

УДК 622.788.36-52

Пазюк Михайло Юрійович, завідувач кафедри, доктор технічних наук

Овчинникова Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук

Ренгевич Олег Володимирович, доцент, кандидат технічних наук

Довгаль Володимир Володимирович, доцент, кандидат технічних наук

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГРУДКУВАННЯ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ У БАРАБАННИХ ГРУДКУВАЧАХ НА ОСНОВІ МЕТОДУ РОЗПІЗНАВАННЯ

Запорізька державна інженерна академія

Існуюча методика пошуку оптимального управління в алгоритмі розпізнавальної оптимізації, за наявності значної кількості параметрів, що впливають на процес, і незначного кроку їх змінювання, є неопкладною та малопродатною для практичної реалізації. Розробка удосконаленого алгоритму пошуку оптимального управління дає змогу значно підвищити оперативність прийняття вирішень.

Ключові слова: шихтовий матеріал, грудкування, барабанний грудкувач, алгоритм розпізнавальної оптимізації, оптимальне управління

Вступ. В алгоритмах управління технологічними процесами та, зокрема системи автоматичного управління (САУ) процесом грудкування шихтових матеріалів у барабанних грудкувачах, може бути використано метод статистичної розпізнавальної оптимізації [1-10]. Проте для ефективного застосування такого методу потрібно виконати детальний аналіз послідовності його функціонування. Це дозволить виявити наявні в нім процедурні недоліки, які можна усунути відповідним доопрацюванням алгоритму на передпроектній стадії розробки систем.

Як відомо, використання методу розпізнавальної оптимізації в системах управління технологічними процесами дає змогу реалізувати два режими роботи: навчання розпізнаванню та пошук оптимального управління. Суть першого режиму полягає у подаванні до управляльної оперативної пам'яті ЕОМ навчальної вибірки (інформації з датчиків, що встановлено на об'єкті). Навколо кожної точки вибірки в ознаковому просторі будують елементарний гіперпаралелепіпед, що можна описати предикативним рівнянням виду:

$$Z_j(\vec{X}) = \frac{1}{2^t} \prod_{i=1}^t \{1 + \text{sgn}[(x_i - x_{i\min})(x_{i\max} - x_i)]\}, \quad (1)$$

де t – розмірність факторного простору.

Якщо розпізнана технологічна ситуація належить гіперпаралелепіпеду $Z_j(\vec{X})$, то $Z_j(\vec{X}) = 1$, інакше – $Z_j(\vec{X}) = 0$. Об'єднуючи отримані елементарні підобласті $Z_j(\vec{X})$, можна одержати в просторі ознак образ Z_p , розділювальна функ-

ція якого зображує логічну суму предикативних рівнянь (1).

Кожній точці навчальної вибірки відповідатиме певне значення критерію управління процесом Y_j . Якщо весь діапазон одержаного змінювання значень критерію $Y_{\min} - Y_{\max}$ поділити на m рівних відрізків з кроком $\Delta Y = (Y_{\max} - Y_{\min})/m$, який дорівнює погрішності його вимірювання, то як результат для значення $Y_p = Y_{\min} + p \cdot \Delta Y$, за описаною вище методикою може бути сформовано образ, що складатиметься з логічної суми всіх гіперпаралелепіпедів, які входять до нього, а розділювальна функція матиме вигляд [11]:

$$Z_p(\vec{X}) = \bigcup_{j=1}^{R_p} Z_j(\vec{X}), \quad (2)$$

де R_p – кількість гіперпаралелепіпедів, що одержано на етапі навчання та входять у образ Z_p .

Як результат у просторі ознак буде створено m послідовно включених один в одного образів Z_p . Причому образу Z_1 відповідають такі комбінації дій управління та збурювальних дій, за яких значення критерію управління будуть найбільш ефективними. І відповідно із збільшенням об'єму образу така ефективність знижується. Етап навчання розпізнаванню полягає у розподілі факторного простору на образи, що не перетинаються, виходячи із значення критерію управління та синтезу розділювальної функції у вигляді логічної суми предикатів для кожного з них.

Для даного алгоритму оптимальне управління визначають у такій послідовності. Здійснюють вибирання всіх можливих комбінацій управління та зазначені комбінації по черзі підставляють до розділювальної функції образу Z_1 . Якщо у такому разі значення розділювальної

функції не стане дорівнювати одиниці, то зазначену процедуру повторюють для образу Z_2 і так далі, доки не буде одержано першу одиницю для якогось предикативного рівняння. Результат, управління, що забезпечує істинність такого предиката, і є оптимальним.

Очевидно, що така процедура пошуку є дуже громіздкою. А за збільшенням кількості чинників, які впливають на процес, а також за появи точніших приладів вимірювання його параметрів, непокладність алгоритму ще більше зростає. Це спричинює необхідність іншого підходу до пошуку оптимального управління.

Для зберігання математичної моделі об'єкту як суми предикативних рівнянь слід мати значний обсяг оперативної пам'яті. Якщо об'єкт описують значною кількістю параметрів, вибирання яких здійснюють з малим кроком, то може виникнути ситуація, коли об'єму оперативної пам'яті ЕОМ буде недостатньо. Для усунення такої ситуації потрібно мати алгоритм скорочення об'єму пам'яті. У роботі [12] запропоновано методику, що дозволяє мінімізувати опис образу, її алгоритм складається з двох частин: скорочення кількості підобластей, що описують образ, та їх кодування.

До основи алгоритму мінімізації кількості підобластей покладено ідею об'єднання межових гіперпаралелепіпедів. Якщо об'єднувати межові підобласті у напрямі однієї з ознакових осей, то одержані різнорозмірні гіперпаралелепіпеди також повністю описують образ, але одночасно більше ніж у два рази зменшиться кількість підобластей для його опису. Згідно з цим, умова об'єднання двох межових підобластей матиме вигляд

$$x_{i\min}^1 = x_{i\min}^2, \quad x_{i\max}^1 = x_{i\max}^2, \quad i = \overline{1, t}; \quad i \neq k, \quad (3)$$

де $x_{i\min}^1, x_{i\max}^1, x_{i\min}^2, x_{i\max}^2$ – параметри межових гіперпаралелепіпедів, що описуються предикативним рівнянням (1); k – номер ознакової осі, вздовж якої відбувається об'єднання.

Значення k -ознаку результуючої підобласті знаходять з умов:

$$x_{k\min}^{12} = \min[x_{k\min}^1, x_{k\min}^2]; \quad (4)$$

$$x_{k\max}^{12} = \max[x_{k\max}^1, x_{k\max}^2]. \quad (5)$$

Здійснюючи аналогічно укрупнення підобластей для всіх напрямів ознакової області, синтезують t розділювальні функції, що описують образ Z :

$$Z_i^\Sigma = \bigcup_{j=1}^{m_i} Z_j(\bar{X}, \bar{X}_{j\min}, \bar{X}_{j\max}); \quad i = \overline{1, t}. \quad (6)$$

Вибирають функцію, яка є мінімальною щодо кількості m_i підобластей

$$Z_{\min} = \min[Z_i^\Sigma(\bar{X}, m), \quad i = \overline{1, t}]. \quad (7)$$

Кодування підобластей виконують таким чином [13,14]. Всі проекції ознакового простору поділяють на рівні відрізки x_i , кожний з яких нумерують у напрямі збільшення відповідної ознаки. Як результат елементарну підобласть можна подати номерами відповідних інтервалів факторного простору. Зазначені номери утворюють t -мірний вектор, який згортають до скаляра за формулою

$$B = \sum_{i=1}^n a_i \cdot g^{(n-1)}, \quad (8)$$

де a_i – номер i -го інтервалу; g – основа системи числення, яку вибирають так, щоб виконувалася умова:

$$g > \max(a_i) + 1. \quad (9)$$

Підобласті, що укрупнюються, можна зобразити $2t$ -мірним вектором \vec{A} ($a_{1\min}, a_{2\min}, \dots, a_{t\min}, a_{1\max}, a_{2\max}, \dots, a_{t\max}$, де $a_{1\min}, \dots, a_{t\min}, a_{1\max}, \dots, a_{t\max}$ – номери інтервалів, що описують мінімальні та максимальні межі підобластей, які збільшуються. Проте за значної розмірності факторного простору збільшені підобласті доцільно описувати двома векторами:

$$\vec{A}_1(a_{1\min}, a_{2\min}, \dots, a_{t\min}); \quad (10)$$

$$\vec{A}_2(a_{1\max}, a_{2\max}, \dots, a_{t\max}). \quad (11)$$

Виконуючи кодування всіх підобластей мінімізованої розділювальної функції образу Z_{\min} , його опис можна подати у вигляді логічної суми одномірних кодувальних чисел (чи двомірних векторів):

$$Z_{\min} = \bigcup_{j=1}^{m_i} B. \quad (12)$$

Тоді об'єм оперативної пам'яті, що необхідно для зберігання образу Z_{\min} , скоротиться в $2t/\ell$ або t/ℓ разів, де ℓ – розмірність числа (чи вектора) B . Перехід від кодувального числа B до вектора $\vec{A}(a_1, a_2, \dots, a_t)$ здійснюють за формулою:

$$a_i = \text{mod} \left[\frac{B - \sum_{j=1}^{i-1} a_j \cdot g^{(n-1)}}{g^{(n-1)}} \right], \quad (13)$$

де $\text{mod} [\dots]$ – операція взяття цілої частини від числа в дужках.

Для переходу від номерів інтервалів факторного простору до фізичної розмірності використовують співвідношення:

$$x_{i\min} = (a_{i\min} - 1) \cdot \Delta x_i + x_i^{\min}; \quad (14)$$

$$x_{i\max} = a_{i\min} \cdot \Delta x_i + x_i^{\min}, \quad (15)$$

де x_i^{\min} – мінімальне значення i -го чинника.

Ефективність застосування такого методу в САУ процесу грудкування шихтових матеріалів, зважаючи на його нестационарність, також визначається можливістю адаптації образів у процесі розпізнавання. У роботі [15] запропоновано алгоритм, що реалізує таку процедуру. Розділювальна функція уточненого образу має вигляд:

$$Z_p(\bar{X}) = \left[\bigcup_{j_1=1}^{R_p+L_1} Z_{L_1}(\bar{X}) \right] \cap \left[\bigcup_{j_2=1}^{L_2} Z_{L_2}(\bar{X}) \right], \quad (16)$$

де R_p – кількість елементарних паралелепіпедів, що описують образ до адаптації; L_1, L_2 – кількість протиріч першого та другого роду, одержаних як результат розпізнавання.

Після вивчення розпізнавання та скорочення розділювальної функції образу $Z_p(p=1, m)$ до L_1 доданків здійснюють пошук оптимального управління в образі Z_p . За появи протиріччя першого роду (ситуація \bar{X} належить образу, але не розпізнається як така, що йому належить) визначають параметри $\bar{X}_{j_1}^{\min}$ і $\bar{X}_{j_1}^{\max}$ ($j_1 = \overline{1, L_1 + R_p}$) і розділювальна функція образу Z_p поповнюється новими гіперпаралелепіпедами Z_μ ($\mu = \overline{1, L_1}$). За появи протиріччя другого роду (ситуація \bar{X} не належить образу, але розпізнається як така, що належить йому) визначають параметри $\bar{X}_{j_1}^{\min}$ і $\bar{X}_{j_1}^{\max}$ ($j_1 = \overline{1, L_1 + R_p}$) та виключають з образу Z_p підобласть Z_{j_2} ($j_2 = \overline{1, L_2}$). Розширення інформації, що вводять, здійснюють доти, доки сума $R_p + L_1 + L_2$ не досягне заданого значення. Після цього виконують процедуру мінімізації опису образу $Z_p(p=1, m)$.

Представляється доцільним розділити пошук оптимального управління на два етапи: спочатку знаходити образ, для якого може бути забезпечена істинність предикативного рівняння (1), а далі, починаючи з цього образу, виконувати вибирання можливих комбінацій параметрів управління для пошуку оптимального з них. Для реалізації такого підходу для кожного образу $Z_p(p = \overline{1, m})$ визначають можливі мінімальні та максимальні значення параметрів збурювання \bar{X}_{2p}^{\min} і \bar{X}_{2p}^{\max} ($p = \overline{1, m}$). За отримання інформації про поточні значення збурень \bar{X}_2^{mex} виконують перевірку на попадання таких значень у діапазон $\bar{X}_{21}^{\min} - \bar{X}_{21}^{\max}$ для образу Z_1 . За негативним резуль-

татом вказану перевірку виконують для образу Z_2 і так далі, доки значення \bar{X}_2^{mex} не ввійде до діапазону змінювання $\bar{X}_{2p}^{\min} - \bar{X}_{2p}^{\max}$ образу Z_p . Така методика дозволяє точно визначити образ, починаючи з якого доцільно здійснювати вибирання параметрів управління для пошуку оптимальної комбінації.

За аналогією з діапазоном змінювання параметрів збурення $\bar{X}_{2p}^{\min} - \bar{X}_{2p}^{\max}$, який характеризує образ $Z_p(p = \overline{1, m})$, можна визначити діапазон змінювання параметрів управління $\bar{X}_{1p}^{\min} - \bar{X}_{1p}^{\max}$, який відповідає предикату Z_p . Тоді для знаходження оптимального вирішення достатньо використовувати тільки комбінації параметрів управління, що входять до діапазону $\bar{X}_{11}^{\min} - \bar{X}_{11}^{\max}$.

Межові значення параметрів p -ої області $\bar{X}_{1p}^{\min}, \bar{X}_{1p}^{\max}, \bar{X}_{2p}^{\min}, \bar{X}_{2p}^{\max}$ найдоцільніше визначити на етапі кодування підобластей. Як відомо, після мінімізації кількості підобластей і переходу до їх описування у вигляді елементарних паралелепіпедів, кожна подібність образу може бути записана у вигляді векторів:

$$\bar{A}_1^j(a_{1\min}^j, a_{2\min}^j, \dots, a_{t\min}^j); \quad (17)$$

$$\bar{A}_2^j(a_{1\max}^j, a_{2\max}^j, \dots, a_{t\max}^j). \quad (18)$$

Очевидно, що межові точки p -го образу можуть бути знайдені таким чином:

$$c_1^{\min} = \min[a_{1\min}^j]; \quad (19)$$

$$c_i^{\min} = \min[a_{i\min}^j]; \quad (20)$$

$$c_1^{\max} = \max[a_{1\max}^j]; \quad (21)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$c_1^{\max} = \max[a_{1\max}^j], \quad j = \overline{1, R_p}. \quad (22)$$

Як результат одержують два вектори, які однозначно описують межі p -го образу:

$$\bar{C}_1 = (c_1^{\min}, c_2^{\min}, \dots, c_t^{\min}); \quad (23)$$

$$\bar{C}_2 = (c_1^{\max}, c_2^{\max}, \dots, c_t^{\max}). \quad (24)$$

Зазначені вектори згортають до скаляра. Отже, межі кожного образу для факторного простору описують двома кодувальними числами. Перехід від кодувальних чисел до фізичної розмірності факторного простору може бути здійснено аналогічно відомому кодуванню підобластей образу.

Реалізацію дворівневої системи управління процесом грудкування шихтових матеріалів, що засновано на використанні методу розпізнаваль-

ної оптимізації, потребує наявності математичної моделі такого процесу як логічної суми предикативних рівнянь, що однозначно визначатиме область функціонування об'єкту в ознаково-

му просторі. Будь-яка технологічна операція, що виникає на досліджуваному об'єкті, може бути описана рівнянням:

$$Z_{p\ell}(\vec{X}) = \frac{1}{64} \left\langle 1 + \operatorname{sgn}[(W^{pj} - W_{\min}^{pj})(W_{\max}^{pj} - W^{pj})] \right\rangle \cdot \left\langle 1 + \operatorname{sgn}[(n^{pj} - n_{\min}^{pj})(n_{\max}^{pj} - n^{pj})] \right\rangle \cdot \left\langle 1 + \operatorname{sgn}[(\alpha^{pj} - \alpha_{\min}^{pj})(\alpha_{\max}^{pj} - \alpha^{pj})] \right\rangle \cdot \left\langle 1 + \operatorname{sgn}[(M_{-3}^{pj} - M_{-3\min}^{pj})(M_{-3\min}^{pj} - M_{-3}^{pj})] \right\rangle \cdot \left\langle 1 + \operatorname{sgn}[(M_{3...10}^{pj} - M_{3...10\min}^{pj})(M_{3...10\min}^{pj} - M_{3...10}^{pj})] \right\rangle \cdot \left\langle 1 + \operatorname{sgn}[(M_{+10}^{pj} - M_{+10\min}^{pj})(M_{+10\min}^{pj} - M_{+10}^{pj})] \right\rangle. \quad (25)$$

Тоді математична модель процесу грудкування шихтових матеріалів матиме вигляд:

$$Z = \bigcup_{p=1}^m \bigcup_{j=1}^{R_p} Z_{p\ell}(W_{\min}^{pj}, W_{\max}^{pj}, n_{\min}^{pj}, n_{\max}^{pj}, \alpha_{\min}^{pj}, \alpha_{\max}^{pj}, M_{-3\min}^{pj}, M_{-3\max}^{pj}, M_{3...10\min}^{pj}, M_{3...10\max}^{pj}, M_{+10\min}^{pj}, M_{+10\max}^{pj}), \quad (26)$$

де m – кількість класів технологічної ситуації; $W_{\min}^{pj}, W_{\max}^{pj}, \dots, M_{+10\min}^{pj}, M_{+10\max}^{pj}$ – значення технологічних параметрів об'єкту, що характеризують j -у подібність p -го класу.

Очевидно, що для реалізації алгоритму управління процесом грудкування, заснованого на використанні моделі (25) необхідно виконати ідентифікацію параметрів $m, R_p, W_{\min}^{pj}, W_{\max}^{pj}, \dots, M_{+10\min}^{pj}, M_{+10\max}^{pj}$, а окрім того знайти область визначення самої моделі. Діапазон регулювання параметрів управління W, n і α , визначено в роботі [16]: $7,5 \leq W \leq 9$ (%); $6 \leq n \leq 9$ (хв⁻¹); $0 \leq \alpha \leq 2$ (град).

Область змінювання збурень (початкового фракційного складу шихти) у загальному випадку може бути подано як [17,18]:

$$\min(M_{-3\min}^{pj}) \leq M_{-3} \leq \max(M_{-3\max}^{pj}); \quad (27)$$

$$\min(M_{3...10\min}^{pj}) \leq M_{3...10} \leq \max(M_{3...10\max}^{pj}); \quad (28)$$

$$\min(M_{+10\min}^{pj}) \leq M_{+10} \leq \max(M_{+10\max}^{pj}). \quad (29)$$

Для визначення діапазону коливань випадкових величин $M_{-3}, M_{3...10}, M_{+10}$ використовують статистичну оцінку параметрів розподілу – довірчий інтервал. Відомо, що довірчий інтервал за відомим значенням дисперсії випадкової величини σ_{M_i} , обчислюють за формулою [19]:

$$|\bar{M} - \varepsilon; \bar{M} + \varepsilon|, \quad (30)$$

де \bar{M}_i – математичне очікування випадкової величини; $\varepsilon = N_{0,5\beta} \cdot \sigma_{M_i} / s^{0,5}$, ε – межева погрішність; $N_{0,5\beta}$ – квантиль стандартизованого нормального розподілу; s – кількість елементів вибірки.

У табл. 1 наведено результати обчислень межової погрішності випадкових величин.

Таким чином, випадкові величини $M_{-3}, M_{3...10}, M_{+10}$ з ймовірністю 0,95 потрапляють у нижче наведені інтервали:

$$69,62 \leq M_{-3} \leq 78,58 \text{ (%);}$$

$$15,12 \leq M_{3...10} \leq 20,28 \text{ (%);} \quad (31)$$

$$5,84 \leq M_{+10} \leq 10,44 \text{ (%).}$$

Таблиця 1 – Результати розрахунків межової погрішності випадкових величин

M_i	\bar{M}_i	σ_{M_i}	β	$N_{0,5\beta}$	ε
M_{-3}	74,10	4,60	0,95	3,37	4,48
$M_{3...10}$	17,70	2,65	0,95	3,37	2,58
M_{+10}	8,14	2,37	0,95	3,37	2,30

Таким чином, випадкові величини $M_{-3}, M_{3...10}, M_{+10}$ з ймовірністю 0,95 потрапляють у нижче наведені інтервали:

$$69,62 \leq M_{-3} \leq 78,58 \text{ (%);}$$

$$15,12 \leq M_{3...10} \leq 20,28 \text{ (%);} \quad (31)$$

$$5,84 \leq M_{+10} \leq 10,44 \text{ (%).}$$

Ідентифікація параметрів логіко-предикативної моделі процесу грудкування шихтових матеріалів полягає у наступному [20]. За момен-тами навчальної вибірки ($W^1, n^1, \alpha^1, M_{-3}^1, M_{3...10}^1, M_{+10}^1$), ($W^j, n^j, \alpha^j, M_{-3}^j, M_{3...10}^j, M_{+10}^j$), ($W^s, n^s, \alpha^s, M_{-3}^s, M_{3...10}^s, M_{+10}^s$) у режимі навчання формують предикативні рівняння, параметри яких можна визначити таким чином: $W_{\min}^j(W_{\max}^j) = W^j - (+)\Delta W$; $n_{\min}^j(n_{\max}^j) = n^j - (+)\Delta n$; $\alpha_{\min}^j(\alpha_{\max}^j) = \alpha^j - (+)\Delta \alpha$;

$$M_{-3\min}^j(M_{-3\max}^j) = M_{-3}^j - (+)\Delta M$$

$$M_{3...10\min}^j(M_{3...10\max}^j) = M_{3...10}^j - (+)\Delta M$$

$$M_{+10\min}^j(M_{+10\max}^j) = M_{+10}^j - (+)\Delta M$$

де ΔM – погрішність пристроїв, що вимірюють гранулометричний склад шихтових матеріалів.

Значення параметрів Δn і $\Delta \alpha$ вибирають виходячи з дискретності їх регулювання (для умов барабанного грудкувача агломераційної фабрики ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»: $\Delta n = 0,5$ хв⁻¹; $\Delta \alpha = 0,5$ град). Значення ΔW вибирають виходячи з погрішності приладів, що вимірюють вологість шихти. Погрішність вимірювання сучасних СВЧ-вологомірів є малою і

складає не більше 0,25 % [21,22]. Тому вибирають $\Delta W = 0,25\%$.

Розподіл одержаних предикативних рівнянь на m класів виконують шляхом ділення діапазону можливих значень критерію управління $M'_{3...10\min} - M'_{3...10\max}$ на рівні відрізки з кроком ΔM . Тоді j -й предикат потрапляє до p -го класу за виконання умови:

$$M'_{3...10\min} + (p+1) \cdot \Delta M \geq (M'_{3...10})^j \geq M'_{3...10\min} + p \cdot \Delta M, \quad p = \overline{1, m}. \quad (32)$$

Обчислювальні дослідження, що виконано на математичній моделі процесу грудкування шихтових матеріалів за відомих обмежень на управління та розрахований діапазон коливань збурень, показали, що величина критерію управління $M'_{3...10}$ знаходиться в інтервалі: $16 \leq M'_{3...10} \leq 44\%$.

Таблиця 2 – Фрагмент навчальної вибірки

M_3	$M_{3...10}$	M_{+10}	W	n	α	$M'_{3...10}$	Клас
73,2	18,6	8,2	8,0	8,5	0	43,0	1
75,4	17,8	6,8	8,0	8,5	0	43,6	1
75,8	17,7	6,5	8,0	8,5	0	43,7	Ситуація розпізнана
71,3	19,3	9,4	8,2	8,5	0	42,8	1
76,7	16,6	6,7	8,2	8,5	0	43,6	Ситуація розпізнана
77,1	15,9	9,3	8,5	8,5	0	42,4	1
72,5	18,3	8,0	8,5	8,5	0	42,9	1
74,3	17,7	7,2	8,5	8,5	0	43,3	Ситуація розпізнана
74,7	18,2	7,1	8,5	8,5	0	43,3	Ситуація розпізнана
76,5	16,1	7,4	8,8	8,5	0	42,1	1
75,8	18,3	5,9	8,8	8,5	0	43,1	Ситуація розпізнана
73,2	17,7	9,1	9,0	8,5	0	40,1	2
74,4	18,2	7,4	9,0	8,5	0	40,9	2
72,2	17,8	10,0	7,5	9,0	0	41,0	Ситуація розпізнана

Таблиця 3 – Вплив ΔM на загальну кількість

предикат $\sum_{p=1}^m \lambda_p$

ΔM	1	2	3	4	5	6
$\sum_{p=1}^m \lambda_p$	4672	3426	2520	1783	1142	860

Таблиця 4 – Вплив погрішності вимірювання гранулометричного складу ΔM на кількість класів m логіко-предикативної моделі

ΔM	1	2	3	4	5	6
m	24	12	8	6	5	4

Розробка нижнього рівня системи управління процесом грудкування не спричинює суттєвих складнощів.

Нині вже накопичено об'єм інформації, що потрібно для синтезу верхнього рівня системи управління (рис. 1).

У табл. 2 наведено фрагмент навчальної вибірки за $\Delta M = 3\%$, в табл. 3 і 4 подано результати досліджень впливу значень ΔM на кількість синтезованих класів m , а також на загальну кількість предикативних рівнянь $\sum_{p=1}^m \lambda_p$, що описують барабанний грудкувач у чинниковому просторі відповідно.

Для синтезу системи управління процесом грудкування шихтових матеріалів найбільш підходить її дворівнева структура [23], де на верхньому рівні, за відомих поточних значень дій збурювання, визначають оптимальну комбінацію управлінь, а на нижньому рівні таке управління реалізують і підтримують до моменту визначення наступного оптимального управління.

Робота блоків верхнього рівня системи, реалізованої на використанні методу розпізнавальної оптимізації, здійснюється у такій послідовності. Блок збирання й обробки інформації 1 за допомогою відповідних технічних (датчики та пристрої контролю технологічних параметрів) і програмних засобів забезпечує збирання даних, що характеризують стан процесу. Блок вибирання режиму роботи системи 3 дозволяє реалізувати два режими: навчання й управління. На етапі навчання інформація про збурення \bar{X}_2 , управляльні дії \bar{X}_1 , і значення критерію управління Y поступають у блок навчання 2, який здійснює синтез розділювальних функцій класів у вигляді логічної суми предикативних рівнянь.

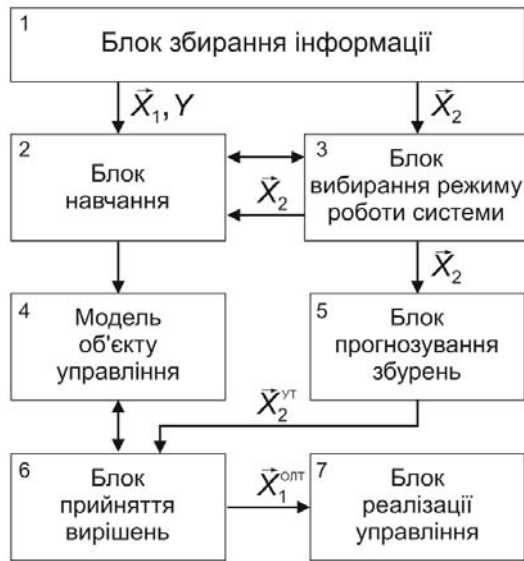


Рисунок 1 – Інформаційна структура верхнього рівня САУ процесом грудкування

Сукупність одержаних розділювальних функцій утворює логіко-предикативну модель об'єкту управління 4. Після завершення формування моделі блок навчання подає сигнал на блок 3 про перехід системи на режим управління. Тепер інформація про збурення \bar{X}_2 поступає на блок прогнозування збурювальних дій 5, який видає очікуване значення збурень за їх відомим поточним і попереднім значенням. Така інформація поступає у блок ухвалення вирішень 6, де і здійснюється вибирання оптимального управління, значення якого подають на нижній рівень системи управління 7 для безпосередньої реалізації.

Взаємодія програм, що реалізують розроблений верхній рівень, здійснюється згідно такої послідовності (рис. 2). Підпрограма навчання 2, завдяки використанню підпрограми зв'язку із зовнішніми пристроями 1, отримує необхідні дані (навчальну вибірку) для синтезу математичної моделі процесу як суму предикативних рівнянь. Така модель прямує через підпрограму 4, яка здійснює мінімізацію опису образів. Скорочені розділювальні функції образів поступають до підпрограми кодування та визначення межових точок образів 6, де опис підобластей кодується і згортається до скаляра.

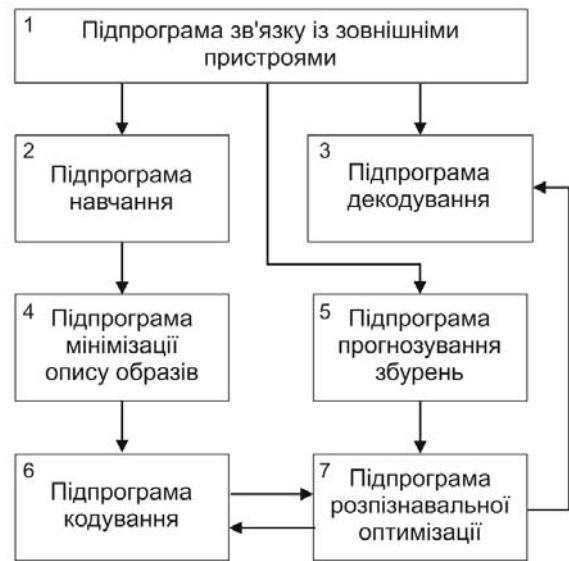


Рисунок 2 – Структура програмних засобів САУ процесом грудкування

У цій же підпрограмі обчислюють значення межових точок кожного образу, що потрібно для реалізації алгоритму скорочення пошуку оптимального управління. Через модуль 1 до підпрограми прогнозування дій збурювання 5 прямує інформація про поточні значення збурень, за якими обчислюють очікувані значення збурень, які потім направляють до підпрограми розпізнавальної оптимізації 7, де і визначається значення оптимального управління. Таке значення прямує до підпрограми декодування 3, а звідти – у вигляді реальних фізичних величин до підпрограми зв'язку із зовнішніми пристроями 1.

Висновки. Виконано розробку удосконаленого алгоритму пошуку оптимального управління на основі методу розпізнавання. Застосування обчислювального експерименту на імітаційній моделі процесу грудкування шихтових матеріалів у барабанному грудкувачеві, що розроблено у роботі [24] із застосуванням синтезованого програмного забезпечення, дозволяє оцінити ефективність функціонування розробленої дворівневої системи управління та її практичну реалізованість.

Бібліографічний перелік

1. **Барабаш, Ю. Л.** Вопросы статистической теории распознавания [Текст] / Ю. Л. Барабаш, Б. В. Вапский, В. Т. Зиновьев. – М. : Советское радио, 1967. – 399 с.
2. **Вапник, В. Н.** Теория распознавания образов [Текст] / В. Н. Вапник, А. Я. Червоненкис. – М. : Наука, 1974. – 416 с.
3. **Васильев, В. И.** Распознающие системы [Текст] / В. И. Васильев. – Справочник. – 2-е изд. – Киев : Наукова думка, 1983. – 424 с.

4. **Горелик, А. Л.** Методы распознавания [Текст] / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – 4-е изд. – М. : Высшая школа, 2004. – 262 с.
5. **Фомин, Я. А.** Статистическая теория распознавания образов [Текст] / Я. А. Фомин, Г. Р. Тарловский. – М. : Радио и связь, 1986. – 624 с.
6. **Чэн, Ш.-К.** Принципы проектирования систем визуальной информации [Текст] / Ш.-К. Чэн. – М. : Мир, 1994. – 408 с.
7. **Lvov, G.** Recognition of a dynamic object and prediction of quantitative characteristics in the class of logical functions / [Text] G. Lvov, V. Berikov // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1997. – Vol. 7, No. 4. – Pp. 407-413.
8. **Форсайт, Д. А.** Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Д. А. Форсайт, Д. Понс. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с. – ISBN 0-13-085198-1.
9. **Шапиро, Д.** Компьютерное зрение [Текст] / Д. Шапиро, Дж. Стокман. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с. – ISBN 5-947-74384-1.
10. **Фомин, Я. А.** Распознавание образов : теория и применения [Текст] / Я. А. Фомин. – 2-е изд. – М. : ФАЗИС, 2012. – 429 с. – ISBN 978-5-7036-0130-4.
11. **Пазюк, М. Ю.** Аналіз стану управління процесом грудкування шихтових матеріалів у барабанних грудкувачах [Текст] / М. Ю. Пазюк, І. А. Овчиннікова, О. В. Ренгевич // Металургія : Наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. – Вип. (1) 37. – С. 5-10.
12. **Качан, Ю. Г.** Алгоритм сокращения описания образов в задачах распознавания производственных ситуаций [Текст] / Ю. Г. Качан, Н. М. Трипутень. – Днепропетр. горн. ин-т. – Киев, 1985. – 10 с. – Деп. в УкрНИИТИ 05.02.1985 г., № 235. – Ук-Д85.
13. **Качан, Ю. Г.** Минимизация описания образов в задачах распознавания производственных ситуаций [Текст] / Ю. Г. Качан, Н. М. Трипутень // Известия вузов. Горный журнал. – 1986. – № 7. – С. 119-122.
14. **Трипутень, Н. М.** Кодирование разноразмерных подобластей при реализации алгоритма распознающей статической оптимизации [Текст] / Н. М. Трипутень, Ю. Г. Качан. – Днепропетровск, 1985. – 8 с. – Деп. в УкрНИИТИ 12.03.1085 г., № 1151. – Ук-Д85.
15. **Качан, Ю. Г.** Адаптация образа в алгоритме распознавания производственных ситуаций [Текст] / Ю. Г. Качан // Механизация и автоматизация. – 1984. – № 1. – С. 15-17.
16. **Пазюк, М. Ю.** К управлению процессом окомкования шихтовых материалов [Текст] / М. Ю. Пазюк, И. А. Овчинникова, О. В. Ренгевич, В. В. Довгаль // Материалы XXIII научно-техн. конф. ЗГИА. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2018. – Т. 1. – С. 48.
17. **Гранковский, В. И.** Управление агломерационным процессом [Текст] / В. И. Гранковский, М. Ю. Пазюк, В. А. Сыромьяский. – Киев : Техника, 1988. – 145 с.
18. **Пазюк, М. Ю.** Контроль гранулометрического состава окомкованной шихты [Текст] / М. Ю. Пазюк, А. Н. Николаенко, В. И. Гранковский, В. М. Насонов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 12. – С. 4-6.
19. **Микулик, Н. А.** Решение технических задач по теории вероятности и математической статистике [Текст] / Н. А. Микулик, Г. Н. Рейзина. – Справочное пособие. – Минск : Высшая школа, 1991. – 164 с.
20. **Цыпкин, Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах [Текст] / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1968. – 399 с.
21. **Бензарь, В. К.** Техника СВЧ-влажнометрии [Текст] / В. К. Бензарь. – Минск : Высшая школа, 1974. – 352 с.
22. **Bohl, A. H.** Linear feedback time optimal control I. The servo problem [Text] / A. H. Bohl, T. J. Avory // Eng. Chem. Process. Des. Develop. – 1976. – Vol. 15, No. 1. – P. 24-30.
23. **Ренгевич, О. В.** Розробка імітаційної моделі й оцінка практичної реалізованості САУ процесом грудкування шихтових матеріалів у барабанних грудкувачах [Текст] / О. В. Ренгевич, І. А. Овчиннікова, С. О. Шумікін // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. – Вип. (2) 38. – С. 5-13.
24. **Пазюк, М. Ю.** Ідентифікація збурювальних дій процесу грудкування шихтових залізородних матеріалів у барабанних грудкувачах і розробка їх цифрових моделей [Текст] / М. Ю. Пазюк, І. А. Овчиннікова, О. В. Ренгевич, В. В. Довгаль // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. – Вип. (1) 39. – С. 26-33.

Пазюк Михаил Юрьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: kafedra_autp@ukr.net

Овчинникова Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: iaov@ Rambler.ru

Ренгевич Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: oren72@mail.ru

Довгаль Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: ur4qqj@ukr.net

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОКОМКОВАНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННЫХ ОКОМКОВАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАСПОЗНАВАНИЯ

Существующая методика поиска оптимального управления в алгоритме распознающей оптимизации при наличии большого количества параметров, оказывающих влияние на процесс, и незначительном шаге их изменения становится громоздкой и малоприменимой для практической реализации. Разработка усовершенствованного алгоритма поиска оптимального управления позволяет значительно повысить оперативность принятия решений.

Ключевые слова: шихтовый материал, окомкование, барабанный окомкователь, алгоритм распознающей оптимизации, оптимальное управление

Pazyuk Michael, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of the Automated Control by the Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: kafedra_autp@ukr.net

Ovchinnikova Irene, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of the Automated Control by the Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: iaov@rambler.ru

Rengevich Oleg, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of the Automated Control by the Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: oren72@mail.ru

Dovgal' Vladimir, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of the Automated Control by the Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: ur4qqj@ukr.net

DEVELOPMENT OF ALGORITHM AND MODEL OF CONTROL SYSTEM IN PELLETIZING PROCESS OF CHARGE MATERIALS IN DRUM PELLETIZERS ON THE BASIS OF RECOGNITION METHOD

Current method of optimal control search in the algorithm of recognizing optimization, at presence of bundle of parameters, having influence on a process, and little step of their change, becomes bulky and of little use for practical realization. Development of the improved algorithm of optimal control search allows to promote considerably the timeliness of making decision.

Keywords: charge material, pelletizing, drum pelletizer, algorithm of recognizing optimization, optimal control

Стаття надійшла до редакції 10.07.2018 р.
Рецензент, проф. А.М. Ніколаєнко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>