

УДК 664.126.43:681.51

М.С. ГЛУЩЕНКО,

Н.М. ЛУЦЬКА

Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ТРАЄКТОРІЙ ПРИ ПОБУДОВІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ УТФЕЛЬНИМ ВАКУУМ-АПАРАТОМ

В роботі досліджується технологічний об'єкт управління — варка утфелю в вакуум-апараті періодичної дії як об'єкт оптимізації. Визначено фазовий простір для моделювання фазових траєкторій та за результатами моделювання обрано один з напрямків подальшого синтезу оптимального керування процесом варки утфелю — синергетична або прикладна теорія управління.

Ключові слова: вакуум апарат, процес кристалізації, синергетика, прикладна теорія керування, фазовий простір, фазова траєкторія.

Складні технологічні об'єкти керування є нелінійними, динамічними, множинними, складаються з великої кількості елементів, які взаємодіють між собою та зовнішнім середовищем. Існують два альтернативних підходи до побудови системи керування складними технологічними об'єктами: прикладна теорія та синергетична теорія. На відміну від загально визнаного методу теорії керування, який для переведення системи з одного стану в інший використовує інтенсивні зовнішні дії, синергетичний підхід відшукує як завжди малі дії на систему, що можуть спонукати її до самоорганізації, виникнення потрібних внутрішніх процесів [1].

Для розв'язання задачі аналізу та синтезу оптимальної системи керування вакуум-апаратом при будь-якому підході необхідна математична модель об'єкта. Відомі різні математичні моделі вакуум-апаратів [2, 3], що можуть бути побудовані у вигляді загальної моделі процесу варки утфелю або окремих складових цього процесу. Процес варіння утфелю є складним, розділений на стадії: згущення сиропу, кристалізації та уварювання утфелю.

Постановка задачі — визначити фазовий простір системи, в якому досліджується процес варки утфелю; шляхом моделювання довести, що даний процес при деякій взаємодії між змінними втрачає стійкість, а фазові траєкторії мають при цьому біфуркаційний характер; визначити напрямки подальших досліджень для побудови оптимального системи керування утфельним вакуум апаратом, використовуючи один з підходів — синергетичний або прикладний.

Для вирішення вказаної задачі була обрана математична модель утфельного вакуум-апарату [2], а саме стадії заведення та нарощування кристалів (II стадія), яка має наступний вигляд:

$$\begin{cases}
 a_1 \frac{dt_{cm}}{d\tau} = \alpha_1 t_n + \alpha_2 t_y - (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot t_{cm}, (V_H \rho_H C_y + S_o \Delta h \rho_y C_y) \frac{dt_y}{d\tau} = \\
 = \alpha_2 S_{cm,ж} (t_{cm} - t_y) + G_{cn} C_{cn} t_{cn} - 1,05 W_H i_y // + (r_k \frac{Kp}{100} - C_y t_y) (G_{cn} - W_H) + \\
 + \frac{\rho_y}{100} (V_H + S_o \Delta h) \times (r_k + C_M t_y - C_k t_y) S_o \rho_y \frac{d(\Delta h)}{d\tau} = \\
 = [1 + (3,45 + 0,04 CB_y - 0,0025 t_y) (CB_y - CB_{cn}) / \rho_y] G_{cn} - \\
 - [1 + (3,45 + 0,04 CB_y - 0,0025 t_y) CB_y / \rho_y] \cdot W_H, \rho_y (V_H + S_o \Delta h) \frac{dCB_y}{d\tau} = \\
 = CB_y W_H - (CB_y - CB_{cn}) G_{cn}, \frac{\theta^n}{n} \tau^{1-n} \frac{dKp}{d\tau} = Kp_m - Kp.
 \end{cases} \quad (1)$$

© М.С. Глущенко, Н.М. Луцька, 2012

де K_p, K_{pM} — поточний та максимальний вміст кристалів цукру відповідно, %; n — коефіцієнт форми кінетичної кривої, який змінюється в залежності від доброякісності утфелю $Dб_y$; θ — постійна часу, год; τ — тривалість процесу, год; CB_y — вміст сухих речовин в утфелі, %; a_1 — постійна часу ємності стінки, год; r_k — теплота випаровування, Дж/(К·кг); $CB_{СП}$ — масовий вміст сухих речовин в сиропі, який підкачується, %; $S_{ст.ж}, S_a$ — площа поверхні нагріву відповідно з боку пари і рідини, м²; t_y, t_n, t_{cm} — температури сиропу, пари в гріючій камері та

стінки нагріву відповідно, °С; i_y'' — ентальпія парової фази парорідинної суміші, кДж/кг; W_n — швидкість випаровування води, кг/с; α_1, α_2 — коефіцієнти тепловіддачі відповідно від гріючої пари до стінки та від стінки труб до киплячого утфелю кВт/м²; Δh — гідростатичний рівень, м; V_n — початковий об'єм утфелю в апараті, м³; ρ_n, ρ_y — відповідно початкова густина сиропу та густина утфелю, кг/м³; C_y, C_M — питомі масові теплоємності утфелю, матеріалу, з якого виготовлений апарат; $G_{СП}$ — витрата сиропу, який підкачується, кг/год.

Для визначення α_1, α_2 та використані формули [2]:

$$\alpha_1 = (t_n + t_n^2)(t_n - t_{cm})^{-0,25},$$

$$\alpha_2 = 0,9279(126 - CB_y - 0,26Kp)(100 - Kp)^{-1} \rho_\theta^{0,84} (t_{cm} - t_y)^{1,33} (t_y + 273)^{-1,49} \times$$

$$\times (t_y - t_\theta)^{-0,84} \cdot \exp \left[-\frac{1,046Kp^2}{(100 - Kp)^2} \right] \exp \left[-22,32 \left(\frac{100 - Dб_y}{Dб_y - 100 \frac{Kp}{CB_y}} \right)^4 \right], \quad (2)$$

де ρ_θ — тиск вторинної пари, кПа; $Dб_y$ — доброякісність утфелю; t_θ — температура вторинної пари, °С.

Постійна часу q , що залежить від інтенсивності процесів теплообміну, та коефіцієнт форми кінетичної кривої n залежать від змінних процесу та визначається з [2].

Перетворимо систему (1) до простору змінних стану:

$$\dot{X} = F(X, U, E, \tau), \quad (3)$$

$$X(0) = X_0, \quad (4)$$

де координатами стану X є: температура стінки t_{cm} , температура утфелю t_y , приріст гідростатичного рівня утфелю Δh , масовий вміст сухих речовин CB_y і кристалів в утфелі Kp ; U — вектор керування: температура пари в гріючій камері t_n , тиск вторинної пари ρ_θ ; E — вектор збурень: витрата $G_{СП}$ температура $t_{СП}$ та кількість сухих речовин $CB_{СП}$ сиропу, який підкачується, доброякісність сиропу $Dб_y$; $F(\bullet)$ — нелінійна функція; τ — часова змінна; X_0 — початкове значення координат стану.

$$X = \begin{bmatrix} t_{cm} \\ t_y \\ \Delta h \\ CB_y \\ Kp \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} t_n \\ \rho_\theta \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} Dб_y \\ G_{СП} \\ t_{СП} \\ CB_{СП} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Всі інші змінні є константами для одного процесу варіння утфелю в конкретному вакуум-апараті.

Сироп, який поступає з випарної станції нагрівають до кипіння, виникає так званий утфельний пар, який виводиться, таким чином відбувається згущення сиропу. Процес

кристалізації цукру є одним з найбільш складних технологічних процесів, які проводять в харчовій промисловості в апаратах періодичної дії. Мета кристалізації — виділити розчинений в сиропі цукор у вигляді кристалів. При досягненні потрібного коефіцієнта пересичення вводять затравку у вигляді цукрової пудри. Після закінчення подачі пудри підживлюють апарат сиропом і починають нарощування кристалів. Уварюванням утфелю ведуть до установленого регламентом вмісту сухих речовин.

Зобразимо роботу процесу варіння утфелю в вакуум-апараті в фазовому просторі (рис. 1). Першу координату стану t_{cm} відкидаємо так як вона не обмежена технологічним регламентом та друга координата стану t_y кореляційна з нею. Стан системи (область S) та переходи між станами (на рис. 1 показані стрілками) залежить від попереднього стану системи, збурення, управління, а також неврахованих чинників, що не описані в математичній моделі об'єкта. В найпростішому випадку область S_i — це куб в трьохвимірному просторі, який побудований за найбільшими та найменшими значеннями фазових координат, що визначаються технологічним регламентом. Відмітимо, що після першої стадії з'являється четверта координата K_p , а фазовий простір перетворюється в чотирихвимірний. Область S_i частково входить в рівняння (4).

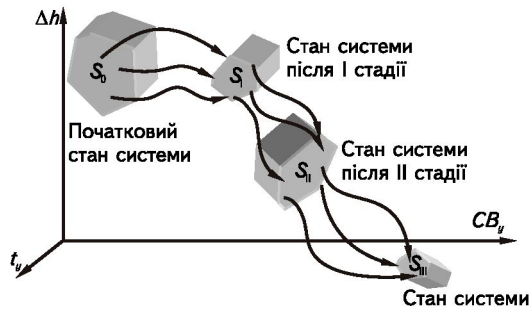


Рис. 1. Фазовий простір процесу варки утфелю

Отже, отримуємо області, що задані найменшим та найбільшим значенням фазових координат:

$$S_0: CB_y = [60 - 70]; t_y = [70 - 74]; Dh = [2 - 3,5].$$

$$S_1: CB_y = [70 - 80]; t_y = [72 - 75]; Dh = [2,5 - 3].$$

$$S_2: CB_y = [80 - 84]; t_y = [73 - 76]; Dh = [2,7 - 3,2]; K_p = [0 - 55].$$

$$S_3: CB_y = [84 - 92]; t_y = [74 - 77]; Dh = [2,8 - 3,3]; K_p = [55 - 64].$$

При моделюванні фазових портретів стадії кристалізації, враховуючи особливості технологічного процесу та кореляцію деяких змінних, фазовими координатами обирають температуру утфелю t_y , природний гідростатичного рівня утфелю Δh та масовий вміст сухих речовин CB_y .

Моделювання проводиться при варіації змінних та початкових умов в межах технологічного регламенту. Початкова точка на рисунках зображена зірочкою, а рух до кінцевої траєкторії — стрілкою.

1. Моделювання при зміні збурень.

Як видно з рис. 2 та рис. 3 зміна збурень не впливає на форму фазової траєкторії, змінюється лише кінцевий стан системи, що вкладається в задану область S_3 .

1. Моделювання при зміні управління.

При зміні температури пари t_n (рис. 4, а) фазова траєкторія суттєво змінюється, зокрема при збільшенні t_n до 150 °C значення температури утфелю t_y збільшується до 90 °C, що недопустимо за технологічним регламентом (зелена крива), а при зменшенні t_n до 100 °C t_y падає до 40 °C, що також недопустимо. Відповідно рівень в апараті в першому випадку зростає, а в другому — зменшується.

При зміні тиску вторинної пари p_s (рис. 4, б) змінюється кінцевий стан системи, а фазова траєкторія не змінюється.

3. Моделювання при зміні початкових умов.

Як видно з рис. 5 при зміні початкового значення t_y фазова траєкторія майже не змінилася (середні графіки з'єдналися), при збільшенні початкового значення Δh траєкторія піднялася в гору, а при зменшенні початкового значення CB_y траєкторія змістилася вправо. При цьому кінцевий стан системи при деяких значеннях початкових умов не вкладається в область S_3 .

Аналізуючи результати моделювання фазових траєкторій даної системи робимо висновок, що не дивлячись на те, що система є нелінійною, багатовимірною та багатозв'язною, в ній не виникає критичних та хаотичних режимів, а перехідні режими є доволі простими.

Тому, при побудові оптимального керування утфельним вакуум апаратом необхідно використати прикладну теорію керування.

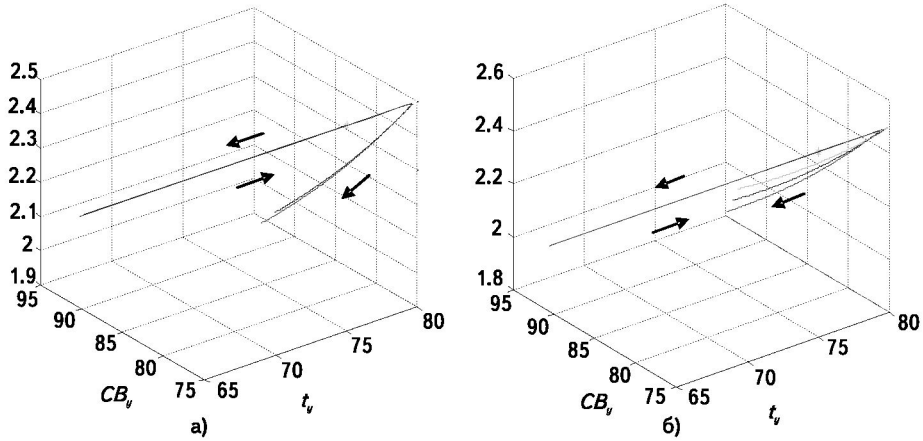


Рис. 2. Фазові портрети при зміні а) D_b ; б) G_{cp}

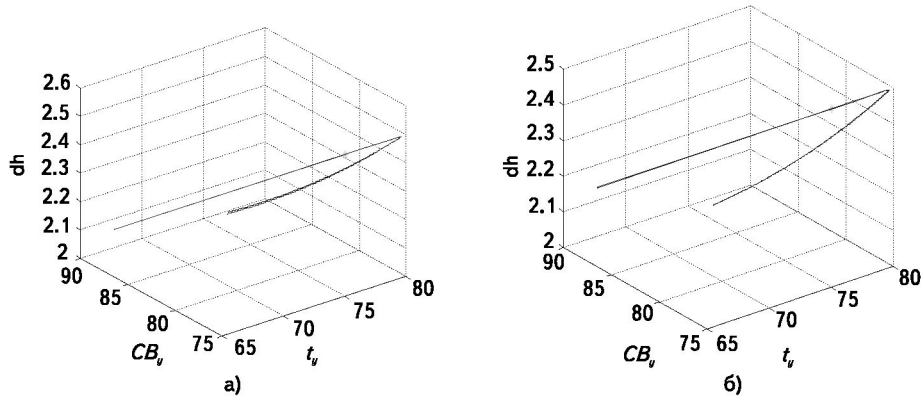


Рис. 3. Фазові портрети при зміні а) t_{cp} ; б) CB_{cp}

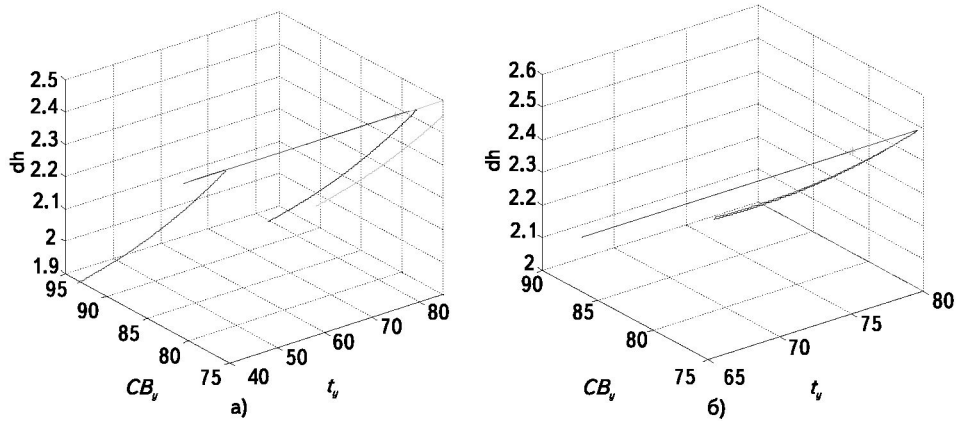


Рис. 4. Фазові портрети при зміні а) t_n ; б) ρ_s

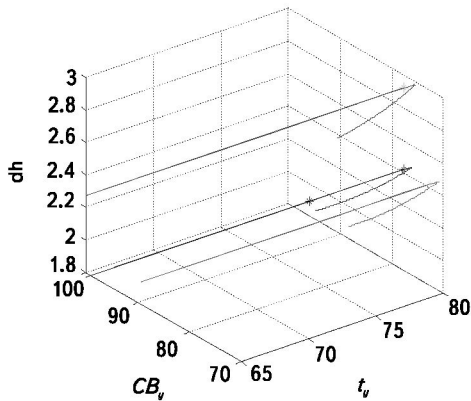


Рис. 5. Фазові портрети при зміні початкових умов

При класичному (прикладному) підході до керування вакуум-апаратом періодичної дії кристалізація цукру складається з ряду послідовно виконуваних стадій. Перехід до чергової стадії відбувається при досягненні заданих значень координат стану (область S).

При побудові системи керування утфельним вакуум-апаратом, задача оптимізації є однією з головних задач для керування. Метою створення системи оптимального керування утфельним вакуум-апаратом є поліпшення техніко-економічних показників його роботи за рахунок: зменшення часу проходження процесу; скорочення втрат кінцевого продукту; ведення технологічних процесів в оптимальних або близьких до них режимах; підвищення оперативності контролю процесу.

У загальному вигляді задача динамічної оптимізації процесу кристалізації зводиться до знаходження такої функції $U^*(\tau)$ або $X^*(\tau)$ при $\tau_k \geq \tau \geq \tau_0$, яка забезпечує оптимум функціоналу

$$I = \int_{\tau_0}^{\tau_k} \varphi(X, U, E, a) d\tau \rightarrow \underset{U(\tau) \in \Omega}{opt} \Rightarrow U^*(\tau) \text{ або } X^*(\tau) \quad (6)$$

при таких обмеженнях:

$$\Omega : \begin{cases} F(\dot{X}, X, U, E, b) = 0, & (7) \\ 0 \geq H(X, U, E), & (8) \\ G(X(\tau_k), X(\tau_0)) = 0, & (9) \end{cases}$$

де (7) — обмеження типу зв'язків, тобто математична модель об'єкта (1) у вигляді (3); (8) — обмеження типу нерівностей; (9) — крайні умови, що складені з області S_1 та рівняння (4). Функція J критерію (6) може описувати вихід готового продукту та тривалість проходження процесу.

Вакуум апарати періодичної дії, як об'єкти оптимізації відносяться до об'єктів з неповною інформацією, тому для їх оптимізації використовують аналітичні адаптивні алгоритми з прогнозуючою моделлю та зворотнім зв'язком. Неповнота інформації про об'єкт спричинена відсутністю інформації про всі складові вектор-функції обмежень типу нерівностей H та вектора збурень E . Невідомими найчастіше є обмеження, пов'язані, насамперед, з критичними значеннями рушійної сили, перевищення яких приводить до критичних ситуацій в апараті. Зокрема, при кристалізації цукру перевищення пересиченням міжкристального розчину критичних значень призводить до інтенсифікації процесів вторинного кристалоутворення, що суттєво змінює гранулометричний склад цукру і робить його непридатним для подальшої обробки. А збурення об'єкта керування зумовлені: змінами технологічних властивостей сировини; змінами характеристик обладнання (знос, забруднення); впливом рівня організації виробництва, кваліфікацією виробничого персоналу.

Висновки. Визначено координатний простір та зроблено постановку задачі в фазовому просторі процесу варіння утфелю. Проведено математичне моделювання стадії кристалізації цукру та виявлено, що в об'єкті не виникає критичних та хаотичних режимів, тому при побудові оптимальної системи керування процесом варіння утфелю необхідно використати прикладну теорію управління. Приведена постановка задачі оптимізації та подальші методи її розв'язання.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Методи сучасної теорії управління*: [навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл.] / Ладанюк А.П., Кишенько В.Д., Луцька Н.М., Івашук В.В. — К.: НУХТ, 2010. — 196 с.

2. Глущенко М.С. Моделювання і оптимальне керування періодичними процесами в утфельних вакуум-апаратах: дис. канд. техн. наук.: 05.13.07 / М.С. Глущенко — К., 2008. — 195 с.

3. Трегуб В.Г. Автоматизация периодических процессов в пищевой промышленности / Трегуб В.Г. — К.: Техніка, 1982.

В работе исследуется технологический объект управления — варка утфеля в вакуум-аппарате периодического действия как объект оптимизации. Определено фазовое пространство для моделирования фазовых траекторий и на результатах моделирования выбрано одно из направлений дальнейшего синтеза оптимального управления процессом варки утфеля — синергетическая или прикладная теория управления.

Ключевые слова: вакуум-аппарат, процесс кристаллизации, синергетика, прикладная теория управления, фазовое пространство, фазовая траектория.

M.S. Glushchenko, N.N. Lutskaya

Research of phase trajectories

for building optimal control fillmass vacuum pans

The technological object of management is cooking of fillmass in the vacuum pan of batch-type as an object of optimization. Phase space is certain for the design of phase trajectories and on the results of design one of directions of further synthesis of optimum management of the process cooking of fillmass is chosen as a synergetic or applied theory of management.

Key words: vacuum pan, process crystallization, synergetic, applied theory of management, phase space, phase trajectory.

Одержана редколлегією 14.05.12 р.