

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ Й ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ БАРАБАННИХ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Питання оптимізації режимів для технологічних систем потокової переробки сировини мають істотний вплив на рентабельність підприємств хімічної, харчової й металургійної промисловості. На сьогодні залишається актуальним завдання переходу від вимог рентабельності до керувальних впливів, що вимагає розробки спеціалізованих методів. Такі методи повинні використовувати показник ефективності, що оцінює результати технологічної операції за сукупністю вартісних оцінок вихідного продукту, витрат і часу. У роботі показано, що структура каналної системи обробки сировини повинна містити блоки обчислення вартості витрат сировини, ресурсу й енергії для обробної й транспортувальної частин установки й розрахунку загального показника ефективності. Розглянуто приклад технологічної лінії сушіння гранульованого продукту в барабанній печі із зонними й аксіальними пальниками, що використовують різні види палива. Враховується взаємовплив компонентів лінії на її продуктивність, якість і витрати. Нелінійний вид виразу для показника ефективності вимагає його модифікації для використання в методі динамічного програмування. Для пошуку оптимального режиму вибрано метод динамічного програмування, що визначає оптимальну фазову траєкторію, яка максимізує сформульований для цього методу аддитивний критерій. Вартісна оцінка ділянок траєкторії виконувалася за допомогою обчислювальної моделі, що описує динамічні процеси в установці. Пошук оптимальних керувань здійснювався від кінця можливої траєкторії до початку у дискретизованому просторі фазових координат. Фазовими координатами є положення порції продукту в середині барабана, вологість продукту; керувальними величинами — кутова швидкість барабана, витрати палива в кожному пальнику. Порівняння значень показника ефективності для знайденої оптимальної траєкторії та траєкторій з відхиленнями показало правильність вибраного підходу.

Ключові слова: оптимальне керування, ефективність, динамічне керування.

Вступ

На сировинно-переробних підприємствах полтавського регіону системи керування лініями обробки оновлені й виконані на платформі сучасних програмувальних логічних контролерів і SCADA-систем. Разом з тим, спостерігається ситуація, коли система керування забезпечує тільки data logging, стабілізацію керованих величин і регулювання в окремих контурах, логічне керування виконавчими пристроями й захисту. Повноцінне комплексне погоджене автоматичне керування як єдиною продуктивною системою відсутнє. Таке завдання вирішується, у більшості випадків, використанням оперативного персоналу для формування режиму роботи й узгодження продуктивності окремих етапів. Можна зробити припущення, що резерви підвищення рентабельності сучасного виробництва варто шукати у виборі й дотриманні максимально ефективних режимів роботи технологічних установок разом з дотриманням технологічних обмежень.

Існують роботи, в яких ефективність визначається через мінімізацію й максимізацію використання технічних ресурсів: мінімальне енергоспоживання [1], максимальна швидкість [2], мінімальна траєкторія [3], мінімальна помилка [4], витрата палива [5] і т. д. У роботах [6]—[7] обґрунтовано підхід до оптимізації систем керування через аналіз ефективності використання ресурсів і досягнення режимів найбільшої рентабельності, при цьому оцінка прив'язана не до технічних по-

казників, а до вартості. Визначення ефективності технологічної операції можливо через знаходження вартісних оцінок готової продукції, витрат на вхідну сировину, витрат ресурсу устаткування, витрат енергоносія, часових витрат на виробництво одиниці продукції [8]—[10].

Проблема досягнення максимальної ефективності засобами автоматичного керування має декілька аспектів:

- зміна кон'юнктурного попиту й ціни на готову продукцію, що впливає на вимоги до продуктивності устаткування й вартісної оцінки готової продукції на розглянутому інтервалі;
- залежність вартісних оцінок продуктів операції від низки якісних показників;
- зміна тарифів на енергоносії, вартості відновлення ресурсу обладнання;
- зміна вартості вхідної сировини;
- зміна продуктивності технологічних установок на попередніх стадіях технологічного ланцюга, що вимагає зміни продуктивності й переходу на інший режим;
- складності з отриманням актуальної або достовірної інформації про критичні параметри процесу, що означає недостатню спостережуваність і керуваність.

Функція обчислення показника ефективності, згідно з [10] має вигляд

$$Eff = \text{sign}(PE \cdot Yr - RE) \frac{(PE \cdot Yr - RE)^2 T_1^2}{PE \cdot Yr \cdot RE \cdot T_{op}^2}, \quad (1)$$

де PE — вартість кінцевого продукту, RE — сумарні витрати, T_1 — базова тривалість операції, T_{op} — час операції, $Yr = f(F_{set}, F_{act})$ — функція коректування вартості продукту залежно від якісних або кількісних показників; F_{set}, F_{act} — відповідно, задана й актуальна величини показника.

Функція коректування вартості продукту $Yr(F_{set}, F_{act})$ для критерію (1) може бути побудована на основі гаусової функції, значення якої можуть перебувати в діапазоні $[a; 1]$. Критерій вигляду (1) дозволяє проводити порівняльну оцінку режимів та з доступної безлічі вибрати ті, які забезпечать найбільшу вартість готової продукції за мінімальної вартості спожитих сировини, енергії й ресурсу. Також забезпечується чутливість до технологічних обмежень через коректування оцінної вартості готової продукції.

Таким чином, за наявності вищеперерахованих проблем попереднє визначення вартісних оцінок витрат на операцію й результатів операції зі зміною режиму утруднені. Це означає, що ускладнений і модельний пошук максимуму ефективності функціонування технологічного устаткування.

В існуючих реаліях у переробній індустрії (до якої можна віднести виробництво залізничного концентрату, виробництво технічного вуглецю, виробництво кормових добавок) оперативний персонал домагається виходу на будь-який допустимий сталий режим. Зміну режиму намагаються не допускати, тому що з'являються ризики неутримання критичних параметрів якості продукту в допустимих межах. Тому важливо з початку визначити режим, що має найбільшу ефективність у межах заданої продуктивності технологічної лінії для певної марки продукції. Після чого ставиться завдання його досягнення й стабілізації. В роботах [11]—[17] викладено способи керування й прогнозування безперервним динамічним процесом з використанням мультиагентної системи (МАС), яка має набір однорангових об'єктів, що класифікують поточний стан процесу по тимчасових звітах технологічних сигналів. Така МАС орієнтована на визначення параметрів, які не підлягають прямому вимірюванню. По суті, МАС повинна виступати як предиктор, що ідентифікує регульований параметр на наступних тактах керування [19], [20]. Позитивний ефект від застосування предикторів і спостерігачів стану в процесах автоматичного керування описаний у роботах [21], [22]. У статті [23] описано застосування нейронної мережі для ідентифікації стану й керування нелінійним динамічним об'єктом з використанням фреймворка “control system design”. У цьому прикладі нейронна мережа ставить у відповідність поточній ситуації оптимізовані керувані впливи, що забезпечує переваги над традиційними системами регулювання.

Метою роботи є оптимізація режимів технологічних установок з багатоступеневою обробкою сировини за критерієм максимальної ефективності шляхом використання спеціалізованого методу пошуку оптимальної фазової траєкторії.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі завдання дослідження:

- розвиток концепції оптимізації режимів роботи устаткування переробного виробництва засобами автоматичного керування з використанням показників ефективності, формулювання критерію оптимізації;
- аналіз технологічної лінії сушіння гранульованого технічного вуглецю в барабанній установці з декількома джерелами теплової енергії як об'єкта оптимізації;

- розробка вдосконаленого методу визначення оптимального режиму роботи шляхом рішення статичного завдання пошуку фазової траєкторії зміни вологості продукту, що максимізує критерій ефективності всієї операції;
- аналіз необхідності застосування інтелектуальних технологій для забезпечення завдань оптимізації.

Результати дослідження

Формальна загальна модель продуктової системи з аналізом поточної ефективності показана на рис. 1. У її склад входять основне технологічне устаткування, що здійснює обробку й переміщення продукту від однієї стадії обробки до іншої. Крім того, до складу системи входять різні допоміжні підсистеми, робота яких також впливає на кількість і якість вихідного продукту, на загальну ефективність системи.

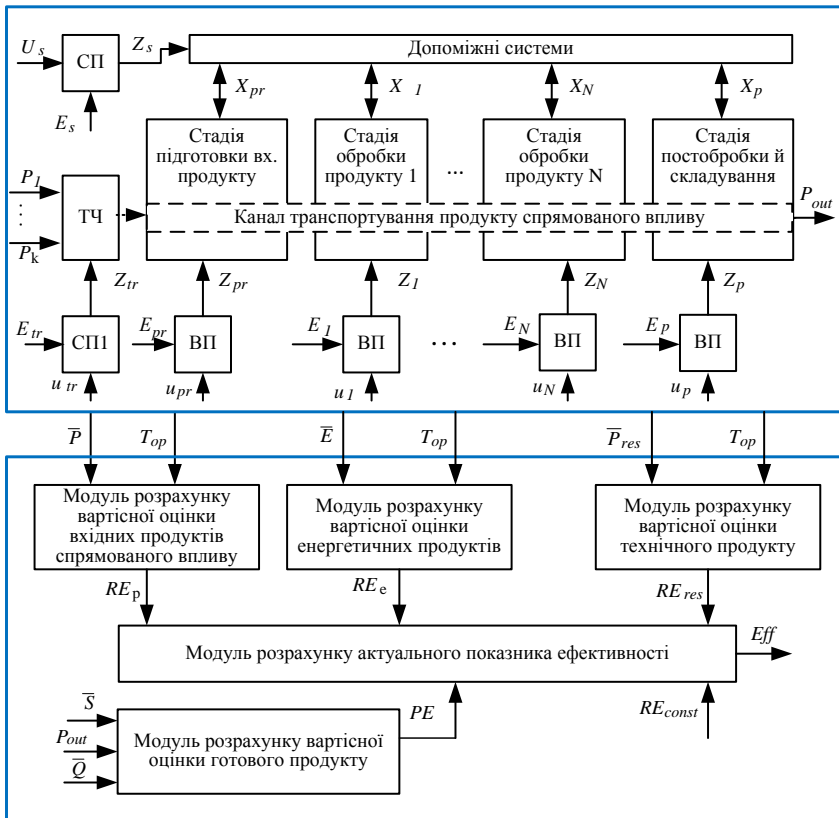


Рис. 1. Структурна схема каналної системи обробки сировини з функцією оцінки ефективності: СП — силовий перетворювач; ВП — виконавчий пристрій; ТЧ — транспортна частина

обробки сировини має сенсорні компоненти, які забезпечують систему керування актуальною й точною інформацією про процеси, що відбуваються, в основному й допоміжному устаткуванні, у виконавчих підсистемах.

Можна виділити низку впливів, що безпосередньо впливають на ефективність функціонування технологічної лінії: $\bar{P} = (P_1, \dots, P_k, P_{out})$ — вектор матеріальних потоків; $\bar{Z} = (Z_{tr}, Z_{pr}, Z_1, \dots, Z_N, Z_p, Z_s)$ — вектор впливів на основний процес перетворення сировини; $\bar{E} = (E_{tr}, E_{pr}, E_1, \dots, E_N, E_p, E_s)$ — вектор споживаних енергоносіїв кожною стадією обробки; $\bar{X} = (X_{pr}, X_1, \dots, X_N, X_p)$ — вектор впливів допоміжних систем на технологічний процес, що включає матеріальні потоки супутніх і побічних продуктів; $\bar{U} = (u_{tr}, u_{pr}, u_1, \dots, u_N, u_p, U_s)$ — вектор керувальних впливів, формований системою керування на виконавчі пристрої. Матеріальні сировинні потоки містять у собі деяку кількість вхідних компонентів (P_1, \dots, P_k) , які подаються на входи технологічної установки. Також до них можна віднести обсяг готового продукту P_{out} , вироблюваного в процесі роботи установки.

У процесі аналізу можна виділити, що вектор керувальних впливів включає такі компоненти: u_{tr} — вплив на транспортувальну частину установки; u_{pr} — вплив на підготовчу (вхідну) частину

Кожний вид технологічного устаткування й кожна стадія характеризується видом споживаного енергетичного продукту і його витратою в одиницю часу. Для керованих вузлів можна виділити керувальні впливи й виконавчо-перетворювальні пристрої, які здійснюють прямий вплив на перебіг технологічного процесу за рахунок підведеної енергії.

Невід'ємною частиною технологічної лінії (установки) є допоміжні підсистеми, які забезпечують коректний перебіг основного процесу обробки. Сюди можна віднести підсистеми видалення газів, фільтри, проміжні теплообмінники, компресори, насоси, трубопроводи для подачі додаткових продуктів спрямованого впливу й видалення побічних і супутніх продуктів основного процесу.

Вважається, що система

установки; $u_1 \dots u_N$ — вплив на обробні частини установки; u_p — вплив на виконавчі пристрої постобробки й складування вихідного продукту.

Для аналізу поточної ефективності необхідно використати сигнали, які можна згрупувати в такі набори: \bar{S} — вектор обмежень на якісні й кількісні характеристики продукту, що впливають на вартісну оцінку. Сумарна вартісна оцінка витрат на операцію обчислюється на основі вектора $\overline{RE} = (RE_e, RE_p, RE_{res}, RE_{const})$, де RE_e — витрати на енергоносії, спожиті під час операції; RE_p — вартість сировини, витраченої на виготовлення порції продукту; RE_{res} — вартість ресурсу устаткування, виробленого під час операції; RE_{const} — постійні витрати, що несе підприємство для здійснення можливості роботи технологічної установки протягом часу операції.

Режим роботи кожної стадії визначається кількістю й швидкістю транспортування продукту, кількістю енергії, що підводиться в одиницю часу, початковою характеристикою продукту на вході в кожну секцію, параметрами роботи допоміжного устаткування. Вважається, що марка продукту постійна. Як правило, перша стадія призначена для підготовки й дозування продукту спрямованого впливу. Вона здійснює змішування складових продукту й його дозування, формує вхідний потік продукту в транспортувальну систему. Остання стадія в технологічній послідовності на рис. 1 забезпечує стадії постобробки й вивантаження готової продукції в накопичувач.

Також до складу системи входять модулі обчислення вартісних оцінок витрат на енергетичні продукти, споживані за час операції, витрат на продукти спрямованого впливу, обчислення витрат ресурсу устаткування й обчислення вартості готових продуктів з обліком їх якісних і кількісних характеристик. Тимчасові витрати для кожного окремого сформованого режиму можна визначити як час проходження умовної порції сировини через установку.

Для досягнення поставленої мети необхідно досліджувати можливість модифікації методів оптимізації, здатних визначати область знаходження екстремуму критерію ефективності (1) для поточних режимів роботи.

Для проведення досліджень розглянемо технологічну лінію сушіння гранульованого технічного вуглецю в барабанній установці, що обертається усередині футерованої топки. Для даного прикладу можна виділити всі елементи каналної системи обробки сировини (рис. 2).

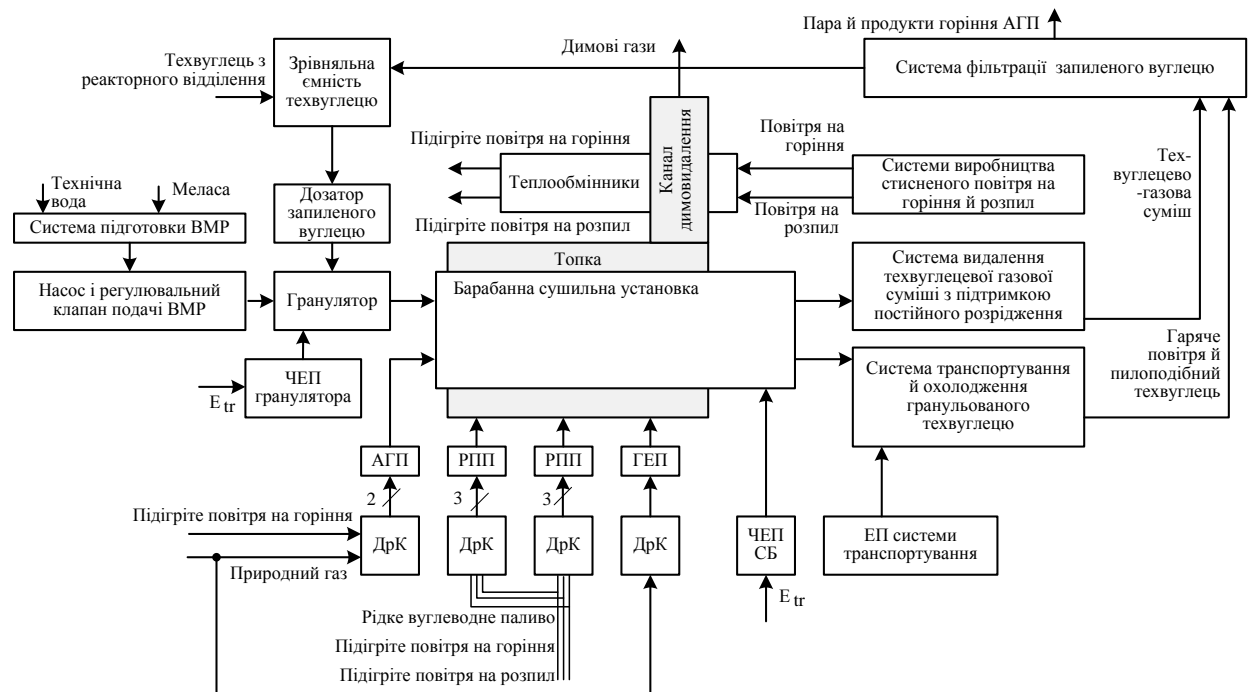


Рис. 2. Схема технологічної лінії сушіння гранульованого продукту

Для підготовчої стадії транспортна система представлена трубопроводами з насосами й дозувальними пристроями, по яких у гранулятор подається техвуглець, водно-меласовий розчин (ВМР).

Основна транспортувальна частина представлена похилим обертовим барабаном із частотним електроприводом (ЧЕП СБ). Усередині барабана розташовані полки, що забезпечують перемішу-

вання й просипання гранульованого продукту через потік внутрішніх гарячих газів. Зі збільшенням частоти обертання барабана, зменшується час проходження умовної порції продукту й зменшується загальне завантаження барабана, збільшується відносно заданого значення вологість продукту на виході кожної стадії.

На підготовчій стадії використовується агрегат грануляції та системами дозування техвуглецю, води й меласи. Результатом цієї стадії є потік вологого гранульованого техвуглецю, що характеризується параметрами: вологістю, температурою, розміром, міцністю й рівномірністю гранул. Перша стадія займає першу чверть об'єму барабана. Тут процес сушіння виконується двома рідкопаливними пальниками (РПП), що забезпечують відповідний факел високотемпературного полум'я, який передає теплову енергію через стінки барабана висушуваним гранулам. Друга стадія аналогічна першій і займає другу чверть об'єму барабана. У типових режимах включеними перебуває неповна кількість пальників перших двох стадій (2—3). Третя стадія обробки представлена вісьмома ежекційними газовими пальниками (ГЕП) із загальним регулювальним клапаном (ДрК — дросельованим клапаном). Готовий продукт на стадії постобробки проходить через кілька трубопроводів з транспортними шнеками, через які продувається стиснене повітря для охолодження. Система аспірації вловлює пилоподібні частки техвуглецю й повертає назад у зрівняльну ємність. Охолоджені гранули засипаються в бункери готової продукції для подальшого фасування.

Допоміжні системи включають компресори, що забезпечують подачу стисненого повітря. Споживається стиснене повітря пальниками, причому окремо виділяється канал для стисненого повітря високого тиску на розпил рідкого палива, окремо — для стисненого повітря на горіння для рідкопаливних пальників і аксіального газового пальника (АГП). Також стиснене повітря використовується для охолодження готових гранул і транспортування запиленого вуглецю. До допоміжних систем можна віднести аксіальний газовий пальник, що забезпечує додатковий потік гарячих газів усередину барабана. Існує обмеження на температуру газів: її намагаються не піднімати вище 800 °С, позаяк в іншому випадку, збільшується корозійна дія газів на матеріали барабана й влучення металевих часток у готову продукцію. Випарувана волога й продукти горіння аксіального пальника виводяться окремим компресором з вихідного торця барабана на систему фільтрації.

Для цієї технологічної установки можна виділити низку обмежень, які варто враховувати для формування технологічних режимів і оцінюванні ефективності:

- продуктивність сушильної установки повинна відповідати продуктивності хімічних реакторів і вага сировини в зрівняльній ємності має бути постійною;
- температура газів аксіального пальника не повинна перевищувати 750...800 °С, щоб уникнути корозійного руйнування барабана;
- температура полум'я не повинна перевищувати 900 °С, позаяк це приводить до руйнування вогнетривкої футеровки печі й ушкодження матеріалу барабана;
- подача палива в один рідкопаливний пальник не повинна бути більшою, ніж необхідно для витримання співвідношення паливо-повітря 1:1,5, інакше буде неповне згоряння палива;
- частота обертання барабана повинна лежати в межах [2,1; 3,5] об/хв;
- вологість готового гранульованого техвуглецю повинна лежати в межах 0,2...0,8 %.

Критерій оптимальності й постановка завдання оптимізації.

Вираз (1) не зовсім підходить для оптимізації режимів багатостадійної каналної обробки сировини, тому що не має властивості адитивності. Як показано в [24] з виразом (1) не вдається використати принцип оптимальності Белмана. З урахуванням того, що оптимізацію можна розбити на етапи з постійною швидкістю проходження сировини, то доцільно сформулювати критерій в адитивній формі, виключивши з нього час. Відповідно до положень теорії ефективності [1], критерієм може виступати різниця між оцінкою вартістю порції вихідного продукту й витратами на його виробництво з вартістю сировини на вході й витрачений ресурс включно. За аналогією зі способом формування критерію в [24], маємо

$$Q_{ij} = PE^{i,j} - C_{i,jz}, \quad (2)$$

де i — номер стадії обробки; j — номер крапки фазової траєкторії на виході поточної стадії; z — номер крапки фазової траєкторії попередньої стадії; $PE_{i,j}$ — вартісна оцінка порції продукту на виході i -ї стадії для j -ї точки; $C_{i,jz}$ — ціна переходу для i -ї стадії процесу від z -ї точки попередньої стадії до j -ї точки поточної.

Ціна переходу на поточній ділянці (i -та стадія) від z -ї точки попередньої стадії до j -ї точки поточної обчислюється так:

$$C_{i,jz} = RE_e^{i,jz} + RE_p^{i,jz} + RE_{res}^{i,jz} + RE_{const}^{i,jz} \quad (3)$$

Вартість сировини, витраченої на виготовлення порції продукту для основних стадій обробки визначається через вартісну оцінку продукту

$$RE_p^{i,jz} = PE_{i-1}^z = m_{bc} C_{bc}^T \cdot f_{cost}(\varphi), \quad (4)$$

де m_{bc} — маса порції продукту, C_{bc}^T — вартість одиниці готового продукту, $f_{cost}(\varphi)$ — функція вартості залежно від якісного показника (у випадку з техвуглецем — це вологість).

Доцільно функцію вартості задати в табличному вигляді (табл. 1).

Таблиця 1

Функція вартості залежно від вологості

$\varphi, \%$	65	1	0,75	0,25	0
$f_{cost}(\varphi), \text{отн. ед.}$	0	0,75	1	0,95	0

Якщо провести дискретизацію по стадіях обробки і якісному показнику продукту, то безліч можливих фазових траєкторій ілюструє рис. 3 (масштаб не дотримується).

Завдання пошуку оптимального закону керування буде мати вигляд

$$S = \sum_{i=1}^m Q_i(u_i) \rightarrow \max, u \in \Omega, \quad (5)$$

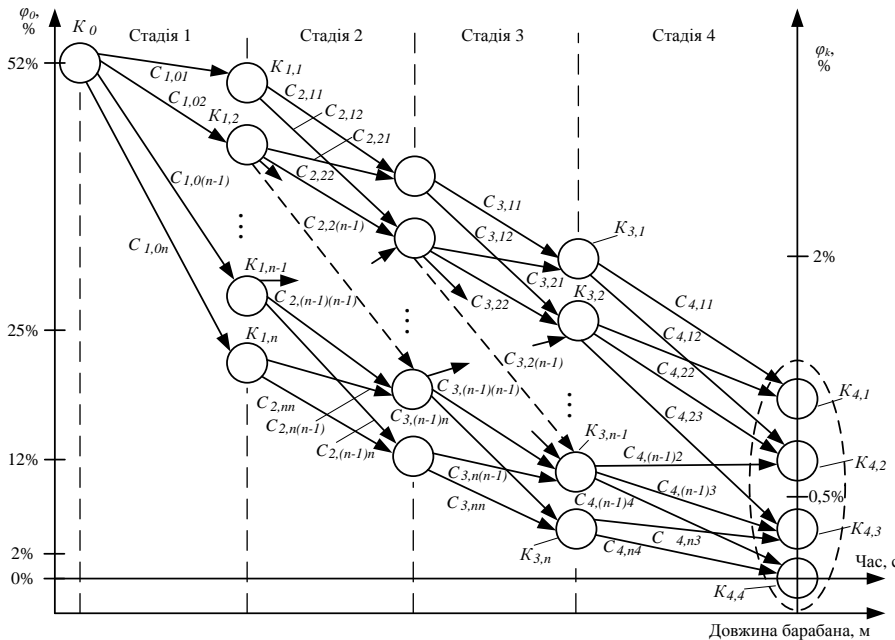


Рис. 3. Схема можливих фазових траєкторій при рішенні статичного завдання динамічного програмування (φ_0 – вологість продукту; φ_k – вологість продукту наприкінці барабана)

де u_i — керувальний вплив на i -й стадії; Ω — область допустимих керувань.

Множина фазових траєкторій (рис. 3) обмежується фізичною реалізованістю для цієї технологічної установки. Для розглянутого випадку вважається постійним потік вхідних продуктів і швидкість обертання сушильного барабана. Запропонований критерій дозволяє використати принцип оптимальності Белмана й модифікований метод динамічного програмування для знаходження найефективнішого технологічного режиму.

Метод пошуку оптимальної фазової траєкторії, що забезпечує найбільшу ефективність

У [25] описано застосування методу динамічного програмування для знаходження траєкторії з мінімальними витратами після дискретизації простору й відомої вартості елементарних ділянок шляху (статичне завдання динамічного програмування)

$$Q = \sum_{k=0}^{N-1} F(x_k, u_k) dt + \varphi[x_N], \quad (6)$$

де x — єдина координата системи; u — єдиний керувальний вплив, на який накладене обмеження $u \in \Omega(u)$; $\varphi[x_N]$ — деякий функціонал, що залежить від значень координати x наприкінці траєкторії, тобто значення критерію на останньому кроці (без урахування попередніх); $F(x_k, u_k)$ — функція критерію оптимальності.

Припустимо спочатку розглядається момент часу $t_{N-1} = \Delta(N-1)$, що відповідає останньому кро-

ку. Всі значення u_i крім останнього u_{N-1} якимось чином були здійснені й при цьому отримано певне значення x_{N-1} , відповідно моменту часу t_{n-1} . Відповідно до принципу оптимальності, вплив u_{N-1} не залежить від «передісторії» системи й визначається лише станом x_{N-1} і метою керування. На останній ділянці траєкторії (від t_{N-1} до t_N) величина u_{N-1} впливає на ті складові суми (6), які відносяться до цієї ділянки, тобто

$$Q_{N-1} = F(x_{N-1}, u_{N-1}) + \phi[x_N]. \quad (7)$$

Користуючись (6), за умови $k = N - 1$ отримуємо:

$$Q_{N-1} = F(x_{N-1}, u_{N-1}) + \phi[x_{N-1} + f(x_{N-1}, u_{N-1})], \quad (8)$$

де $f(x, u)$ — функція, що описує закон формування фазової траєкторії.

Позаяк метою керування є мінімізація Q , то цю умову необхідно виконати й для розглянутої ділянки. Позначимо $\min Q_{N-1} = S_{N-1}$. Як видно з (8), значення S_{N-1} , залежить від стану системи в момент t_{N-1} , тобто від x_{N-1} . Тоді можна записати

$$S_{N-1}(x_{N-1}) = \min Q_{N-1} = \min \{F(x_{N-1}, u_{N-1})\} + \phi[x_{N-1} + f(x_{N-1}, u_{N-1})]. \quad (9)$$

У цьому випадку для визначення S_{N-1} потрібно робити мінімізацію Q_{N-1} тільки за однією змінною u_{N-1} . Виконавши це, отримуємо S_{N-1} у вигляді функції від x_{N-1} цю функцію необхідно занести в масив пам'яті перед переходом до подальших стадій розв'язання.

Перейшовши до передостанньої ділянки часу (від t_{N-2} до t_{N-1}) отримуємо:

$$Q_{N-2} = F(x_{N-2}, u_{N-2}) + F[x_{N-1}, u_{N-1}] + \phi(x_N). \quad (10)$$

Користуючись знову принципом оптимальності, можемо сказати, що лише значення x_{N-2} і ціль керування (мінімізація Q_{N-2}) визначають оптимальне керування u_{N-2} і u_{N-1} на розглянутій ділянці часу. Але мінімум по u_{N-1} і, отже, саме оптимальне значення $u_{N-1} = u_{N-1}^*$ уже були знайдені для кожного значення x_{N-1} (а це останнє залежить від u_{N-2}). Отримуємо рівняння, з урахуванням того, що перший доданок (9) не залежить від u_{N-1} , а два других рівні Q_{N-1} :

$$Q_{N-2} = F(x_{N-2}, u_{N-2}) + Q_{N-1}. \quad (11)$$

Оскільки $\min Q_{N-1}$ по u_{N-1} дорівнює S_{N-1} , маємо

$$S_{N-2}(x_{N-2}) = \min Q_{N-2} = \min \{F(x_{N-2}, u_{N-2}) + S_{N-1}(x_{N-1})\}. \quad (12)$$

Міркуючи аналогічним образом, отримуємо рекурентну формулу

$$S_{N-k}(x_{N-k}) = \min \{F(x_{N-k}, u_{N-k}) + S_{N-k-1}(x_{N-k} + f(x_{N-k}, u_{N-k}))\}. \quad (13)$$

Паралельно в процесі мінімізації правої частини формули (13) визначається оптимальне значення u_{N-2}^* , яке залежить від x_{N-2} і вираз мінімізації у фігурній дужці формули (13).

Обчислюючи за формулою (13) послідовно, S_{N-k} для $k = 1 \dots N$, дійдемо до визначення значення $u^*(0)$, тобто до значення керувального впливу, необхідного в початковий момент часу. Саме це значення необхідно отримати в остаточному підсумку, позаяк воно відноситься до поточного моменту часу, а інші — до наступних кроків. Одночасно з визначенням значення $u^*(0)$ отримуємо і $S(0)$, тобто мінімальне значення критерію за оптимального керування. Весь процес розв'язання без ускладнень переноситься на об'єкт з рівнянням будь-якого порядку й з будь-яким числом керувальних впливів. Потрібно лише замінити скаляри x, u у формулі (13) векторами $x[], u[],$ а функцію f — вектор-функцією $f[]$.

Як підсумок вищевказаних міркувань можна сформулювати метод знаходження режиму найбільшої ефективності барабанної сушильної установки для штатного сталого режиму роботи у вигляді нумерованої послідовності дій.

1. Визначається витрата техвуглецю зі зрівняльної ємності в гранулятор таким чином, щоби підтримати її постійне завантаження на рівні 30 % з урахуванням вхідного потоку техвуглецю з хімічних реакторів.

2. Розраховується витрата водно-меласового розчину в гранулятор, щоб підтримати вологість гранул на вході в барабан на рівні 51 %.

3. Вибирається максимально доступна швидкість обертання сушильного барабана.

4. На основі модельних обчислень визначається сімейство фізично реалізованих траєкторій для певного барабана й заданої марки техвуглецю.

5. Вибирається кінцева точка фазової траєкторії, що відповідає вологості 0,75 % готового продукту на виході сушильного барабана. Цій точці ставиться у відповідність постійний рівень витрат, що відводиться на залишкове сушіння в зоні вивантаження, на охолодження й доставку пор-

ції продукту в бункер готової продукції. Обчислюється критерій відповідно до виразу (2)

$$Q_{40} = m_{bc} C_{bc}^T \cdot f_{\text{cost}}(0,75) - RE^5, \quad (14)$$

де RE^5 — витрати на охолодження й доставку порції в бункер готової продукції.

6. Обчислюється ціна переходу в певну точку з детермінованої множини точок фазової траєкторії на виході третьої стадії обробки за співвідношенням (3). Кожна точка характеризується своїм значенням вологості $\varphi_{3,i}$ продукту (точки K31 ... K3n на рис. 3).

7. Як тільки стає відома ціна переходу з кожної точки на виході третьої стадії обробки до четвертої, точкам ставиться у відповідність значення критерію

$$Q_{3j} = Q_{40} + m_{bc} C_{bc}^T \cdot f_{\text{cost}}(\varphi_{3,i}) - C_{3,jz}, \quad (15)$$

де $RE_{4,j0}$ — оцінка витрат, які відводяться на залишкове сушіння на четвертій стадії.

8. Проглядається попередній етап обробки. Формуються ділянки траєкторій, що з'єднують точки на виході другої ділянки із точками на виході третьої за умовою фізичної досяжності. Для кожної пари визначається ціна переходу по виразу (3).

9. Для кожної точки на виході другої стадії вибирається максимально можливе значення критерію для всіх траєкторій, які починаються з цієї точки,

$$Q_{2j} = \max \left(Q_{3z} + \left(m_{bc} C_{bc}^T \cdot f_{\text{cost}}(\varphi_{2,i}) - C_{2,jz} \right) \right), \quad (16)$$

де $\varphi_{2,i}$ — значення вологості на виході другої стадії для i -ї точки, Q_{3z} — знайдене максимальне значення критерію оптимальності для z -ї точки наступної стадії.

10. Повторюються пункти 7, 8 відповідно до першої стадії.

11. Після того, як найбільші можливі значення критерію ефективності поставлені у відповідність кожній вершині графа, можна побудувати оптимальну траєкторію, рухаючись від початкової точки до кінцевої до тих вершин, які мають найбільше значення критерію. Якщо можливий рух до декількох вершин з однаковим значенням критерію, варто вибрати той, який має найменшу ціну переходу.

12. Обчислюється показник ефективності всієї операції за залежністю (1) і заноситься в масив пам'яті.

13. Вибирається наступна швидкість обертання барабана в меншу сторону й здійснюється перехід до п. 4. Якщо пошук оптимальної траєкторії для всіх можливих швидкостей обертання здійснений, вибирається той режим роботи, що показує найбільшу ефективність за показником (1).

Обґрунтування необхідності використання інтелектуальних технологій

Наведений вище метод оптимізації базується на припущенні, що можна визначити фізичну реалізованість окремих ділянок траєкторії. Також прийнято, що можна обчислити витрати на проходження кожної окремої ділянки. Тарифи й обсяги вхідної сировини, енергоносіїв відомі. Складність полягає в тому, що напряму неможливо виміряти вологість продукту й масу на різних ділянках сушильного барабана, а отже і визначити вартість вхідного продукту для кожної стадії, а також ефективність проміжних стадій обробки.

У роботі [26] описано обчислювальну модель, що дозволяє отримати залежності вологості продукту по довжині барабана від комплексу факторів: марки техвуглецю й кінетичних характеристик випарювання вологи; потоку й температури сировини (техвуглець і водно-меласовий розчин) у гранулятор; швидкості обертання сушильного барабана; продуктивності і температури аксіального пальника й топкових пальників; температури й вологості повітря на розпил і горіння.

У роботі [17] описано модель мультиагентної системи, здатної виконувати функції апроксиматору багатомірних залежностей, що має властивість самонавчання й автоматичного визначення ступеня впливу кожного вхідного впливу на властивість вихідного продукту. Можна налаштувати екземпляри мультиагентної системи для ідентифікації вологості продукту на виході всіх стадій оброблення з обліком всіх діючих факторів. Через те, що архітектура мультиагентної системи дозволяє розв'язувати симетрично пряму й зворотну задачі автоматичного керування, стає можливим побудувати граф фазових траєкторій (рис. 3), поставити у відповідність дугам витрати енергоносіїв і кінцеву вологість.

Результати експериментів

Для перевірки адекватності запропонованого модельного подання про роботу сушильної установи й коректності методу знаходження максимуму ефективності проведена серія експериментів.

Предметом експериментального дослідження стали режими сушильного барабана БС-40, вбудованого в технологічну лінію, схему якої показана на рис. 2. У процесі роботи технологічної лінії сушіння техвуглецю в умовах реального підприємства з'ясовано, що кращими є режими підвищеної продуктивності (45...46 тон на добу). При цьому барабан є перевантаженим на 10...15 %, частота обертання становить 2,9 об/хв. Вологість вхідного продукту 52 %, вихідного — 0,25 %. Зазначимо, що випускається марка техвуглецю N550 з відповідною кінетичною діаграмою сушіння.

Параметри базового технологічного режиму: витрата газу/повітря в аксіальний пальник — 13/500 м³/год; температура газів аксіального пальника — 704,7 °С; витрата коксохімічної сировини/повітря в пальник першої зони — 0,18/6000 м³/год; температура полум'я пальника першої зони — 1105 °С; витрата коксохімічної сировини/повітря в пальник другої зони — 0,24/7000 м³/год; температура полум'я пальника другої зони — 1220 °С; витрата газу в пальники третьої зони — 12 м³/год; температура полум'я пальників третьої зони — 1094 °С; витрата пилоподібного технічного вуглецю в гранулятор — 3,78 т/год; витрата водно-меласового розчину в гранулятор — 4,0932 м³/год; температура вологого гранульованого техвуглецю — 91 °С; витрата сухого гранульованого технічного вуглецю на виході барабана — 3,78 т/год (3,68 мінус пил); температура сухого гранульованого техвуглецю на виході барабана — 186 °С; вологість гранульованого техвуглецю на виході барабана — 0,24 %; частота обертання сушильного барабана — 2,9 об/хв; витрата техвуглецю через систему аспірації — 0,1 т/год.

Далі наведемо тарифи на енергоносії, сировину та інші витрати: природний газ — 6,525 грн/м³; рідка коксохімічна сировина — 2200 грн/м³; стиснене повітря на горіння — 2,88 грн/м³; водно-меласовий розчин — 179,02 грн/м³; інші питомі витрати на обробку продукту — 4230,4 грн/т; постійні витрати на функціонування технологічної лінії — 8535 · 0,7 грн/год; пилоподібний технічний вуглець — 25000 грн/т; сухий гранульований техвуглець — 48700 грн/т; витрати на охолодження й доставку порції в бункер готової продукції — 800 грн/т.

Вартісна оцінка продукту (сировини) на проміжних стадіях визначається шляхом лінійної інтерполяції даних у табл. 1. Експерименти були виконані з використанням обчислювальної моделі [26], що дозволяє задати всі керувальні впливи й властивості сировини й отримати траєкторії зміни вологості разом з вартісними оцінками проміжних етапів. Результатом експерименту є набір можливих траєкторій, розбитих на ділянки з обчисленими вартісними оцінками витрат і результатів. Оптимальна фазова траєкторія повинна максимізувати й показник (1) і критерій (5).

У табл. 2 наведені окремі результати експериментального пошуку траєкторії й керувальних впливів, оптимізованих за критерієм (5). Для розрахунку загального показника ефективності прийнятий базовий час операції $T_1 = 2400$ с. Розглянуті варіанти відповідають постійній швидкості обертання барабана, за якої загальний час операції складе $T_{op} = 2421,6$ с.

Таблиця 2

Результати експериментального пошуку оптимальної фазової траєкторії

Номер операції	Етапи виконання операції	Режим роботи пальників, м ³ /ч	Вологість на початку/наприкінці стадії	Оцінка витрат	Оцінка результатів	Критерій, ·10 ³
1	1_1	g1_gf = 0,13/500 g2_gf = 0,23/9000 g3_gf = 13	52/46,62	7257	4133	-3,12
2	1_2		46,62/39,3	5580	5179	-0,401
3	2_1		39,3/20,52	7093	7261	0,168
4	2_2		20,52/1,61	9176	8482	-0,694
5	3_1		1,61/0,79	12450	12540	0,009
6	3_2		0,79/0,46	15240	12600	-2,64
7	4_1		0,46/0,24	13090	10240	-2,85
загальна			52/0,24	73300	74710	-9,45
1	1_1	g1_gf = 0,175/6800 g2_gf = 0,09/3800 g3_gf = 0,05	52/44,78	7440	4408	-3,03
2	1_2		44,78/33,96	6038	5860	-0,178
3	2_1		33,96/24,32	7303	6910	-0,393
4	2_2		24,32/11,77	8353	7935	-0,418
5	3_1		11,77/7,8	9343	8234	-1,11
6	3_2		7,8/1,93	9532	8450	-1,08
7	4_1		1,93/0,9	9114	10200	1,09
загальна			52/0,9	66060	74470	-5,13

Загальна оцінка ефективності за критерієм (5) для першого режиму роботи пальників — $9,45 \cdot 10^3$, для другого режиму — $5,13 \cdot 10^3$. Для порівняння, обчислюючи ефективності за показником (1) для

цих же режимів роботи, отримані значення $3,57 \cdot 10^{-4}$ і $1,41 \cdot 10^{-2}$, відповідно.

Виконується принцип відповідності — траєкторія з максимальним значенням суми ціни переходу по окремих складових забезпечує й максимум показника (1). Це доказ того, що метод забезпечує знаходження глобального максимуму ефективності.

Висновки

Розроблена модель продуктової системи багатостадійної потокової обробки сировини з можливістю ідентифікації ефективності поточного режиму. Ефективність розраховується за допомогою обґрунтованого показника (1), що комплексно враховує всі витрати на операцію, вартість вхідних і вихідних продуктів, час операції, кількісні і якісні вимоги до продукції. Обчислення виконуються з урахуванням фактичної витрати й вартості кожного енергоносія й ресурсу устаткування, які споживаються в ході технологічного процесу.

Підвищення рентабельності технологічного потоку засобами автоматичного керування прямо пов'язане зі знаходженням максимуму ефективності цього технологічного процесу. Процес знаходження глобального максимуму ефективності ускладнений більшою кількістю керувальних впливів і кількістю варіацій параметрів.

Застосування класичних методів оптимізації прямо неможливо, тому що показник (1) не має властивості адитивності й диференційованості. Тому запропоновано метод перетворення показника ефективності у форму критерію оптимального керування, що має властивості адитивності. Запропонований критерій дозволяє використати принцип оптимальності Беллмана й модифікований метод динамічного програмування для знаходження найефективнішого технологічного режиму.

У роботі запропонований модифікований метод динамічного програмування для пошуку фазової траєкторії переміщення продукту, що забезпечує максимум ефективності технологічної установки з урахуванням поточних тарифів і цін на продукти. Метод відрізняється таким:

- послідовно проглядаються варіанти з фіксованою продуктивністю транспортувальної системи й потоками вхідної сировини;
- дискретизація за часом проводиться з урахуванням кількості стадій обробки; дискретизація по осі енергетичного впливу на сировині виконується в межах допустимих керувальних впливів;
- обчислення критеріальної вартості дискретизованої ділянки траєкторії проводиться за допомогою мультиагентної системи, що апроксимує залежність вихідної вологості продукту від комплексного впливу всіх факторів, формованими керувальними впливами;
- після обчислення вартості кожної елементарної ділянки фазової траєкторії проводиться рішення статичного завдання динамічного програмування з максимізацією критерію;
- критерій оптимізації має вигляд суми складових, у якій вартісна оцінка продукту на виході стадії обробки має позитивний знак, а всі витрати, з вартістю вхідної сировини включно — негативний;
- за допомогою виведеної залежності виконується розрахунок коефіцієнта відповідності й здійснюється конвертація тимчасових витрат у вартісну на основі показника ефективності;
- з переглянутих варіантів, що відрізняються продуктивністю, вибирається той, котрий забезпечує найбільшу ефективність згідно з залежністю (1).

Все вищеперераховане дозволяє повністю визначити вектор керувальних впливів і сформувати стабільний технологічний режим, який забезпечує найбільшу можливу рентабельність і якість керування. Метод забезпечує корекцію режиму у разі зміни тарифів на енергоносії кожного виду, що актуально за ринкових коливань вартості енергії. Через те, що вартісну оцінку продукту й витрат на виході кожної стадії обробки вкрай складно визначити, пропонується використати технологію мультиагентних систем розробленої архітектури. Вона дозволяє ідентифікувати якісні показники продукту спрямованого впливу для кожної стадії уразі зміни керувань.

Експериментальні дослідження працездатності методу оптимізації за критерієм максимальної ефективності проведені для сушильної установки барабанного типу з різнопаливними пальниками й з урахуванням роботи допоміжного устаткування. Кінетична діаграма сушіння гранульованого продукту має нелінійний вигляд, що необхідно враховувати в моделях. Також у розглянутій технологічній установці є внутрішні зворотні зв'язки, які ускладнюють визначення складових критерію й аналіз ефективності. Настроєні за експериментальними даними екземпляри мультиагентної системи дозволили обчислити температуру й вологість продукту на виході кожної стадії обробки. У підсумку вдається визначити значення критерію оптимальності для кожної ділянки можливої фазової траєкторії й провести пошук оптимальної траєкторії модифікованим методом динамічного програмування.

Через симетричні властивості МАС стає можливим визначити керувальні впливи, що формують оптимальну фазову траєкторію обробки продукту й досягти максимуму ефективності. Отриманий результат пройшов успішну верифікацію показником ефективності (1) для всієї операції в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Gregory, A. Olivares, "Energy-optimal trajectory planning for the Pendubot and the Acrobot", *Optimal Control Applications and Methods*, no. 34(3), pp. 275-295, 2012. <https://doi.org/10.1002/oca.2020>.
- [2] J. Bing-Feng, B. Xiaolong, J. C. Ju, G. Yaozheng, "Design of Optimal Fast Scanning Trajectory for the Mechanical Scanner of Measurement Instruments," *Scanning*, no. 36 (2), pp. 185-193, 2013. doi: 10.1002/sca.21084.
- [3] A. Gasparetto, V. Zanotto, "Optimal trajectory planning for industrial robots," *Advances in Engineering Software*, no. 41 (4), pp. 548-556, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.11.001>.
- [4] H. Wang, Y. Tian, C. Vasseur, "Non-Affine Nonlinear Systems Adaptive Optimal Trajectory Tracking Controller Design and Application," *Studies in Informatics and Control*, no. 24 (1), pp. 05-12, 2015. <https://doi.org/10.24846/v24i1y201501>.
- [5] О. Н. Бурмистрова, С. А. Король, «Определение оптимальных скоростей движения лесовозных автопоездов из условия минимизации расхода топлива», *Лесной вестник*, № 1, с. 25-28, 2013.
- [6] I. Lutsenko, "Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, iss. 2 (74), pp. 35-40, 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.38963>.
- [7] I. Lutsenko, "Definition of efficiency indicator and study of its main function as an optimization criterion," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, issue 2 (84). pp. 24-32, 2016. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85453>.
- [8] Л. Г. Елкина, М. Е. Федотова, «Применение функционально-стоимостного анализа к ресурсосбережению», *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, том 8, № 1 (17), с. 115-120, 2006.
- [9] М. С. Кувшинов, Н. В. Киреева, «Анализ соответствия методов управления затратами актуальным задачам управления», *Экономический анализ: теория и практика*, № 17 (368), с. 37-46, 2014.
- [10] I. Konokh, I. Oksanych, N. Istomina, "Automatic Search Method of Efficiency Extremum for a Multi-stage Processing of Raw Materials," *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*, Springer, pp. 225-241, 2019.
- [11] В. С. Яременко, «Огляд наявних мультиагентних систем для задач інтелектуального аналізу даних», *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*, т. 29 (68), ч. 2, № 3, с. 47-55, 2018.
- [12] A. Fariz, J. Abouchabaka, N. Rafalia, "Using multi-agents systems in distributed data mining: a survey," *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, no. 73(3), pp. 427-440, 2015.
- [13] P. Pawlewski, et al., *Trends in practical applications of agents and multiagent systems*, Berlin: Springer, 2011. 729 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12433-4>.
- [14] E. Serrano, M. Rovatsos, J.A. Botia, "Data mining agent conversations: a qualitative approach to multiagent systems analysis," *Information Sciences*, no. 230, pp. 132-146, 2013.
- [15] O. Kazik, K. Peskova, M. Pilat, R. Neruda, "Meta learning in multi-agent systems for data mining," *Proceedings of the 2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, vol. 02. pp. 433-434, 2011.
- [16] D. Sharma, F. Shadabi, "Multi-agents based data mining for intelligent decision support systems," *Systems and Informatics (ICSAI)*, 2nd International Conference on IEEE, pp. 241-245, November, 2014.
- [17] И. С. Конох, «Представление образов динамических процессов в системах автоматического управления с помощью самонастраивающихся агентов», *Автоматизированные системы управления приборы автоматизации*, вып. 167, с. 29-38, 2014.
- [18] A. Salvador Palau, M. Dhada, K. Bakliwal, A. Parlikad, "An Industrial Multi Agent System for real-time distributed collaborative prognostics," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 85. pp. 590-606, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.07.013>.
- [19] F. L. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood, *Developing multi-agent systems with JADE*. John Wiley & Sons, 2007. Vol. 7.
- [20] Y. Chen, J. Lu, X. Yu, D. J. Hill, "Multi-agent systems with dynamical topologies: Consensus and applications," *IEEE circuits and systems magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 21-34, 2013.
- [21] M. Benedetti, V. Cesarotti, V. Introna, J. Serranti, "Energy consumption control automation using Artificial Neural Networks and adaptive algorithms: Proposal of a new methodology and case study," *Applied Energy*, vol. 165, pp. 60-71, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.066>
- [22] G. Sideratos, A. Ikonopoulou, N. D. Hatzigiorgiou, "A novel fuzzy-based ensemble model for load forecasting using hybrid deep neural networks", *Electric Power Systems Research*, vol. 178, 106025, 9 p., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106025>.
- [23] Zh. Quanmin, Zh. Weicun, Zh. Jianhua, S. Bei, "U-neural network-enhanced control of nonlinear dynamic systems," *Neurocomputing*, vol. 352, pp. 12-21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.04.008>.
- [24] И. С. Конох, Н. Н. Истомина, А. П. Оксанич, «Поиск оптимального закона управления процессами обработки сырья по критерию максимальной эффективности», *Radioelectronics & Informatics*, № 1 (84), с. 10-19, 2019.
- [25] R. E. Bellman, *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 2003, 401 p.
- [26] И. С. Конох, М. В. Самчишин, А. В. Копаевич, «Идентификация влажности гранулированного технического углерода в сушильном барабане для оптимизации управления по критерию максимальной эффективности», *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, вип. 5 (100), ч. 2, с. 25-34, 2016.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.12.2019

Конох Ігор Сергійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем;
Истоміна Наталія Миколаївна — старший викладач кафедри автоматизації та інформаційних систем,
 e-mail: nmistomina@gmail.com .

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

I. S. Konokh¹
N. M. Istomina¹

Efficiency Analysis and Optimization of Technological Modes of Drum Drying Stations

¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

Issues of technological systems modes optimization for streaming raw materials processing have a significant impact on the enterprises profitability in the chemical, food and metallurgical industries. At present, the task of moving from the profitability requirements to control actions remains actual. The task requires the development of specialized methods. Such methods should use an efficiency factor with evaluating of a technological operation results by a combination of cost estimates of the output product, costs and time. In the paper it is shown the structure of the channel system for raw materials processing should contain blocks for calculating the consumption costs of raw materials, resources and energy for the processing and transporting parts of the station and for calculating the overall efficiency factor. An example of a production line for drying a granular product in a drum furnace with zone and axial burners using different types of fuel is considered. The mutual influence of the line components on its productivity, quality and costs are taken into account. The non-linear form of the efficiency factors expression required modification for use in the dynamic programming method. For optimal mode searching we chose a dynamic programming method that determines the optimal phase trajectory with maximizes the additive criterion formulated for this method. Cost estimation of the trajectory sections was carried out using a computational model. The model describes the dynamic processes in the station. The search for optimal controls was carried out from the end of a possible trajectory to the beginning in a discretized space of phase coordinates. The phase coordinates are the position of the product portion inside the drum, the moisture content of the product; control variables: drum angular velocity, fuel consumption in each burner. A comparison of the efficiency factor values for the found optimal trajectory and efficiency factor values for trajectories with deviations showed the validity of the chosen approach.

Keywords: optimal control, efficiency, dynamic control.

Konokh Igor S. — Cand. Sc.(Eng.), Associate Professor of the Chair of Information and Control Systems;

Istomina Nataliia M. — Senior Lecturer of the Chair of Information and Control Systems, e-mail: nmistomina@gmail.com

И. С. Конох¹
Н. Н. Истомина¹

Анализ эффективности и оптимизация технологических режимов барабанных сушильных установок

¹Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

Вопросы оптимизации режимов для технологических систем потоковой переработки сырья имеют существенное влияние на рентабельность предприятий химической, пищевой и металлургической промышленности. На сегодня остается актуальной задача перехода от требований рентабельности к управляющим воздействиям, которая требует разработки специализированных методов. Такие методы должны использовать показатели эффективности, оценивающий результаты технологической операции по совокупности стоимостных оценок выходного продукта, затрат и времени. В работе показано, что структура канальной системы обработки сырья должна содержать блоки вычисления затрат на расход сырья, ресурса и энергии для обрабатываемой и транспортирующей частей установки и расчета общего показателя эффективности. Рассмотрен пример технологической линии сушки гранулируемого продукта в барабанной печи с зонными и аксиальными горелками, использующими различные виды топлива. Учитывается взаимовлияние компонент линии на ее производительность, качество и затраты. Для поиска оптимального режима был модифицирован метод динамического программирования, определяющий оптимальную фазовую траекторию, максимизирующую сформулированный для этого метода аддитивный критерий. Стоимостная оценка участков траектории выполнялась с помощью вычислительной модели, описывающей динамические процессы в установке. Поиск оптимальных управлений осуществлялся от конца возможной траектории к началу в дискретизированном пространстве фазовых координат. Фазовыми координатами являются положение порции продукта внутри барабана, влажность продукта; управляющими величинами: угловая скорость барабана, расход топлива в каждой горелке. Сравнение значений показателя эффективности для найденной оптимальной траектории и траекторий с отклонениями показал справедливость выбранного подхода.

Ключевые слова: оптимальное управление, эффективность, динамическое управление.

Конох Игорь Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и информационных систем;

Истомина Наталия Николаевна — старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем, e-mail: nmistomina@gmail.com