

ISSN 0321-0499



ВІСНИК

№ 741
2012

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**АВТОМАТИКА,
ВИМІРЮВАННЯ
ТА КЕРУВАННЯ**



LITTERIS • ET • ARTIBVS

УДК 681.516.52:664.123.4

Н.М. Луцька, Н.А. Засць
Національний університет харчових технологій

СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОЛОННОЮ ДИФУЗІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

© Луцька Н.М., 2012

Розглянуто теплообмінну частину колонної дифузійної установки цукрового виробництва, математична модель якої має 10 координат стану та 4 управління. Синтезований модальний багатовимірний регулятор за координатами стану та за допомогою теорії ймовірності досліджено вплив параметричної невизначеності об'єкта на якість та стійкість перехідних процесів.

Ключові слова: колонна дифузійна установка, модальний регулятор, робастна стійкість, невизначеність, температура.

We consider the heat exchange portion diffusion column settings sugar production, a mathematical model which has 10 coordinates state and 4 controls. Synthesized multi-modal regulator of the coordinates and using probability theory the influence of parametric uncertainty of the object on the quality and stability of transients.

Key words: columnar diffusion plant, modal control, robust stability, uncertainty, temperature.

Вступ

Процес дифузії в цукровому виробництві є одним з найважливіших технологічних процесів, в результаті якого відбуваються якісні зміни вихідної сировини з деякими втратами цукру у відходах,

що спричиняють значні збитки. В зв'язку з цим питання інтенсифікації цього процесу викликає великий практичний та науковий інтерес. Вирішення цього питання потребує якісної та кількісної оцінки впливу технологічних факторів на нього. Більшість вітчизняних цукрових виробництв оснащено колонними дифузійними установками (КДУ), що складаються з двох окремих апаратів – ошпарювача та колонний дифузійний апарат.

КДУ цукрового заводу є нестационарним технологічним агрегатом, що характеризується невизначеністю параметрів, тому застосування традиційних одноконтурних систем регулювання її роботи не дає бажаного ефекту. В зв'язку з тим, що дифузійна установка є багатозв'язним об'єктом, що працює в умовах невизначеності, недостатня точність підтримання технологічного режиму приводить до збільшення витрати енергоносіїв та втрат цукру в жомі. В процесі функціонування колонної дифузійної установки її параметри змінюються в досить широкому діапазоні, що суттєво впливає на зміну сталих часу та коефіцієнтів передачі об'єкта, тому можливі випадки, коли система втратить стійкість. У разі втрати стійкості системи різко підвищується температура сокостружкової суміші, що призводить до розварювання стружки та припинення фізико-хімічного процесу дифузії. Як правило, на підприємствах підтримують заданий температурний режим локальними регуляторами типу П та ПІ, але за рахунок зв'язності температур в різних зонах регулювання кожної з них окремо призводить до відхилень інших та затягування перехідних процесів. Збільшення часу перехідних процесів також веде до відхилення температур від регламенту та втрати цукру.

Останнім часом з'явилося багато публікацій стосовно робастної стійкості об'єктів керування як в суто теоретичному плані, так і щодо практичних застосувань [1]. В класичній теорії керування є один підхід, а саме синтез модальних регуляторів, який розв'язує сумісну задачу. Під час синтезу модального регулятора наперед задаються бажані корені характеристичного полінома системи, причому обґрунтовуються ці значення необхідною якістю перехідних процесів у системі та наявністю невизначеностей, що не описуються. Перевірка робастної стійкості проводиться для системи, що задана класом невизначеності, що доволі чітко описується математично.

Метою роботи є створення ефективної системи керування теплообмінною частиною КДУ, що функціонує в умовах невизначеності, на основі модальної та робастної теорій керування. Тобто необхідно синтезувати багатовимірний регулятор, що мінімізує час перехідних процесів, система керування з яким у разі зміни параметрів об'єкта не втрачає стійкості.

Математичний опис об'єкта. Вимоги до системи керування

Для створення системи керування технологічним об'єктом (КДА) необхідно вибрати математичну модель об'єкта, корені характеристичного полінома системи, синтезувати регулятор та перевірити якість системи, описати невизначеності в об'єкті, визначити запас стійкості системи, а за необхідності скоригувати задані корені.

Математична модель теплообмінної частини дифузійного відділення задана у вигляді [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) + Bu(t); \\ y &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де $x = [\Delta\theta_{n1}, \Delta\theta_{n2}, \Delta\theta_{n3}, \Delta\theta_{c1}, \Delta\theta_{c2}, \Delta\theta_{c3}, \Delta\theta_{ош}, \Delta\theta_{к1}, \Delta\theta_{к2}, \Delta\theta_{к3}]^T$ – вектор координат стану, що складається відповідно з температури пари, що надходить в підігрівники, температур соку та барометричної води після підігрівників, температури сокостружкової суміші на виході з ошпарювача та температур сокостружкової суміші в трьох зонах колонного апарата; $u = [\Delta G_{n1}, \Delta G_{n2}, \Delta G_{n3}, \Delta G]^T$ – вектор керування, що складається відповідно з витрат пари, що надходять у три підігрівники соку, та витрати сокостружки, що надходить у середину ошпарювача; y – вектор вимірювань, що складається з 7, 8, 9, 10-ї координат стану x за незмінних параметрів роботи об'єкта $A=A_0, B=B_0$, де:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \begin{bmatrix} -16250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -16250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -19500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0167 & 0 & 0 & -3.3670 & 0 & 0 & 0.0364 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0167 & 0 & 0 & -2.8058 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0155 & 0 & 0 & -1.6056 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0652 & 0.1961 & 0 & -0.2618 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0341 & -0.0750 & 0.0400 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0319 & -0.0696 & 0.0375 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0364 & 0 & 0 & 0.0300 & -0.0669 \end{bmatrix}, \\
 B_0 &= \begin{bmatrix} 14167 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 30000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.6504 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1539 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Власні значення матриці номінального об'єкта A_0 цілі та набувають таких значень:

$$\lambda_0 = [-0.120 \quad -0.021 \quad -0.071 \quad -3.368 \quad -0.261 \quad -16.250 \quad -2.806 \quad -16.250 \quad -1.606 \quad -19.500]^T, \quad (3)$$

тобто об'єкт має самовирівнювання, але запас стійкості занадто малий -0.021 . І навіть більше, цей об'єкт є надстійким.

Аналіз впливу режимних параметрів дифузійної установки на вміст цукру в жомі, якість та кількість одержуваного дифузійного соку і багато інших показників показав [3], що процес вилучення цукру зі стружки поліпшується зі збільшенням відкачування і тривалості висолоджування, підвищенням температури та збільшенням довжини стружки. Очевидно, що для стабілізації цих параметрів потрібно підтримувати температурний режим роботи установки відповідно до оптимального технологічного режиму в змінюваних умовах. Отже, розроблена ефективна система керування теплообмінною частиною КДУ повинна забезпечувати підтримання температури сокостружкової суміші на виході з ошпарювача та температур у трьох зонах колонного дифузійного апарата відповідно до вибраного режиму роботи в умовах невизначеності. Зазначимо, що на практиці в КДУ температури в зонах апарата та температура сокостружкової суміші на виході з ошпарювача регулюються непрямым методом, тому існує час запізнення між зміною витрати пари на підігрівниках і зміною температур по зонах КДУ, причому ці технологічні змінні зв'язані між собою. Як видно з матриці C , лише названі чотири температури є вимірними, а регулятор будується у формі зворотного зв'язку за станами системи, тому в системі керування також необхідно застосувати спостерігач.

Щоб мінімізувати перехідні процеси в замкненій системі відносно збурення та зміни завдання відповідно до технологічного регламенту, найкращим є біноміальний розподіл коренів [4], тобто $(s + \omega_0)^n$, де ω_0 – швидкодія системи, що співвідноситься з часом перехідного процесу за формулою $T_{\text{пл}} \cong 3/\omega_0$. Якщо час перехідного процесу $T_{\text{пл}}=1$ хв, то швидкодія $\omega_0=0.05$ с. Але деякі власні значення матриці об'єкта менші за $-\omega_0$, тому, задаючи необхідні корені замкненої системи, змінюємо лише другий корінь.

Невизначеності в об'єкті

КДУ функціонує в невизначених умовах. Невизначеність роботи КДУ викликана змінними коефіцієнтами тепло- та масообмінних процесів та великою кількістю некерованих параметрів.

Вміст цукру в жомі, якість та кількість одержуваного дифузійного соку і багато інших показників залежать від таких режимних параметрів дифузійної установки: еквівалентної товщини бурякової стружки, коефіцієнта дифузії цукру в буряковій тканині, коефіцієнта нерівномірності роботи дифузійної установки, місяця виробничого сезону, цукристості стружки, питомого навантаження стружкою колонного апарата, доброякісності дифузійного соку, витрати дифузійного соку на виробництво, витрати стружки, температури потоків вхідної стружки, вихідного соку, пари та сокостружки.

Вищеперераховані змінні, своєю чергою, розділяються на керуючі (які змінює оператор або система автоматизації) та некеровані (які набувають випадкових значень). Керуючими параметрами є: еквівалентна товщина бурякової стружки, питоме навантаження стружкою колонного апарата, витрати соку та стружки, а також температури потоків, інші параметри – некеровані, що створює проблему при управлінні процесом дифузії. Також на об'єкт діють збурення, величина та характер яких залежать від специфіки процесу, режиму роботи теплових споживачів та конструктивних характеристик апаратури.

Невизначеність виявляється під час складання математичної моделі КДУ та введення спрощувальних припущень. Зокрема, для математичної моделі (1) прийнято такі припущення: об'єкт взято із зосередженими параметрами; дифузійний апарат має ідеальну теплову ізоляцію, тобто нехтують втратами в навколишнє середовище; приймають в одній ємкості постійними питомі теплоємності дифузійного соку та стружки, коефіцієнт теплопередачі та густина сокостружкової суміші; теплову ємність конструкції дифузійного апарата не враховують. Але числові значення сталих часу та коефіцієнтів передачі об'єкта в математичній моделі розраховують залежно від значень питомої теплоємності дифузійного соку та стружки, коефіцієнта теплопередачі та густини сокостружкової суміші, що в процесі роботи об'єкта змінюються від 1,1 до 3 разів, тому математична модель не завжди є адекватною об'єкту. Все це підтверджує доцільність застосування робастних систем для управління процесом дифузії.

Враховуючи назване, матриці об'єкта (1) з невизначеностями переписуються у формі інтервальної матричної сім'ї:

$$A = A_0 + \Delta^A, \quad |\Delta_{ij}^A| \leq \gamma m_{ij}^A, \quad i, j = 1, \dots, 10; \quad (4)$$

$$B = B_0 + \Delta^B, \quad |\Delta_{ij}^B| \leq \gamma m_{ij}^B, \quad i = 1, \dots, 10, \quad j = 1, \dots, 4, \quad (5)$$

де $\Delta_{ij}^A, \Delta_{ij}^B$ – елементи матриць Δ^A, Δ^B відповідно; $\gamma > 0$ – розмах невизначеності; $m_{ij}^A \geq 0, m_{ij}^B \geq 0$ – масштаби зміни елементів матриці A та B відповідно.

Якщо взяти $m_{ij}^A = a_{ij}^0 / 100, m_{ij}^B = b_{ij}^0 / 100$, де a_{ij}^0, b_{ij}^0 – елементи матриць A_0, B_0 відповідно, то розмах невизначеності γ вказуватиме на максимальний відсоток зміни матриць A_0 та B_0 від номінального.

Синтез модального регулятора та робастна стійкість системи

Згідно з алгоритмом модального синтезу для багатовимірних систем [5] регулятор отримується у формі зворотного зв'язку за станом системи:

$$u = Kx, \quad (6)$$

де K – матричний коефіцієнт підсилення регулятора:

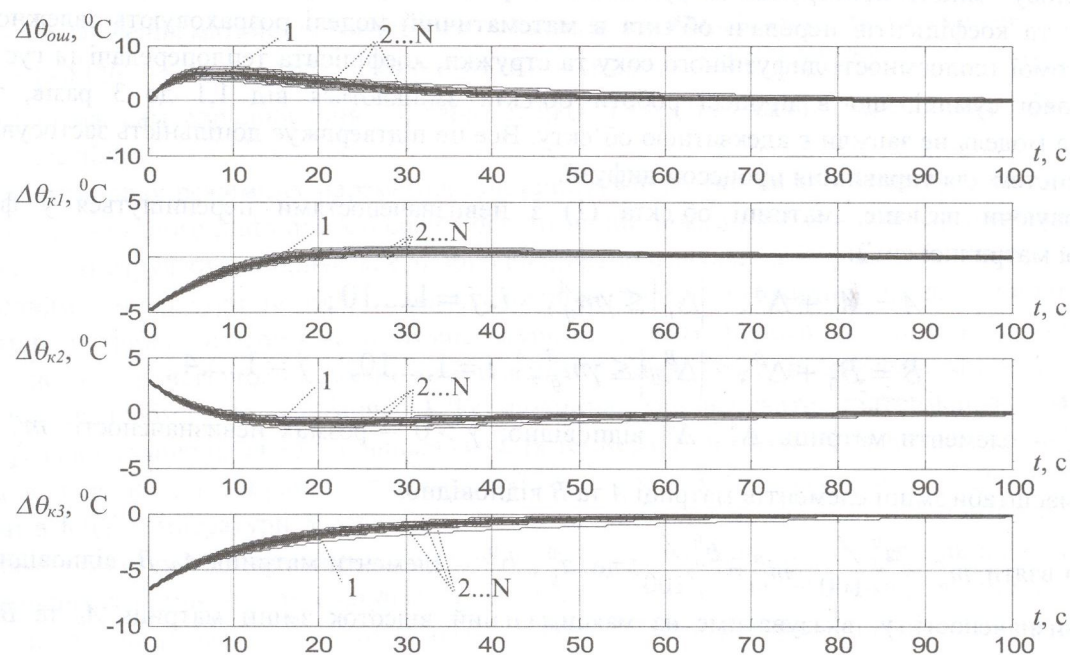
$$K = \begin{bmatrix} -5.4 \cdot 10^4 & 1.0 \cdot 10^4 & 4.3 \cdot 10^4 & 5.1 \cdot 10^5 & 1.2 \cdot 10^9 & 2.0 \cdot 10^6 & -9.5 \cdot 10^7 & 1.57 \cdot 10^5 & 1.8 \cdot 10^5 & 1.0 \cdot 10^5 \\ 9.5 \cdot 10^5 & 1.9 \cdot 10^4 & -9.2 \cdot 10^5 & -4.1 \cdot 10^5 & 7.0 \cdot 10^7 & -1.3 \cdot 10^7 & 1.6 \cdot 10^6 & 5.8 \cdot 10^6 & 1.2 \cdot 10^5 & 1.1 \cdot 10^5 \\ 2.0 \cdot 10^4 & -4.6 \cdot 10^5 & -2.7 \cdot 10^4 & -1.7 \cdot 10^5 & 4.9 \cdot 10^7 & 1.7 \cdot 10^6 & 7.0 \cdot 10^6 & 3.7 \cdot 10^5 & 5.3 \cdot 10^5 & 3.9 \cdot 10^5 \\ -1.09 & 0.91 & 0.81 & -1.956 & 0.14 & 0.23 & 1.26 & 7.05 & 1.185 & 9.72 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Округлюючи одержані значення до третього числа після коми, що створює додаткову похибку, отримуємо перехідні процеси відносно зміни завдання для номінальної системи (рис., криві 1). Як видно з графіків, час перехідних процесів відрізняється від заданого 60 с та становить 80 с, що для КДУ вкладається в технологічний регламент.

При синтезі системи управління з матрицею K замкнена система втратила властивість надстійкості, тобто застосувати готові формули [1] неможливо, тому далі використовується теорія ймовірності.

Рівномірною випадковою генерацією номінальної матриці об'єкта A (5) в межах заданої невизначеності (матриця K не змінювалася) визначено найбільший розмах невизначеності, за якого система залишається стійкою, що становить $\gamma = 0.18$ з ймовірністю 0.98, причому найменший запас стійкості – 0.037. Отримано граничні перехідні процеси системи управління (рисунок, криві 2...N, де N – кількість випадкових генерацій, $N > 200$) та визначено, що час перехідного процесу системи з невизначеностями не змінився, максимальна динамічна похибка не перевищує 22 % від динамічної похибки номінальної системи та в деяких випадках виникає статична похибка, що не перевищує $0.3^\circ C$ для всіх реалізацій.

Для системи з параметричними невизначеностями матриць A та B (4), (5) виявлено, що розмах невизначеності, за якої система залишається стійкою, зменшився і становить $\gamma = 0.1$ з ймовірністю 0.98, найменший запас стійкості – 0.034, характер перехідних процесів не змінився.



Перехідні процеси відносно зміни завдання:

1 – номінальна система; 2–N – система з невизначеностями

Дослідження показали, що отриманий максимальний розмах невизначеності 10 % вкладається в змінювані умови роботи об'єкта та якість перехідних процесів задовільна, тобто синтезована система є ефективною та не потребує зміни коренів характеристичного полінома.

Висновки

КДУ функціонує в умовах параметричних невизначеностей, тому під час синтезу системи керування цим об'єктом необхідно перевіряти якість та стійкість системи. Невизначеності КДУ можна описати інтервальними залежностями, але, крім зміни матриці A , в математичній моделі (1) змінюється також і матриця B . Формули, наведені в [1], неможливо застосувати для дослідження робастної стійкості системи, тому використовується ймовірнісний підхід.

Для КДУ визначений максимальний розмах невизначеності, за якого система з параметричними невизначеностями (4)–(5) залишається стійкою та має задовільну якість перехідних процесів, а отже, система керування є ефективною.

1. Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
2. Луцька Н.М. Синтез та порівняння багатовимірних регуляторів для колонної дифузійної установки цукрового заводу / Н.М. Луцька, Н.А. Засць, А.П. Ладанюк // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 1 (21). – С. 138–142.
3. Засць Н.А. Автоматизоване управління колонною дифузійною установкою з використанням принципів координації та адаптації: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / Засць Наталія Анатоліївна. – К., 2008. – 187 с.
4. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
5. Kautsky J. and Nichols N.K. Robust Pole Assignment in Linear State Feedback // *Int. J. Control*, 41 (1985). – P. 1129–1155.