

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ КОРОТКОЦИКЛОВОЇ АДСОРБЦІЇ

УДК 681.513

ОСАДЧІЙ Сергій Іванович

д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси: побудова моделей динаміки, синтез і аналіз якості оптимальних систем управління багатовимірними динамічними об'єктами в стохастичних умовах.

e-mail: srg2005@ukr.net

ЯКОРЕВА Марія Володимирівна

асистент кафедри програмного забезпечення Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси: контроль і управління складом газів і рідин в різних сферах виробництва.

e-mail: gvf-52@rambler.ru

ЗУБЕНКО Валентина Олександрівна

к.т.н., старший викладач Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси: побудова моделей динаміки, синтез і аналіз якості оптимальних систем управління багатовимірними динамічними об'єктами в стохастичних умовах.

e-mail: zub_valya@ukr.net

ВСТУП

Коротко циклова адсорбція (КЦА) – це один з найефективніших методів розділення газової суміші [1] на компоненти. Її ефективність визначається за наступним показником [2]

$$\mu_1 = \frac{W_{\min}}{W_{\text{cpr}}^{\text{in}}}, \quad (1)$$

де W_{\min} – мінімальна термодинамічна робота, необхідна для розділення газової суміші; $W_{\text{cpr}}^{\text{in}}$ – повна термодинамічна робота. Мінімальна термодинамічна робота визначається складом суміші, її температурою та потоком на вході колони КЦА. Повна робота визначається конструкцією колони, типом сорбенту, способом керування та інтенсивністю витрачання готового продукту [3]. В умовах конкретного виробництва та фіксованих поставщиків суміші вплинути на мінімальну термодинамічну роботу складно. Повна термодинамічна робота при заданих конструкції установки КЦА, типу

сорбенту та конструкції ресивера залежить від якості системи керування.

Найвищої якості керування, як видно з монографії [4], можна досягти лише в оптимальних системах автоматичного керування. Синтез таких систем [5] повинен відбуватися відповідним чином на базі моделей динаміки об'єкта керування, пристроїв вимірювання, виконавчих елементів, збурень та завад, які відповідають реальним умовам проходження процесу КЦА.

Найбільшого поширення в сучасних умовах отримав аналітичний метод складання моделі динаміки процесу адсорбції у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних з подальшою їх лінеаризацією [1, 3]. Як правило, при такому підході динаміка вимірювальних пристроїв та виконавчих елементів вважається безінерційною, а завади вимірювання та збурення відносяться до випадкових процесів типу «білий шум». Прийняття зазначених припущень має наслідком зниження значення показника ефектив-

ності (1). В той же час, в умовах виробництва існує можливість спостереження та реєстрації цілого ряду фізичних величин, які характеризують зміну сигналів на входах та виходах процесу КЦА як об'єкта керування. Використання зазначених сигналів для ідентифікації моделі динаміки такого об'єкта керування дозволить підвищити адекватність останньої та, як наслідок, призведе до поліпшення законів керування ним.

Мета цієї статті полягає у визначенні лінеаризованих моделей динаміки процесу КЦА газоподібних домішок харчового водню та збурень які його супроводжують в усталеному режимі за експериментальними даними.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вивчення конструкції та роботи устаткування для очищення технічного водню методом КЦА [6] дозволило за аналогією з монографією [3] представити процес адсорбції окису та діоксиду вуглецю із суміші з воднем у вигляді об'єкта керування, структура якого (рис. 1) має декілька входів та виходів. Входи можна поділити на три групи: сигналу керування (період циклу адсорбції t_{ads}), контрольованого збурення (зміна тиску у ресивері P_p) та неконтрольованого збурення (вектор ψ)

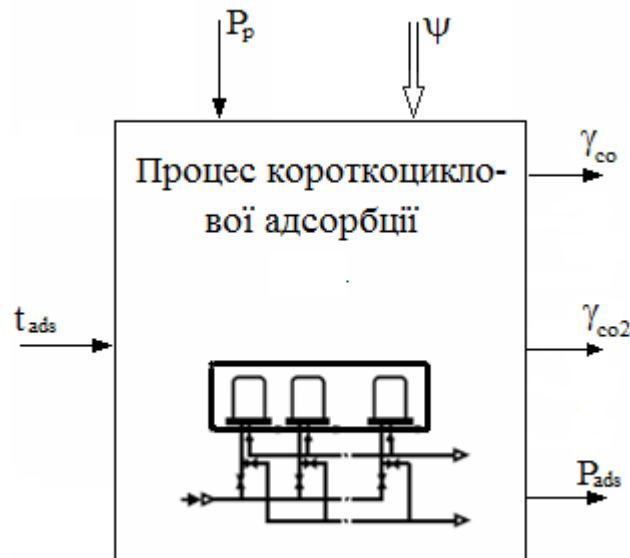


Рисунок 1 – Структура процесу КЦА як об'єкту керування

$$\psi = \begin{bmatrix} P_k \\ P_s \\ T \\ x_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де P_k – тиск на виході компресору; P_s – тиск суміші, що скидається у повітря; T – температура суміші; x_0 – склад одного молю суміші, яка очищується.

Виходи процесу КЦА включають регульовані величини: концентрацію окису вуглецю γ_{co} , концентрацію діоксиду вуглецю γ_{co2} , зміну тиску в адсорберах P_{ads} . В загальному випадку зв'язок між визначеними входами та виходами є нелінійним.

Якщо розглядати усталений процес адсорбції та прийняти припущення про можливість лише невеликих відхилень вимірювальних величин від номінального значення, то структура з рис. 1 може бути представлена як показано на рис. 2. Структурна схема на рис. 2 складається з шести передавальних функцій, позначених, W_t^{co} , W_t^{co2} , W_p^{co} , W_p^{co2} , W_ψ^{co} , W_ψ^{co2} . Зазначені функції характеризують взаємозв'язки між входами та виходами процесу КЦА: функція W_t^{co} визначає вплив часу t_{ads} на зміну концентрації γ_{co} ; функція W_t^{co2} – вплив t_{ads} на зміну концентрації γ_{co2} ; W_p^{co} характеризує вплив зміни тиску у ресивері P_p на зміну концентрації γ_{co} ; W_p^{co2} – вплив зміни тиску у ресивері P_p на зміну концентрації γ_{co2} ; функція W_ψ^{co} визначає вплив неконтрольованого збурення ψ на

зміну концентрації γ_{CO_2} ; функція $W_\psi^{CO_2} - \psi$ на зміну концентрації γ_{CO_2} . В такому разі, задача ідентифікації динаміки процесу КЦА полягає у тому, щоб за отриманими в усталеному режимі записами зміни сигналів $t_{ads}, P_p, \gamma_{CO_2}$ та γ_{CO_2} знайти передавальні функції $W_t^{CO_2}, W_t^{CO}, W_p^{CO}, W_p^{CO_2}, W_\psi^{CO}, W_\psi^{CO_2}$.

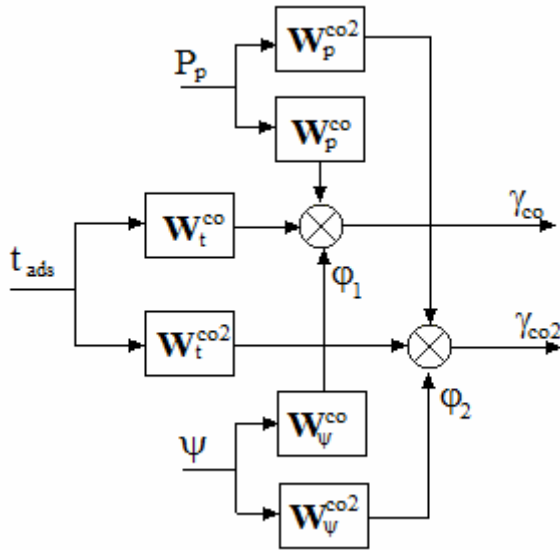


Рисунок 2– Структурна схема процесу КЦА в усталеному режимі адсорбції

АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Аналіз літературних джерел [1-3], записів реалізацій сигналів $t_{ads}, P_p, \gamma_{CO_2}, \gamma_{CO_2}$ (рис.3) та їх кореляційних і взає-

мних кореляційних функцій (рис. 4) дозволяє припустити, що сигнали $t_{ads}, P_p, \gamma_{CO_2}, \psi$ є стаціонарними взаємозв'язаними випадковими процесами [7], а також, що контрольоване збурення P_p не впливає на компоненти вектору неконтрольованих збурень ψ , оскільки мають різні джерела походження. Отже, для розв'язку поставленої задачі доцільно скористатися одним з методів структурної ідентифікації [5, 6].

Застосування зазначеного методу вимагає поєднати сигнали та передавальні функції, представлені на рис. 2, у вектори сигналів керування u

$$u = \begin{bmatrix} t_{ads} \\ P_p \end{bmatrix}; \tag{3}$$

вихідних сигналів x

$$x = \begin{bmatrix} \gamma_{CO} \\ \gamma_{CO_2} \end{bmatrix}; \tag{4}$$

неконтрольованих збурень на виході об'єкта керування φ

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}; \tag{5}$$

та у матрицю передавальних функцій W_1

$$W_1 = \begin{bmatrix} W_t^{CO} & W_p^{CO} \\ W_t^{CO_2} & W_p^{CO_2} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

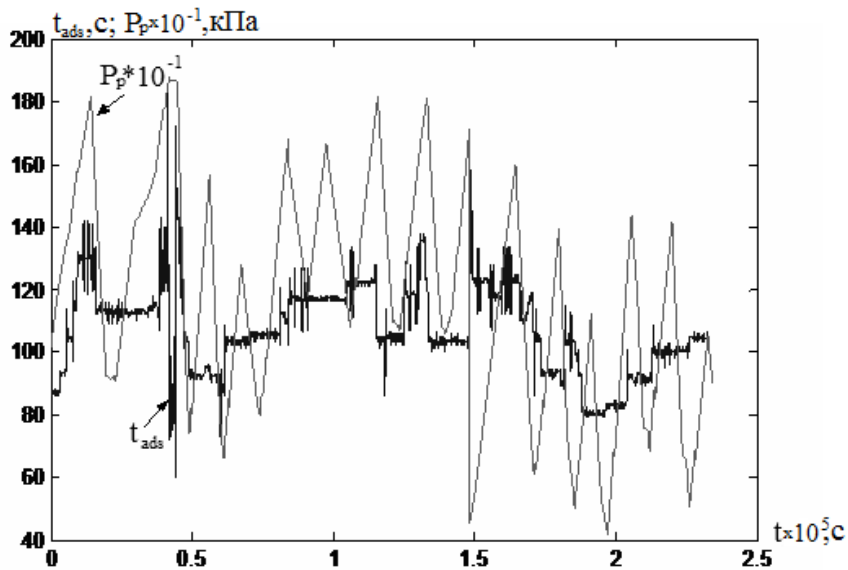


Рисунок 3 – Приклади записів реалізацій сигналів процесу КЦА

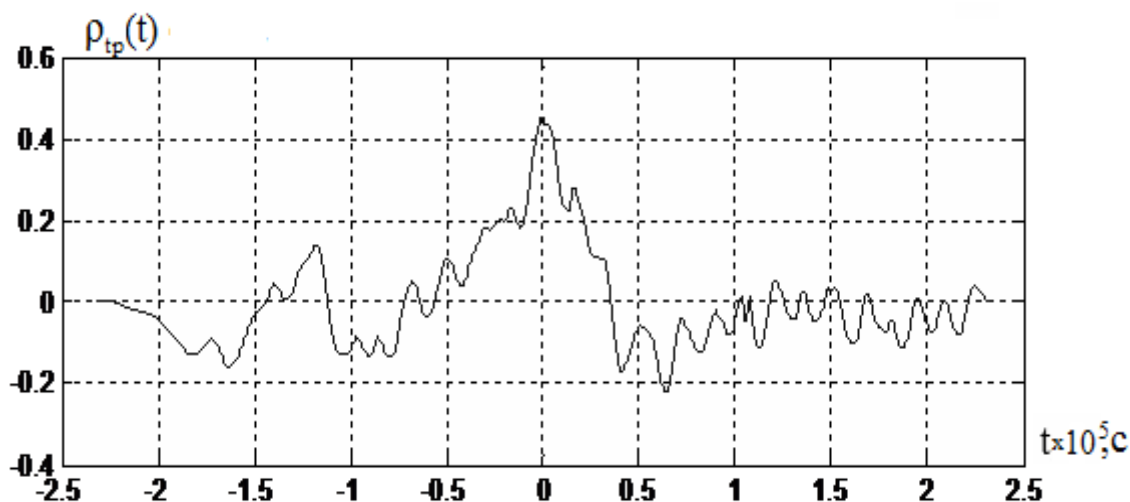


Рисунок 4 – Приклад нормованої взаємної кореляційної функції між t_{ads} та P_p

Якщо вектор неконтрольованих збурень φ представити як сигнал на виході багатовимірного формуючого фільтру з передавальною функцією W_2 , то можна записати, що

$$\varphi = W_2 \delta, \quad (7)$$

де δ – 2 вимірний центрований стаціонарний випадковий процес типу «білий шум».

У відповідності з методом ідентифікації, викладеним у монографії [6], матриці передавальних функцій W_1 та W_2 є елементами блочної матриці рядка W

$$W = [W_1 \quad W_2]. \quad (8)$$

Враховуючи позначення (3)-(7) та положення методу [6], ідентифікація цієї матриці здійснюється у результаті виконання наступних дій:

- знайти дробово-раціональні спектральні та взаємні спектральні щільності коливань сигналів t_{ads} , P_p , γ_{co} , γ_{co2} , а саме S_{tt} , S_{pp} , $S_{\gamma\gamma}$, $S_{\gamma2\gamma2}$, S_{tp} , S_{pt} , $S_{t\gamma}$, $S_{\gamma t}$, $S_{t\gamma2}$, $S_{\gamma2t}$, $S_{p\gamma}$, $S_{\gamma p}$, $S_{p\gamma2}$, $S_{\gamma2p}$, $S_{\gamma\gamma2}$, $S_{\gamma2\gamma}$;

- на основі теореми Вінера-Хінчина у векторній формі [8] та знайдених спектральних і взаємних спектральних щільностей скласти транспоновані матриці S_{uu}' , S_{xx}' та S_{ux}'

$$S_{uu}' = \begin{bmatrix} S_{tt} & S_{pt} \\ S_{tp} & S_{pp} \end{bmatrix}, S_{xx}' = \begin{bmatrix} S_{\gamma\gamma} & S_{\gamma2\gamma} \\ S_{\gamma\gamma2} & S_{\gamma2\gamma2} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$S_{ux}' = \begin{bmatrix} S_{t\gamma} & S_{p\gamma} \\ S_{t\gamma2} & S_{p\gamma2} \end{bmatrix};$$

- знайти матрицю взаємних спектральних щільностей $S_{\Delta x}$ як стійкий результат факторизації [8] суми матриць

$$S_{x\Delta} S_{x\Delta} = S_{xx} - S_{ux} S_{uu}^{-1} S_{ux}; \quad (10)$$

- скласти транспоновані матриці спектральних щільностей S_{yx}' та S_{yy}' з урахуванням результатів (9) та (10)

$$S_{yx}' = \begin{bmatrix} S_{ux}' & S_{\Delta x}' \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$S_{yy}' = \begin{bmatrix} S_{uu}' & 0 \\ 0 & E_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де індекс * – позначає ермітове спряження матриць, E_2 – одинична матриця розміру 2×2 ;

- скласти вагову матрицю R з критерію точності ідентифікації J

$$J = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left[(S_{xx}' - S_{yx}' W_* - W S_{xy}' + W S_{yy}' W_*) R \right] ds; \quad (13)$$

- факторизувати вагову матрицю R та транспоновану матрицю спектральних щільностей S_{yy}' в результаті чого знайти матриці R_0 , D

$$R_0 R_0 = R, \quad D D_* = S_{yy}'; \quad (14)$$

- здійснити сепарацію [8] наступного добутку дробово-раціональних матриць

$$K = K_0 + K_+ + K_- = R_0 S_{yx}' D_*^{-1}; \quad (15)$$

- знайти блочну матрицю W

$$W = [W_1 \quad W_2] = R_0^{-1} (K_0 + K_+) D^{-1}. \quad (16)$$

РЕЗУЛЬТАТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЦА

У відповідності з алгоритмом, представленим вище, в результаті статистичної обробки записів зміни технологічних параметрів отримані оцінки спектральних та взаємних спектральних щільностей S_{tt} , S_{pp} , S_{yy} , S_{y2y2} , S_{tp} ,

S_{pt} , S_{ty} , S_{yt} , S_{ty2} , S_{y2tr} , S_{py} , S_{yp} , S_{py2} , S_{y2pr} , S_{yy2} , S_{y2yr} , приклади яких представлені на рис. 5. Апроксимація отриманих оцінок на класі дробово-раціональних функцій комплексного аргументу $s=j\omega$ дозволила визначити усі елементи матриць спектральних та взаємних спектральних щільностей (9), наприклад

$$S_{tt} = \frac{0.01|s + 2 \cdot 10^{-5}|^2}{|s^2 + 1.08 \cdot 10^{-4}s + 3.6 \cdot 10^{-9}|^2}, S_{pp} = \frac{2.5|s^2 + 4.8 \cdot 10^{-4}s + 9 \cdot 10^{-8}|^2}{|(s + 5 \cdot 10^{-5})(s^2 + 1.2 \cdot 10^{-4}s + 1.6 \cdot 10^{-7})|^2} \quad (17)$$

$$S_{pt} = \frac{0.08(s + 10^{-4})(s + 5 \cdot 10^{-5})(s + 7.5 \cdot 10^{-4})}{(-s + 5 \cdot 10^{-4})(s^2 + 1.08 \cdot 10^{-4}s + 3.6 \cdot 10^{-9})(s^2 - 1.2 \cdot 10^{-4}s + 1.6 \cdot 10^{-7})} \quad (18)$$

Якість апроксимації ілюструють графіки, представлені на рис. 5.

Підстановка отриманих таким чином значень матриць S_{xx} , S_{uu} та S_{ux} до виразу (10) дозволила визначити, що

$$S_{x\Delta}S_{x\Delta} = \frac{1}{|(s + 4 \cdot 10^{-5})(s + 0.03)|^2} \left[\frac{8.5 \cdot 10^{-3}|s^2 + 0.025s + 6.25 \cdot 10^{-4}|^2}{|s^2 + 0.06s + 3.6 \cdot 10^{-3}|^2} \cdot \frac{7.81 \cdot 10^{-4}(-s + 0.004)(-s + 0.02)(-s + 0.07)(-s + 0.06)}{(-s + 0.09)(s^2 + 0.06s + 0.0036)} \right]$$

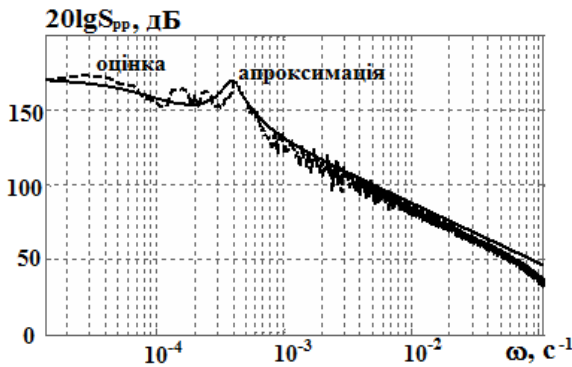


Рисунок 5 – Спектральна щільність зміни тиску у ресивері S_{pp}

ний фактор $S_{x\Delta}$, необхідний для формування матриці (11):

$$S_{x\Delta} = \frac{1}{(s + 4 \cdot 10^{-5})(s + 0.03)} \left[\frac{0.092(s^2 + 0.013s + 6.1 \cdot 10^{-4})}{\frac{s^2 + 0.06s + 0.0036}{1.89 \cdot 10^{-3}(-s + 6.5 \cdot 10^{-3})}} \cdot \frac{8.47 \cdot 10^{-3}(s + 0.079)(s + 0.0043)}{\frac{s + 0.09}{0.0347(s + 0.08)(s + 0.0029)}} \right] \quad (20)$$

Оскільки вихідні сигнали процесу КЦА мають однакову фізичну природу, то вагову матрицю R доцільно прийняти одиничною, тому і результат її факторизації R_0 також є одиничною матрицею розміру 2×2 .

Отримані таким чином результати дозволили скласти необхідні для ідентифікації матриці (11) та (12), здійснити факторизації передбачені виразом (14), сепарацію добутку (15) та розрахунок блочної матриці (16) і визначити матрицю передавальних функцій процесу КЦА W_1 від зміни періоду циклу адсорбції t_{ads} та зміни тиску у ресивері P до зміни концентрації оксиду вуглецю γ_{co} та зміни концентрації діоксиду вуглецю γ_{co2}

$$\left[\frac{7.81 \cdot 10^{-4}(s + 0.004)(s + 0.02)(s + 0.07)(s + 0.06)}{(s + 0.09)(s^2 - 0.06s + 0.0036)} \cdot \frac{1.3 \cdot 10^{-3}(s + 0.003)(s + 0.08)^2}{|(s + 0.09)|^2} \right] \quad (19)$$

Факторизація матриці (19) праворуч методом Алієва-Ларіна [9] забезпечила можливість записати наступ-

$$W_1 = \begin{bmatrix} W_t^{co} & W_p^{co} \\ W_t^{co2} & W_p^{co2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2.33(s + 3 \cdot 10^{-4})(s + 0.005)}{(s + 4 \cdot 10^{-5})(s + 0.03)} & \frac{0.57(s - 3 \cdot 10^{-4})(s - 0.005)}{(s + 4 \cdot 10^{-5})(s + 0.03)} \\ \frac{0.11(s + 5 \cdot 10^{-4})(s + 0.001)}{(s + 4 \cdot 10^{-5})(s + 0.03)} & \frac{0.0064(s + 5 \cdot 10^{-4})(s + 0.001)}{(s + 4 \cdot 10^{-5})(s + 0.03)} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

а також матрицю передавальних функцій W_2 яка характеризує вплив неконтрольованих збурень ψ (рис. 2) на зміни сигналів на виході процесу КЦА

$$W_2 = S'_{x\Delta}. \quad (22)$$

Таким чином, поставлена задача ідентифікації розв'язана. Отримані передавальні функції (21) та (22) разом із спектральними щільностями (17), (18) дозволяють визначити ступінь впливу сигналу керування t_{ads} , контрольованого P_p та неконтрольованого ψ збурень на концентрації окису вуглецю та діоксиду вуглецю у харчовому водні. Для характеристики впливу за аналогією з роботою [6] розраховані дисперсії зміни γ_{co} та γ_{co2} , які викликані змінами вектору сигналів керування u та вектору неконтрольованих збурень (табл. 1).

Таблиця 1 –

Дисперсії зміни концентрації окису та діоксиду вуглецю у водні

Джерело впливу	Дисперсія γ_{co}	Дисперсія γ_{co2}
Вектор u	1.6×10^4	0.54
Вектор ψ	2.24×10^4	0.9
Обидва входи	2.99×10^4	1.15

ВИСНОВКИ

Отримання лінеаризованої моделі КЦА окису та діоксиду вуглецю із суміші газів при виробництві харчового водню за експериментальними даними вимагає розділення сигналів, що впливають на хід адсорбції на дві групи: контрольованих та неконтрольованих впливів.

Поширення дії частотного методу структурної ідентифікації при неповних вимірах на випадок знаходження матриць передавальних функцій КЦА дозволило визначити лінеаризовану модель такого процесу на класі дробово-раціональних передавальних функцій (21) та (22). Аналіз частотних характеристик зазначеної моделі дозволяє стверджувати, що процес КЦА наближається до багатовимірного режекторного фільтру, на виході якого діють стаціонарні випадкові збурення з обмеженою смугою частот.

Зміна сигналів керування здійснює май же однаковий зі зміною неконтрольованих збурень вплив на концентрацію домішок у харчовому водні на виході колони. Отже, для розв'язання задачі мінімізації вмісту домішок у харчовому водні доцільна побудова оптимальної системи стабілізації з корекцією за збуренням.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Keltsev N.V. Osnovy adsorbcionnoj tehniki /N.V. Keltsev. – M.: Himija, 1984. – 592 s.
2. Khefets L.I. Elementi teorii processov adsorbcionnogo pezdelenia gazovih smesey /L.I. Khefets, V.L. Zelenko, U.V. Pavlov //Izbrannie glavi khimicheskoy tehnljgii – M.: MGU, 2004. – 68 s.
3. Matveikin V.G. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie processom korotkociklovoi beznagrevnoj adsorbicii /V.G. Matveikin, V.A. Pogodin, S.B. Putin, S.L. Skvortsov. – M.: Mashinostroenie-1, 2007. – 140 s.
4. Pheldbaum A.A. Osnovi teorii optimalnih avtomaticheskikh system /A.A. Pheldbaum – M.: Fizmatgiz, 1963. – 552 s.
5. Blokhin L.N. Technology of Structural Identification and Subsequent Synthesis of Optimal Stabilization Systems for Unstable Dynamic Objects /L.N. Blokhin, S.I. Osadchij, Yu.N. Bezkorovainyi //Journal of Automation and Information Sciences. – 2007. – Vol.39. – N.11. – 2007. – p.57-66.
6. Azarskov V.N. Metodologija konstruirovaniya optimalnih system stochasticheskoy stabilizacii /V.N. Azarskov, L.N. Blokhin, L.S. Zhiteckij. – K.: NAU, 2006. – 437 s.
7. Teorija sluchajnih processov i jeje ingenernie prilogenija /E.S. Ventsel, L.A. Ovcharov. – M.: Visshaja shkhola, 2000. – 383 s.
8. Statisticheskaja dinamika system upravlenija: pidruchnik /L.N. Blokhin, M.U. Burichenko, N.V. Bilack ets. – K.: NAU, 2014. – 300 s.
9. Larin V.B. Obobchennoe uravnenie Ljapunova i factorizacia matrichnih polinomov /V.B. Larin //Avtomatica. – 1992. – №6. – S.3-8.

Рецензент: *д.т.н., проф. Марасанов В.В., Херсонський національний технічний університет.*