

**МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ
БРОДІННЯ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
АЛГОРИТМУ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ****Н. П. Порплиця, І. В. Гураль, М. П. Дивак***Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна*

Проведено детальний аналіз методу структурної ідентифікації математичних моделей, побудованого на основі поведінкових моделей бджолиної колонії. Удосконалено спосіб реалізації деяких операторів цього методу, що дало змогу підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації. Встановлено, що реалізація фази активності бджіл-дослідників із застосуванням саме квадратичної залежності (кількості згенерованих на основі поточної структури інтервальної дискретної динамічної моделі "структур-нащадків" від значення функції мети), дає змогу знизити обчислювальну складність застосування відомого методу структурної ідентифікації.

Ключові слова: структурна ідентифікація, алгоритм бджолиної колонії, інтервальна дискретна динамічна модель, бродіння, біогазова установка.

Вступ. Сьогодні однією з актуальних проблем людства є нагромадження твердих побутових органічних відходів. Тому для її вирішення проводять утилізацію останніх за допомогою біогазових установок. З одного боку – це дає змогу розв'язати низку екологічних проблем суспільства, а з іншого – отримати високоефективні органічні добрива та енергію у вигляді метану (Vodnar, 2013).

У біогазових установках відбуваються складні тепло- та масообмінні процеси на різних стадіях метанового бродіння (Gerber, & Span, 2008; Gural, & Dyvak, 2014). Однак під час експлуатації біогазових установок часто виникають проблеми недотримання технологічних вимог, через які не дотримується і баланс продуктів на кожній стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння.

За таких умов актуальною є задача побудови моделей на різних стадіях такого бродіння в біогазовій установці. Побудова зазначеного класу моделей забезпечить можливість підбору оптимальних технологічних чинників процесу бродіння.

У праці (Gural, & Porplytsya, 2016) запропоновано та обґрунтовано побудову зазначених моделей у вигляді інтервальних дискретних динамічних моделей (ІДДМ) та розроблено програмний комплекс для їх ідентифікації.

Зазначений програмний комплекс реалізує можливість побудови моделей для прогнозування виходу основних продуктів на різних стадіях процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках, дає змогу здійснювати як структурну, так і параметричну ідентифікацію цих моделей. При цьому, для розв'язування задачі структурної ідентифікації ІДДМ застосовують методи індуктивного моделювання, які ґрунтуються на аналогіях із поведінковими моделями бджолиної колонії (Porplytsya, Dyvak, & Dyvak, 2014), а для розв'язання задач параметричної ідентифікації ІДДМ – методи випадкового пошуку із застосуванням напрямного конуса Растрігіна (Dyvak, 2012).

Складність побудови дискретних динамічних математичних моделей для прогнозування виходу основних продуктів на різних стадіях процесу анаероб-

ного мікробіологічного бродіння в біогазових установках полягає у тому, що параметри цих моделей не мають конкретного фізичного змісту. Тому в процесі ідентифікації математичної моделі вони можуть приймати будь-які апіорі невідомі значення. Окрім цього, як відомо, сама задача структурної ідентифікації такого класу моделей належить до класу NP-складних (Dyvak, 2011).

Як уже зазначено, для розв'язування задачі структурної ідентифікації ІДДМ у праці (Gural, & Porplytsya, 2016) запропоновано застосовувати індуктивний метод, який ґрунтується на аналогіях із поведінковими моделями бджолиної колонії. Зазначений метод структурної ідентифікації ІДДМ характеризується нижчою обчислювальною складністю, порівняно з іншими наявними методами для розв'язування таких задач, зокрема, на основі генетичних алгоритмів (Porplytsya, 2015). Однак його застосування все ж потребує значних затрат: як апаратних, так і часових ресурсів.

Результати проведеного аналізу методу структурної ідентифікації ІДДМ, побудованого на основі поведінкових моделей бджолиної колонії, показали можливість зниження його обчислювальної складності шляхом удосконалення способу реалізації деяких операторів. Тому метою цієї роботи є детальний аналіз зазначеного методу структурної ідентифікації та зниження обчислювальної складності, шляхом удосконалення способів реалізації його операторів.

Постановка задачі. Розглянемо математичне формування задачі структурної ідентифікації математичної моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння з розподіленими параметрами. Представимо цю модель у вигляді дискретної динамічної моделі (Gural, & Porplytsya, 2016)

$$v_k = \bar{f}^T(v_0, \dots, v_{k-1}) \cdot \bar{g}, \quad k = p, \dots, K, \quad (1)$$

де: $\bar{f}^T(\bullet)$ – вектор невідомих базисних функцій відомого класу, що визначає структуру дискретної динамічної моделі; символ (\bullet) означає набір базисних функцій у рівнянні (1); v_k – концентрація ацетату (у разі моделювання на стадії ацидогенезу), відсоток ма-

лої субодиниці (МСО) рРНК (Shved., & at el., 2010) кислотоутворювальних бактерій (у разі моделювання на стадії ацетогенезу), відсоток МСО рРНК метаноутворювальних бактерій (у разі моделювання на стадії метаногенезу) у часовій дискреті $k = p, \dots, K$; $\vec{g} = (g_1, \dots, g_i)^T$ – вектор невідомих параметрів дискретної динамічної моделі.

Дискретні динамічні моделі для кожного з етапів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках отримуватимемо у вигляді (1) на основі аналізу експериментальних даних, які подано в інтервальному вигляді. Вектор оцінок параметрів \vec{g} та вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$ у виразі (1) отримуватимемо у такий спосіб, щоб забезпечити виконання умов (Gural, & Porplysja, 2016):

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [v_k^-; v_k^+], \forall k = 1 \dots N, \quad (2)$$

де: $[v_k^-; v_k^+]$ – інтервал можливих значень концентрації ацетату (на стадії ацидогенезу), відсотка МСО рРНК кислотоутворювальних бактерій (на стадії ацетогенезу), відсотка МСО рРНК метаноутворювальних бактерій (на стадії метаногенезу) у часовій дискреті $k = p, \dots, K$; $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – інтервальні оцінки прогнозованої характеристики, які отримуватимемо на основі інтервальної дискретної динамічної моделі (ІДДМ) у такому загальному вигляді:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot \vec{g}. \quad (3)$$

Виконання умов (2) забезпечує можливість знаходження ІДДМ у вигляді (1) із гарантованими прогностичними властивостями (Porplysja, 2015).

Нехай λ_s поточна структура інтервальної дискретної динамічної моделі (Porplytsya, Duvak, & Duvak, 2014)

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \subset \Lambda, \quad (4)$$

де: $\vec{f}^s = \{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$ – набір структурних елементів, що задає поточну s -ту структуру ІДДМ; $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ – кількість елементів у поточній структурі λ_s ; F – множина усіх структурних елементів, $F = \{f_1(\bar{v}_{k-1}); \dots; f_L(\bar{v}_{k-1})\}$, де $|F| = L$ (потужність множини F); $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots; g_{m_s}^s\}$ – вектор невідомих значень параметрів.

Тоді задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури λ_0 ІДДМ у вигляді (4) у такий спосіб, щоб забезпечити виконання умов (3), тобто забезпечувати належність інтервальних оцінок прогнозованого значення концентрації ацетату до інтервалів допустимих значень концентрації ацетату (на стадії ацидогенезу), прогнозованого значення відсотка МСО рРНК кислотоутворювальних бактерій (на стадії ацетогенезу), відсотка МСО рРНК метаноутворювальних бактерій (на стадії метаногенезу) (на стадії ацидогенезу), відсотка МСО рРНК кислотоутворювальних бактерій (на стадії ацетогенезу), відсотка МСО рРНК метаноутворювальних бактерій (на стадії метаногенезу) на множині усіх дискрет.

Тепер задачу структурної ідентифікації ІДДМ можна подати формально у вигляді задачі знаходжен-

ня мінімуму функції мети $\delta(\lambda_s)$ (Porplytsya, Duvak, & Duvak, 2014)

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\vec{g}^s \vec{f}^s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \vec{f}^s(\bullet) \in F. \quad (6)$$

Значення функції мети $\delta(\lambda_s)$ для конкретної структури ІДДМ $\delta(\lambda_s)$ кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі умов (3) (Gural, & Porplysja, 2016). У разі, якщо значення функції мети, обчисленої для конкретної структури ІДДМ, дорівнює нулю, то це означає, що така структура ІДДМ дає змогу побудувати адекватну модель для конкретної стадії анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках.

Аналіз відомого методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолиної колонії проілюструємо у вигляді ітераційної схеми, поданої на рис. 1.

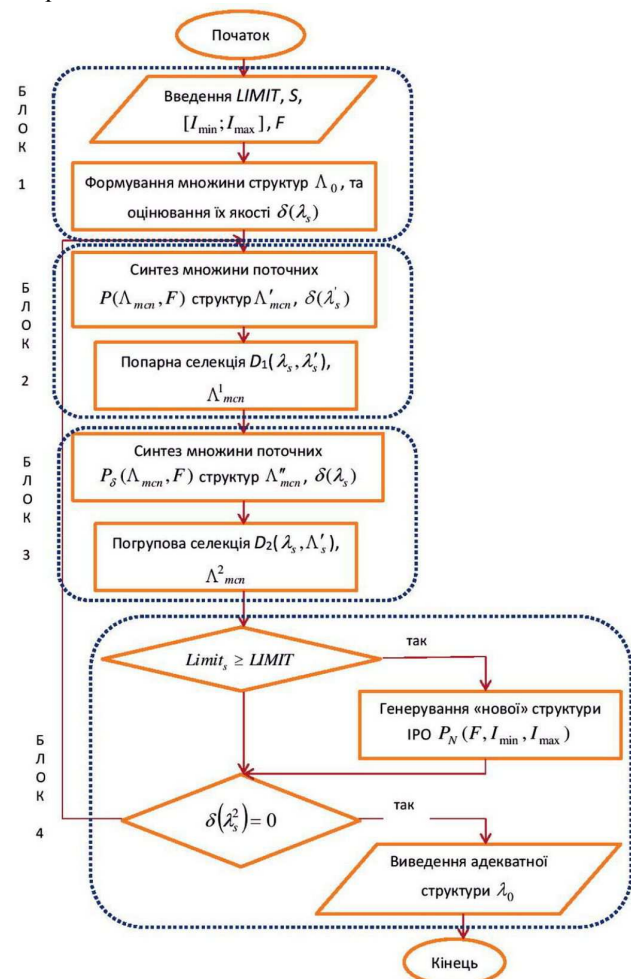


Рис. 1. Узагальнена схема реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолиної колонії (Porplysja, 2016)

Реалізація цього методу забезпечує мінімізацію функції мети (6) у спосіб перетворення послідовності структур $\lambda_1, \dots, \lambda_s, \lambda_{s+1}, \dots, \lambda_0$ через застосування операторів $P(\Lambda_{mcs}, F)$, $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$, $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$, $D_2(\lambda_s, \lambda''_s)$, які є аналогами відповідних процедур із поведінкової моделі бджолиної колонії (Porplytsya, Duvak, & Duvak, 2014).

Зазначені перетворення реалізують фази активності усіх груп бджіл із поведінкової моделі.

Схема на рис. 1 розкриває суть взаємодії та послідовність виконання компонентів поведінкової моделі у контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації. Розглянемо кожен блок, що представлений на цій схемі.

"Блок 1" – ініціалізація початкових параметрів алгоритму. Задаємо значення таких змінних: $LIMIT$, S , $[I_{min}; I_{max}]$ та множина структурних елементів F . Далі формуємо початкову множину структур ІДДМ Λ_0 (потужності S). Варто зазначити, що початкову множину структур ІДДМ Λ_0 формуємо випадковим чином із набору структурних елементів F .

"Блок 2", синтез множини поточних структур ІДМРО Λ'_{mcn} , здійснюємо шляхом перетворення множини структур Λ_{mcn} (mcn – номер поточної ітерації) у множину структур ІДДМ Λ'_{mcn} . Таке перетворення здійснюємо за допомогою оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$. Далі проводимо попарну селекцію структур ІДДМ із застосуванням оператора $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ та отримуємо множину найкращих структур Λ^1_{mcn} .

"Блок 3" – перетворення кожної структури λ_s^1 із множини структур Λ^1_{mcn} , у множину структур ІДДМ Λ'_s (де $s=1\dots S$), шляхом заміни випадковим чином елементів кожної структури λ_s^1 елементами із набору F . Тоді позначимо за Λ''_{mcn} таке об'єднання множин $\Lambda''_{mcn} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$, $s=1\dots S$. Отже, за допомогою застосування оператора $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ отримуємо множину структур Λ''_{mcn} . Далі проводимо погрупову селекцію поточних структур ІДДМ із застосуванням оператора $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$ та отримуємо множину "найкращих" структур Λ^2_{mcn} із поточних множин Λ^1_{mcn} і Λ''_{mcn} .

"Блок 4" – перевірка "вичерпаності" поточних структур ІДДМ. Усі структури $\lambda_s^2 \in \Lambda^2_{mcn}$, для яких виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$, вважаємо "вичерпаніми". Якщо структура є "вичерпаною", то замінюємо її "новою", яку генеруємо на основі оператора $P_N(F, I_{min}, I_{max})$.

Якщо знайдено хоча б одну структуру, для якої $\delta(\lambda_s^2) = 0$, то завершуємо процедуру структурної ідентифікації, в іншому випадку повертаємося у "Блок 2".

Результати детального аналізу усіх операторів методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії показали, що зміна способу реалізації деяких із них дасть змогу знизити обчислювальну складність його застосування.

Розглянемо детальніше "Блок 3" із рис. 1. За аналогією до поведінкової моделі бджолоїної колонії цей блок реалізує *фазу активності бджіл-дослідників*. Зазначена фаза означає таке: після "бджолоїного танцю" в окіл краших джерел їжі летять бджоли-дослідники із вулика, причому, чим якісніше джерело їжі, тим більше туди летить бджіл (Porplytsya, Duvak, & Duvak, 2014).

У "Блоці 3" оператор $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснює формування множини поточних структур ІДДМ Λ''_{mcn} з урахуванням їх "якості"

$$\Lambda''_{mcn} = P_\delta(\Lambda^1_{mcn}, F). \quad (7)$$

Із математичної точки зору, оператор $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 із множини структур Λ^1_{mcn} першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму mcn , у множини структур ІДДМ Λ'_s (де $s=1\dots S$) заміною випадковим чином n_s елементів кожної структури λ_s^1 елементами із множини структурних елементів F . Однак оператор $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснює заміну тільки для тих структур $\lambda_s^1 \in \Lambda^1_{mcn}$, для яких $R_s > 0$.

При цьому, значення показника R_s для кожної структури обчислюють за такою формулою:

$$R_s = \text{ToInt} \left(\frac{S(2\delta_{\max} - \delta(\lambda_s^1) - \delta(\lambda_{s-1}^1))}{\sum_{k=1}^S (\delta_{\max} - \delta(\lambda_k^1))} - R_{s-1} \right), s = \overline{2, S}, \quad (8)$$

де: $\delta_{\max} = \max\{\delta(\lambda_s^1), s = \overline{1, S}\}$; $R_1 = 0$, операція $\text{ToInt}(\bullet)$ означає заокруглення до найближчого цілого значення. Зауважимо, що R_s означає кількість структур, які будуть згенеровані на базі s -тої структури із множини Λ^1_{mcn} , де елементи множини Λ^1_{mcn} повинні попередньо бути упорядкованими відповідно до спадання значення показника якості $\delta(\lambda_s^1)$.

Значення показника R_s , з математичної точки зору, означає кількість структур, які будуть згенеровані на основі s -тої структури із множини Λ^1_{mcn} відповідно до процедури вибору відомого джерела нектару бджолами-дослідниками. Зазначений показник R_s у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії означає кількість бджіл-дослідників, які обрали відоме джерело-нектару з координатами λ_s^1 .

Водночас, автори зазначеного методу запропонували обчислювати значення показника R_s на основі такого припущення: кількість бджіл-дослідників, що летить в окіл джерела нектару, про яке повідомила робоча бджола, прямо пропорційно залежить від його якості.

Зауважимо, що насправді біологічні механізми, на основі яких бджола-дослідник приймає рішення летіти за тою чи іншою робочою бджолою, досліджені недостатньо. Однак вважається, що кількість "завербованих" бджіл-дослідників, з математичної точки зору, завжди є функцією якості джерела нектару. Однак формула (8) базується на припущенні, що зазначена функція виражається саме лінійною залежністю кількості "завербованих" бджіл-дослідників від якості джерела нектару. Проведений детальний аналіз літературних джерел показав, що інші види такої залежності (квадратичний, кубічний, логарифмічний тощо) раніше не досліджували.

Тому, зважаючи на той факт, що функція мети задачі структурної ідентифікації є достатньо складною, дискретною, і має велику кількість локальних мінімумів та містить неперервні підобласті параметрів, до-

цільно дослідити інші способи реалізації обчислювальної процедури для визначення значення показника R_s .

Удосконалення методу структурної ідентифікації ІДДМ. Послідовність перетворень структур ІДДМ, яка використовується у розглянутому методі структурної ідентифікації математичних моделей, забезпечує можливість швидкого виявлення ділянок з локальними мінімумами функції мети та пошуку серед них ділянок із глобальними екстремумами.

Метод структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії забезпечує розширення покриття простору пошуку розв'язків задачі без підвищення обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами. Таке розширення покриття забезпечують шляхом його неоднорідності, що схематично показано на рис. 2.

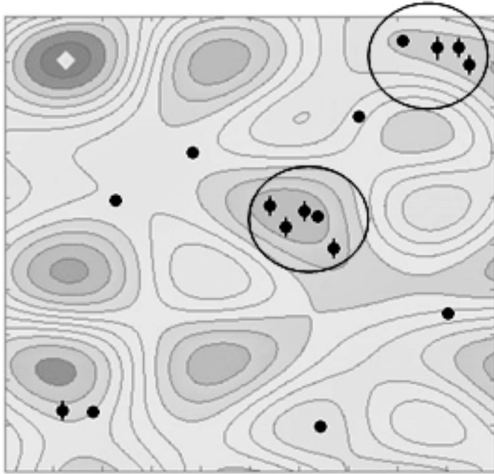


Рис. 2. Схематичне зображення покриття простору розв'язків задачі структурної ідентифікації після генерування "нових" потенційних розв'язків методом на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (Porplysja, 2016)

Зміну значень функції мети на рис. 2 показано за допомогою кольорових градацій, де, наприклад, колір позначає найменші значення, а колір – найбільші. Елемент позначає глобальний мінімум функції мети $\delta(\lambda_s)$; елемент – поточна множина потенційних розв'язків задачі, що у випадку задачі структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді ІДДМ означає поточну структуру λ_s ; – множина згенерованих на основі початкової популяції "нових" потенційних розв'язків.

Таке неоднорідне покриття простору розв'язків задачі структурної ідентифікації реалізують за рахунок використання аналогій з фазою активності бджіл-дослідників із поведінкової моделі. Це означає, що ділянки простору пошуку розв'язків, які характеризуються меншими значеннями функції мети, будуть досліджуватися інтенсивніше, ніж інші. Для цього проводиться процедура генерування "нових" структур ІДДМ на основі тільки однієї "структури-предка" за допомогою оператора $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$. Водночас кількість згенерованих на основі поточної структури ІДДМ "структур-нащадків" прямо пропорційно залежить від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$, яке обчислене для "структури-

предка" та визначається значенням показника R_s . Тобто чим гірша "структура-предок", тим менше для неї генеруємо "структур-нащадків", а в протилежному випадку – навпаки.

Як відомо, методи структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів покривають область розв'язків задачі рівномірно, а наявний метод на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії – нерівномірно. Це забезпечує розширення покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації та формує ефективний механізм для виявлення локальних мінімумів функції мети.

Тому пропонуємо підвищити степінь неоднорідності цього покриття шляхом підвищення степеня нелінійності виразу для обчислення показника R_s , який з точки зору поведінкової моделі бджолоїної колонії, кількісно визначає інтенсивність дослідження джерел нектару, а з точки зору задачі структурної ідентифікації ІДДМ – кількість генерованих "структур-нащадків".

Доцільно перевірити ефективність застосування зазначеного методу у випадку, якщо залежність кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ "структур-нащадків" нелінійно залежатиме від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$. Це дасть змогу змінити характер "неоднорідності" покриття простору пошуку розв'язків задачі структурної ідентифікації.

Підвищення степеня нелінійності виразу (8) забезпечить інтенсивніше дослідження ділянок простору пошуку розв'язків, які характеризуються меншими значеннями функції мети. Звісно, з одного боку, застосування такого підходу забезпечує можливість швидшого знаходження глобального екстремуму функції мети, а з іншого – існує ризик "обійти" перспективні ділянки функції мети задачі структурної ідентифікації ІДДМ, яка є багатоекстремальною (Porplysya, Dyvak, & Dyvak, 2014).

Тому для досліджень пропонуємо використати вираз, який базується на квадратичній залежності кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ "структур-нащадків" від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$:

$$R_s^2 = ToInt \left(\frac{S(2\delta_{\max}^2 - \delta^2(\lambda_s^1) - \delta^2(\lambda_{s-1}^1))}{\sum_{s=1}^S (\delta_{\max}^2 - \delta^2(\lambda_s^1))} - R_{s-1}^2 \right), s = \overline{2, S}, \quad (9)$$

та відповідно – кубічній:

$$R_s^3 = ToInt \left(\frac{S(2\delta_{\max}^3 - \delta^3(\lambda_s^1) - \delta^3(\lambda_{s-1}^1))}{\sum_{s=1}^S (\delta_{\max}^3 - \delta^3(\lambda_s^1))} - R_{s-1}^3 \right), s = \overline{2, S}, \quad (10)$$

де $\delta_{\max}^2 = \max\{\delta^2(\lambda_s^1), s = \overline{1, S}\}$; $\delta_{\max}^3 = \max\{\delta^3(\lambda_s^1), s = \overline{1, S}\}$.

Далі доцільно провести ґрунтовні експериментальні дослідження для перевірки ефективності застосування виразів (8), (9) та (10) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

Результати дослідження. Дослідження ефективності застосування запропонованих виразів (9), (10) та відомого (8) проводили на прикладі побудови моделі

концентрації ацетату на стадії ацидогенезу анаеробного мікробіологічного бродіння.

У біореактор, як речовини для отримання біогазу, завантажували органічні продукти. Процес бродіння досліджували від початку завантаження твердих органічних побутових відходів протягом 50 діб за температури $T_0=[35; 37]^\circ\text{C}$. Концентрація ацетату $[v_k^-; v_k^+]$ вимірювалась щодня. Відомо, що прилади для вимі-

рювання концентрації відзначаються точністю в межах 5 %. Тому в процесі ідентифікації моделі потрібним є виконання умови, щоб інтервальні оцінки прогнозованого значення концентрації ацетату були в межах цієї похибки (Griffin et al.,1998).

Результати вимірювань концентрації ацетату для заданих технологічних чинників подано у табл. 1 (Hural, Dyvak, & Stakhiv, 2016).

Табл. 1. Виміряні інтервальні значення динаміки концентрації ацетату

k	τ , діб	$v_k^-, \frac{\text{мг}}{\text{л}}$	$v_k^+, \frac{\text{мг}}{\text{л}}$	k	τ , діб	$v_k^-, \frac{\text{мг}}{\text{л}}$	$v_k^+, \frac{\text{мг}}{\text{л}}$
0	1	0,285	0,315	25	26	0,266	0,294
1	2	0,665	0,735	26	27	0,247	0,273
2	3	0,903	0,997	27	28	0,228	0,252
3	4	1,425	1,575	28	29	0,209	0,231
4	5	1,473	1,627	29	30	0,190	0,210
5	6	1,900	2,100	30	31	0,180	0,200
6	7	2,280	2,520	31	32	0,171	0,189
7	8	2,660	2,94	32	33	0,162	0,178
8	9	2,945	3,255	33	34	0,152	0,168
9	10	3,325	3,675	34	35	0,143	0,157
10	11	3,705	4,095	35	36	0,133	0,147
11	12	3,990	4,410	36	37	0,124	0,136
12	13	4,275	4,725	37	38	0,114	0,126
13	14	4,560	5,040	38	39	0,105	0,115
14	15	4,750	5,250	39	40	0,095	0,105
15	16	4,180	4,620	40	41	0,095	0,105
16	17	3,610	3,990	41	42	0,095	0,105
17	18	3,040	3,360	42	43	0,095	0,105
18	19	2,470	2,730	43	44	0,095	0,105
19	20	1,900	2,100	44	45	0,095	0,105
20	21	1,425	1,575	45	46	0,095	0,105
21	22	0,950	1,050	46	47	0,095	0,105
22	23	0,380	0,420	47	48	0,095	0,105
23	24	0,427	0,473	48	49	0,095	0,105
24	25	0,285	0,315	49	50	0,095	0,105

Для синтезу структури ІДДМ за допомогою методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолиної колонії було згенеровано множину структурних елементів F з потужністю $L=9$. Внаслідок отримано табл. 2 – упорядковану множину структурних елементів.

Табл. 2. Множина структурних елементів F моделі концентрації ацетату на стадії ацидогенезу анаеробного мікробіологічного бродіння

№	Структурні елементи	№	Структурні елементи
1	v_{k-1}	6	$v_{k-1}^2 \cdot v_{k-2}$
2	v_{k-2}	7	$v_{k-2}^2 \cdot v_{k-1}$
3	$v_{k-1} \cdot v_{k-2}$	8	v_{k-1}^3
4	v_{k-1}^2	9	v_{k-2}^3
5	v_{k-1}^2	-	-

Вхідні параметри обчислювальної схеми методу задаємо так: $MCN=100$, $Limit=3$, $S=15$, $[I_{\min}; I_{\max}]=[3; 7]$.

У процесі досліджень було проведено 5 обчислювальних експериментів із однаковими заданими початковими умовами. Зауважимо, що у кожному з них дослідження проводили паралельно із застосуванням формул (8), (9) та (10).

Зауважимо, що найскладнішою процедурою в методі структурної ідентифікації є процедура обчислення значення функції мети – $\delta(\lambda_s)$. Саме тому ефективність використання виразів (8), (9) та (10) під час розв'язування задачі структурної ідентифікації ІДДМ оцінюватимемо на основі необхідної кількості обчислень значень показника $\delta(\lambda_s)$ для знаходження адекватної структури ІДДМ.

Порівняння обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації на поведінкових моделях бджолиної колонії із застосуванням виразів (8), (9) та (10) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації моделі концентрації ацетату на стадії ацидогенезу анаеробного мікробіологічного бродіння подано у табл. 3.

Табл. 3. Порівняння ефективності застосування лінійного, квадратичного та кубічного операторів для обчислення показника R_s

Номер експерименту	Кількість обчислень значень функції мети, при реалізації відомого методу із використанням:		
	лінійної залежності (8)	квадратичної залежності (9)	кубічної залежності (10)
1	4 564 016	4 251 322	5 741 124
2	3 897 144	3 703 571	4 008 522
3	4 700 102	4 398 780	4 561 098
4	5 204 320	4 823 119	5 321 632
5	4 112 864	3 826 193	4 678 561

Як видно із табл. 3, найефективніше виявлення ділянок простору розв'язків задачі структурної ідентифікації ІДДМ із глобальними мінімумами відбувається при реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, із використанням квадратичної залежності – кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ "структур-нащадків" від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$ (9).

Висновки. Проведено аналіз відомих методів розв'язування зазначеної задачі, результати якого показали, що найефективнішим із них є метод, який ґрунтується на поведінкових моделях бджолоїної колонії. Однак встановлено, що актуальним є проведення досліджень способів реалізації його операторів з метою їх удосконалення у такий спосіб, щоб забезпечити можливість зниження обчислювальної складності застосування цього методу.

Запропоновано удосконалений спосіб реалізації деяких операторів методу, що дало змогу підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації. З одного боку, це забезпечує можливість швидшого виявлення ділянок функції мети з локальними мінімумами, а з іншого – зменшення обчислювальної складності застосування відомого методу структурної ідентифікації математичних моделей.

Проведено експериментальні дослідження обчислювальної складності методу структурної ідентифікації на прикладі побудови моделі концентрації ацетату на стадії ацидогенезу анаеробного мікробіологічного бродіння. Унаслідок досліджень встановлено, що "найефективнішою" реалізацією фази активності бджіл-дослідників із поведінкової моделі у методі структурної ідентифікації є реалізація із застосуванням квадратичної залежності кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ "структур-нащадків" від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$. Застосування такого підходу дає змогу знизити обчислювальну складність методу не менш ніж на 5%. Варто зазначити, що ефективність застосування такого підходу буде збільшуватися пропорційно розмірності задачі.

Перелік використаних джерел

Bodnar, A. M. (2013). *Pershij krok do ekologichnogo majbutnogo – sortuvannya smittja*. Ternopil, p. 12. [in Ukrainian].

- Dyvak, M.P. (2011). *Zadachi matematychnogo modeljuvannja statychnyh system z intervalnymy danymy: monografija*. Ternopil: Ekonomichna dumka TNEU, p. 215. [in Ukrainian].
- Dyvak, T. M. (2012). Parametrychna identyfikacija intervalnogo riznycevogogo operatora na prykladi makromodeli rozpodilu vologosti u lysti gipsokartonu v procesi jogo sushinnja. *Informacijni tehnologii ta kompjuterna inzhenerija : mizhnar. nauk.-tehn. zhurnal*, 3, pp. 79–85. [in Ukrainian].
- Gerber, M. An., & Span, R. (2008). Analysis of Available Mathematical Model for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas. *International Gas Union Research conference*, pp. 5–7. Paris.
- Griffin, M. E., McMahon, K. D., Mackie, R. I., & Raskin, L. (1998). Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Biotechnology and Bioengineering*, 57(3), pp. 342–355.
- Gural, I. V., & Dyvak, M. P. (2014). Biohimichnyj analiz procesiv v biogazovyh ustanovkah ta jogo zastosuvannja v zadachi makromodeljuvannja procesiv vyrobnytstva biogazu. In *Mizhnarodnyj naukovu-tehnichnyj zhurnal "Vymirjuvalna ta obchysljuvalna tehnika v tehnologichnyh procesah"*, pp. 152–158. Hmelnyckyj. [in Ukrainian].
- Gural, I. V., & Porplycja, N. P. (2016). Programnyj kompleks dlja modeljuvannja procesiv brodinnja v biogazovyh ustanovkah. In *Mizhnarodnyj naukovu-tehnichnyj zhurnal "Vymirjuvalna ta obchysljuvalna tehnika v tehnologichnyh procesah"*, pp. 123–130. Hmelnyckyj.
- Hural, I., Dyvak, M., & Stakhiv, P. (2016). Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage. *Journal of Applied Computer Science*, 24(1), pp. 134–142.
- Porplycja, N. P. (2015). Porivnjalnyj analiz efektyvnosti genetichnogo ta "bdzholynogo" algorytmiv u zadachi strukturalnoji identyfikaciji intervalnogo riznycevogogo operatora. *Informacijni tehnologii ta kompjuterna inzhenerija*, 1, pp. 55–67. [in Ukrainian].
- Porplycja, N. P. (2016). Identyfikacija intervalnyh modelej objektiv z rozpodilenyimi parametramy na osnovi povedinkovyh modelej bdzholynoi kolonii: PhD dissertation 01.05.02, Ternopil, p. 159. [in Ukrainian].
- Porplytsya, N., Dyvak, M., & Dyvak, T. (2014). Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 4(2), pp. 57–68.
- Shved, O.V., Mykoliv, O. B., Komarovska-Porohnjavec, O. Z., & Novikov, V. P. (2010). *Ekologichna biotehnologija: navch. posib* (In 2 vol.). Lviv: Lvivska politehnika, p. 420. [in Ukrainian].

Н. П. Порплица, И. В. Гураль, Н. П. Дывак

МЕТОД СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА БРОЖЕНИЯ В БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ

Проведен подробный анализ метода структурной идентификации математических моделей, построенного на основе поведенческих моделей пчелиной колонии. Усовершенствован способ реализации некоторых операторов этого метода, что позволило повысить степень неоднородности покрытия области решений задачи структурной идентификации. Установлено, что реализация фазы активности пчел-исследователей с применением именно квадратичной зависимости (количества сгенерированных с использованием текущей структуры интервальной дискретной динамической модели "структур-потомков", от значения целевой функции), позволяет уменьшить вычислительную сложность применения известного метода структурной идентификации.

Ключевые слова: структурная идентификация, алгоритм пчелиной колонии, интервальная дискретная динамическая модель, брожение, биогазовая установка.

STRUCTURE IDENTIFICATION METHOD OF MODELS FERMENTATION AT BIOGAS PLANTS USING BEE COLONY ALGORITHM

Being one of the urgent humanity problems, the accumulation of municipal solid organic waste requires their disposal via biogas plants. That is why the purpose of this work is a detailed analysis of structure identification method of interval discrete dynamic model (IDDM) construction based on behavioral models of bee colonies and reducing computational complexity by improving ways to implement its operators. This method provides coverage expansion decision region of structure identification and creates an effective mechanism to identify local minima objective function. In our work we propose to increase the degree of heterogeneity of coverage by increasing the degree of nonlinearity formula for calculating that in terms of the behavioral model of bee colonies, quantitatively determines the intensity of research nectar sources, but in terms of the problem of structure identification of IDDM - the amount generated "structures-descendants". Therefore, for research we proposed to use the expression, which is based on quadratic dependence of the number generated based on the current structure of IDDM "structures-descendants" from the value of the objective function $\delta(\lambda_s)$. We also propose the implementation of explorer-bees phase using the same quadratic dependence (amount generated by the current structure of interval discrete dynamic model "structure-descendants" of the purpose function) as it reduces the computational complexity of using structure identification's method. To conclude we should claim that our work improved way to implement some operators of the structure identification method, which is based on behavioral models of bee colonies. Experimental researches of the computational complexity the structure identification method showed that the most effective way to implement the phase of explorer-bees activity (from the behavioral model of the bee's colony) is applying quadratic dependence of the amount of the generated "structures-descendants" based on the current structure IDDM from the value of the objective function $\delta(\lambda_s)$.

Keywords: structure identification; bee colony algorithm; interval discrete dynamic model; fermentation; biogas plant.

Інформація про авторів:

Н. П. Порплиця, канд. техн. наук, ст. викладач, Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна. **E-mail:** ocheretnyuk.n@gmail.com

І. В. Гураль, викладач, Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна. **E-mail:** irishural@gmail.com

М. П. Дивак, д-р техн. наук, професор, Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль, Україна. **E-mail:** mdy@tneu.edu.ua