення термічного опору, пошкодження селективного шару, зміною гідрофобно-гідрофільного балансу. Тому актуальним є отримання рішень, які були б ефективними в умовах невизначеності, так як можливість точної оцінки таких характеристик процесу обмежена.

Невизначеність параметрів суттєво впливає на теплопередачу в ММ, що відбувається шляхом конвекції, тому усереднений коефіцієнт теплопередачі, визначається за формулою

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \sum \Gamma_i} \quad (1)$$

де α_1, α_2 – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від розчину до мембрани і від мембрани до дистиляту $Bm/(m^2 \cdot K)$; δ_M, λ_M – товщина мембрани, m та її коефіцієнт теплопровідності $Bm/(m \cdot K)$; $\sum \Gamma_i$ – сумарний термічний опір забруднень $(m^2 \cdot K)/Bm$; δ_3, λ_3 – товщина шару забруднення, m та коефіцієнт теплопровідності $Bm/(m \cdot K)$.

II. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

Розроблена система керування перепадом температур розчину і дистиляту на виході ММ процесу КМД, математичні моделі якого розроблені [1, 2]. Система керування повинна протидіяти не тільки шумам вимірювання але й збуренням, що з'являються впродовж часу експлуатації мембрани. При цьому завдання лінійного керування вирішується при не повному вимірюванні вектора стану системи.

Рівняння стану процесу КМД записується в наступному вигляді

$$\frac{dX}{dt} = AX + B_2u + B_1V, \quad (2)$$

де $X = [\Theta_{PK} \ \Theta_{DK} \ b_{PK}]^T$ – вектор стану; $u = \Theta_{PH}$ – керування; $V = [v_{15} \ v_{16} \ v_{25} \ v_{26} \ v_{35} \ v_{38}]^T$ – вектор вхідних збурень; v_{ij} – збурюючі фактори; Θ_{PK}, Θ_{DK} – температура розчину і дистиляту на виході з ММ, K ; b_{PK} – кінцева концентрація солі, $кг/кг$; початкові умови: $X|_{t=0} = [\Theta_{PH} \ \Theta_{DH} \ b_{PH}]^T$; Θ_{PH}, Θ_{DH} – температура розчину і дистиляту на вході в ММ, K ; b_{PH} – початкова концентрація солі, $кг/кг$; матриці аналізу стану мають наступний вигляд

$$A = \begin{bmatrix} a_{15} & a_{16} & 0 \\ a_{25} & a_{26} & 0 \\ a_{35} & 0 & a_{38} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} p_{15} & p_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{25} & p_{26} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{35} & p_{38} \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} a_{13} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

де a_{ij} – коефіцієнти лінеаризованої моделі [2]; p_{ij} – параметри відносних збурень коефіцієнтів моделі.

Рівняння похибок, що спричинені невизначеностями

$$Z = C_1X + D_{11}V + D_{12}u. \quad (3)$$

Рівняння вимірювання виходу об'єкту має вигляд

$$y = C_2X + D_{21}V + D_{22}u + d + r, \quad (4)$$

де $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ – матриці прямих зв'язків (нульові); $d = d_{PK} - d_{DK}$ – шум вимірювання перепаду температур; d_{PK}, d_{DK} – шуми вимірювання температури розчину та дистиляту; r – задане значення перепаду температур розчину та дистиляту ($\Theta_{PK} - \Theta_{DK}$); матриці виходу

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», проспект Перемоги, 37, Київ, 56, УКРАЇНА, E-mail: lrynus@yahoo.com

$$C_1 = \begin{bmatrix} a_{15} & 0 & 0 \\ 0 & a_{16} & 0 \\ a_{25} & 0 & 0 \\ 0 & a_{26} & 0 \\ a_{35} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{38} \end{bmatrix}; C_2 = [1 \quad -1 \quad 0].$$

Тобто об'єкт складається з четвірки матриць

$$G = \begin{bmatrix} A & | & B_1 & B_2 \\ \hline -- & | & -- & -- \\ C_1 & | & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & | & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Систему (2) – (4) з урахуванням (5) представлено у вигляді верхнього дробово-лінійного перетворення F_U

$$y = F_U(G, \Delta)u, \quad (6)$$

де $\Delta = \text{diag}(\delta_{ij})$ – діагональна матриця невизначеностей; $-1 \leq \delta_{ij} \leq 1$ – параметри невизначеності.

Керуючий вплив обчислювався у вигляді

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

де $K(p)$ – матрична ланка зворотного зв'язку; p – змінна Лапласа.

Процедура синтезу H_∞ регулятора ґрунтується на послідовному розв'язанні двох рівнянь Ріккати для регулятора та спостерігача. Структурна схема системи керування процесом КМД представлена на рис. 1.

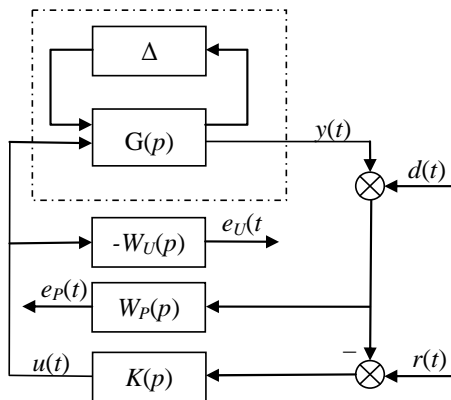


Рис. 1. Структурна схема системи керування процесом КМД
Для системи керування (рис. 1) з H_∞ регулятором висувалися наступні вимоги

$$\min_K \left\| \begin{bmatrix} W_P(p)S_O(p) \\ W_U(p)S_{UO}(p) \end{bmatrix} \right\|_\infty, \quad (8)$$

де $S_O(p) = (I + G(p)K(p))^{-1}$ – чутливість;

$S_{UO}(p) = K(p)(I + G(p)K(p))^{-1}$ – чутливість до керування;

$W_P(p), W_U(p)$ – вагові функції виходу системи та керування.

Математична форма вагових функцій обиралася безпосередньо за вимогами, що висувалися до характеристик системи у частотному та часовому просторі. Зокрема використано стандартний запис цих функцій

$$W(p) = \frac{p/M + \omega_{nn}}{p + A\omega_{nn}}, \quad (9)$$

де M – допустиме пікове значення функцій чутливості (8) на межі смуги частот ω_{nn} ; A – верхня межа мінімальної статичної похибки.

Система, що представлена на рис. 1 задовольняє виконанню умови робастної стійкості

$$\left\| \begin{bmatrix} W_P(p)S_O(p) \\ W_U(p)S_{UO}(p) \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (10)$$

Вихідні сигнали в системі, що представлена на рис. 1 обчислювалися у вигляді

$$\begin{bmatrix} e_P \\ e_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_P(p)S_O(p) \\ W_U(p)S_{UO}(p) \end{bmatrix} d, \quad (11)$$

де e_P, e_U – вихід замкненої системи та керування.

Отриманий регулятор забезпечує бажану якість перехідних процесів в системі з невизначеними параметрами в межах $k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$ та $\varepsilon_{\min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}$, де $k_{\min}, k_{\max}, \varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$ – граничні значення коефіцієнтів теплопередачі від розчину до дистилату та поруватості мембрани.

III. ВИСНОВОК

З проведених розрахунків видно, що H_∞ регулятор забезпечує бажану якість перехідних характеристик та задовольняє частотним характеристикам замкненої системи. H_∞ регулятор може застосовуватися для керування процесом КМД в умовах невизначеності.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- [1] Ладієва Л.Р. Математичне моделювання процесу контактної мембранної дистилації. / Л.Р. Ладієва, Р.М.Дубік // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження №2(6) – 2010 с. 119 – 122.
- [2] Дубік Р.М. Математична модель розділення неоднорідних рідких систем. / Р.М.Дубік, Л.Р. Ладієва // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. -2009. – №1(23). – с. 49 – 54.