

УДК 519.876.5

**РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ РІЗНИЦЕВИХ ОПЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ ПОВЕДІНКИ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ****Н. П. Порплиця, М. П. Дивак**

Тернопільський національний економічний університет

вул. Чехова, 8, м. Тернопіль, 46000, Україна. E-mails: ocheretnyuk.n@gmail.com; mdy@tneu.edu.ua

У статті розглянуто аспекти алгоритмічної та програмної реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора як моделі об'єкта з розподіленими параметрами. Алгоритм розв'язання задачі побудовано за аналогією з алгоритмами поведінки колонії медоносних бджіл. Особливість програмної реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора полягає у створенні програмної системи, яка буде доступною для широкого кола користувачів. Ця програмна система повинна виконувати функцію інструментального засобу для математичного моделювання процесів та об'єктів з розподіленими параметрами у випадку, коли вихідні дані для побудови моделі представлені в інтервальному вигляді. Широкий доступ користувачів забезпечується створенням програмного веб-орієнтованого інтерфейсу. У праці також проведено тестування розробленої програмної системи на прикладі розв'язання задачі структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії виготовлення.

**Ключові слова:** структурна ідентифікація, інтервальний різницевий оператор, алгоритм бджолиної колонії, інтервальні дані.

**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИНТЕРВАЛЬНЫХ РАЗНОСТНЫХ ОПЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПОВЕДЕНИЯ ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ****Н. П. Порплиця, Н. П. Дывак**

Тернопольский национальный экономический университет

ул. Чехова, 8, г. Тернополь, 46000, Украина. E-mails: ocheretnyuk.n@gmail.com, mdy@tneu.edu.ua

В статье рассмотрены аспекты алгоритмической и программной реализации метода структурной идентификации интервального разностного оператора как модели объекта с распределенными параметрами. Алгоритм решения задачи построен по аналогии с алгоритмами поведения колонии медоносных пчел. Особенность программной реализации метода структурной идентификации интервального разностного оператора заключается в создании программной системы, которая будет доступной для широкого круга пользователей. Эта программная система должна выполнять функцию инструментального средства для математического моделирования процессов и объектов с распределенными параметрами в случае, когда исходные данные для построения модели представлены в интервальном виде. Широкий доступ пользователей обеспечивается созданием программного веб-ориентированного интерфейса. В работе также проведено тестирование разработанной программной системы на примере решения задачи структурной идентификации модели распределения влажности на поверхности листа гипсокартона на завершающей стадии изготовления.

**Ключевые слова:** структурная идентификация, интервальный разностный оператор, алгоритм пчелиной колонии, интервальные данные.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Процеси і об'єкти з розподіленими параметрами є одними із найскладніших з точки зору математичного моделювання [1]. До них належать процеси тепло- та масоперенесення, дифузії, фільтрації тощо. У випадку застосування дедуктивного підходу математичні моделі об'єктів з розподіленими параметрами представляють переважно у вигляді різницевих схем (різницеви операторів). Для синтезу математичної моделі об'єкта потрібно перш за все сформулювати структуру моделі, тобто визначити її загальний вигляд, а після цього провести процедуру налаштування її параметрів [1, 2]. Перший із зазначених етапів називають структурною ідентифікацією, а другий – параметричною [3].

У статті [4] розглянуто базові принципи методу структурної ідентифікації математичної моделі об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів, що ґрунтується на засадах роевого інтелекту. Зазначений метод має ряд переваг у порівнянні з відомими методами структурної ідентифікації, наприклад тих, що побудовані на основі генетичних алгоритмів [5]. Особливо переваги застосування принципів роевого інтелекту для

структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами відчутні, коли дані для ідентифікації представлені в інтервальному вигляді. У такому випадку математичну модель об'єкта з розподіленими параметрами будують у вигляді інтервального різницевого оператора [6].

Сьогодні відсутні програмні засоби для широкого використання методу структурної ідентифікації ІРО із використанням алгоритмів поведінки бджолиної колонії.

Тому метою цієї праці є розробка програмної реалізації зазначеного методу для пошуку структури математичної моделі у вигляді інтервального різницевого оператора. Створення такої програмної системи надасть користувачам можливість застосування новітніх методів структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами, які ґрунтуються на принципах самоорганізації в біологічних системах.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Розглянемо задачу структурної ідентифікації математичної моделі об'єкта з розподіленими параметрами

рами (процеси дифузії, тепло- та масоперенесення) у такому загальному вигляді:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T (v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, \dots, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K,$$

де  $\vec{f}^T(\bullet)$  – вектор невідомих базисних функцій, що визначає структуру різницевого оператора (РО); символ  $(\bullet)$  означає набір базисних функцій у виразі (1);  $v_{i,j,h,k}$  – модельована характеристика у точці з дискретно заданими просторовими координатами  $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, h = 1, \dots, H$  та на часовій дискреті  $k = 1, \dots, K$ ;  $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$  – вектори вхідних змінних (управління);  $\vec{g}$  – вектор невідомих параметрів РО.

Зауважимо, що вектор оцінок  $\vec{g}$  параметрів  $\vec{g}$  та вектор базисних функцій  $\vec{f}^T(\bullet)$  у різницевому операторі (1) отримуватимемо із умов забезпечення точності математичної моделі в межах граничних похибок спостереження за модельованою характеристикою процесу:

$$[\widehat{v}_{i,j,h,k}] \in [z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+], \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K,$$

де  $[z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+]$  – інтервал можливих значень модельованої характеристики в точці з дискретними координатами  $i, j, h$  в  $k$ -тий момент часу.

У виразі (2)  $[\widehat{v}_{i,j,h,k}]$  означає інтервальні оцінки прогнозованої характеристики, які обчислюватимемо на основі такого різницевого оператора:

$$[\widehat{v}_{i,j,h,k}] = [\widehat{v}_{i,j,h,k}^-, \widehat{v}_{i,j,h,k}^+] = \vec{f}^T ([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K.$$

Взявши до уваги те, що всі обчислення у різницевому операторі (3) необхідно проводити із застосуванням правил інтервальної арифметики, РО (3) будемо називати інтервальним різницеvim оператором (ІРО) [3].

Складність задач налаштування ІРО (3) полягає в тому, що невідомими є не лише параметри, а і його загальний вигляд, тобто структура.

Для початку введемо ряд позначень, які необхідні для розкриття суті формальної постановки задачі.

Позначимо за  $\lambda_s$  поточну структуру ІРО (3):

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

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 ІРО.

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури  $\lambda_0$  ІРО у вигляді (4), щоб сформований на основі неї інтервальний різницеvim оператор:

$$[\widehat{v}_{i,j,h,k}(\lambda_0)] = [f_1^0(\bullet)] \cdot g_1^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot g_{m_0}^0 \quad (5)$$

задовольняв умови (2), тобто забезпечував належність інтервальних оцінок прогнозованого значення характеристики об'єкта з розподіленими параметрами до інтервалів  $[z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+]$  на множині усіх точок, в яких проводилося спостереження.

Якість поточної структури ІРО оцінюватимемо за значенням показника  $\delta(\lambda_s)$ , який кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (2) [7].

Тепер задачу структурної ідентифікації ІРО запишемо у вигляді задачі знаходження мінімуму функції  $\delta(\lambda_s)$  [4]:

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

Чим менше значення  $\delta(\lambda_s)$ , тим «краща» поточна структура ІРО. Якщо  $\delta(\lambda_s) = 0$ , то поточна структура ІРО дає можливість побудувати адекватну об'єкту модель.

Розглянемо детальніше базові принципи методу структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді ІРО на основі алгоритму бджолоїної колонії (АБК) [4].

Варто зазначити, що АБК моделює харчову поведінку колонії медоносних бджіл [8]. У контексті цього алгоритму усіх бджіл колонії, котрі займаються пошуком джерел їжі, умовно поділяють на три типи [9]: робочі бджоли (проводять пошук їжі в околі уже відомих джерел нектару та інформують бджіл-дослідників про якість джерел нектару); бджоли-дослідники (знаходяться у вулику, де отримують інформацію від робочих бджіл, після чого відправляються на пошуки нектару в окіл знайдених робочими бджолами джерел нектару); бджоли-розвідники (здійснюють випадковий пошук нових джерел нектару). Як було зазначено вище, задача структурної ідентифікації є складною оптимізаційною задачею з нелінійною та дискретною цільовою функцією. Алгоритм пошуку розв'язку цієї задачі пропонується побудувати за аналогією з системою самоорганізації колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару).

Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді ІРО на основі АБК показано на рис. 1. «Блок 1» – ініціалізація початкових параметрів алгоритму. Задаємо значення початкових параметрів налаштування методу [1]:  $M_{CN}$  – максимальна кількість ітерацій алгоритму;  $LIMIT$  – максимальна можлива кількість ітерацій «незмінності» структури, тобто якщо структура ІРО не «покращувалася» уже  $LIMIT$  разів, то вона вважається «вичерпаною»;  $S$  – початкова кількість структур ІРО;  $[I_{\min}; I_{\max}]$  – інтервал, межі якого

задають відповідно найменшу  $I_{\min}$  та найбільшу  $I_{\max}$  кількість структурних елементів у структурі IPO  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина структурних елементів. Далі

формуємо початкову множину структур IPO  $\Lambda_0$  (потужності  $S$ ).

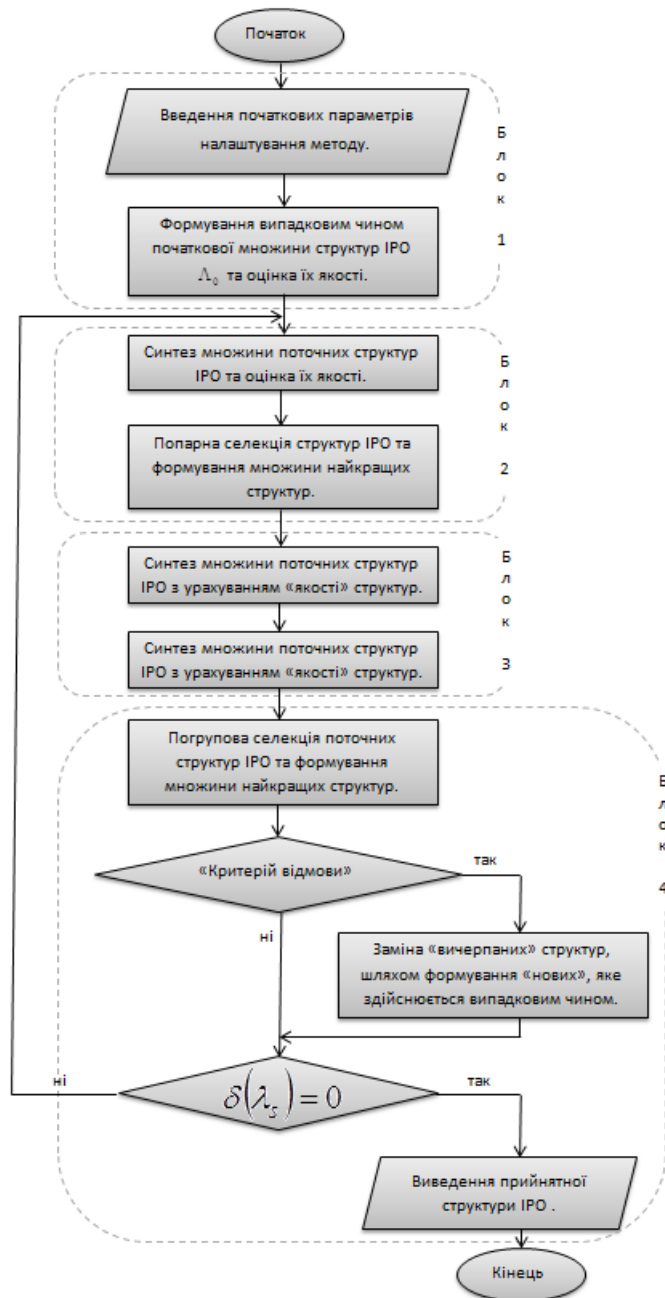


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму реалізації методу структурної ідентифікації IPO на основі АБК

Варто зазначити, що множина структур IPO  $\Lambda_0$  сформована випадковим чином із набору структурних елементів  $F$ .

«Блок 2» – синтез множини поточних структур IPO  $\Lambda'_{mcp}$  здійснюємо шляхом перетворення множини структур  $\Lambda_{mcp}$  ( $mcp$  – номер поточної ітерації), у множину структур IPO  $\Lambda'_{mcp}$  (за аналогією з АБК – «фаза активності робочих бджіл»). Таке перетворення виконуємо заміною випадковим чином частини елементів кожної структури, елементами із набору  $F$ .

Кількість замінованих елементів поточної структури визначаємо за таким принципом: чим нижча «якість» структури IPO, тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Далі проводимо попарну селекцію структур IPO та формуємо множину найкращих структур  $\Lambda^1_{mcp}$ .

«Блок 3» – перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  із множини структур  $\Lambda^1_{mcp}$ , у множину структур IPO  $\lambda_s'$  (де  $s = 1 \dots S$ ), відбувається шляхом заміни випадковим чином елементів кожної структури  $\lambda_s^1$  елементами із набору  $F$  (за аналогією з АБК – «фа-

за активності бджіл-дослідників»). Позначимо за  $\Lambda_{mci}^n$  таке об'єднання множин:

$$\Lambda_{mci}^n = \{\Lambda_1' \cup \Lambda_2' \dots \cup \dots \Lambda_s' \dots \cup \Lambda_S'\}, s = 1 \dots S. \quad (7)$$

Варто зазначити, що потужність множини  $\Lambda_s'$ , визначаємо для кожної структури  $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mci}^1$  (на основі якої генерується множина  $\Lambda_s'$ ), індивідуально за таким принципом: чим «якісніша» структура IPO  $\lambda_s^1$ , тим більша потужність множини  $\Lambda_s'$ . Далі проводимо погрупову селекцію поточних структур IPO та формування множини «найкращих» структур  $\Lambda_{mci}^2$  із поточних множин  $\Lambda_{mci}^1$  і  $\Lambda_{mci}^n$ , способом селекції структур IPO  $\lambda_s^2$ .

«Блок 4» – перевірка «критерію відмови» (за аналогією з АБК – «фаза активності бджіл-розвідників»). Усі структури  $\lambda_s^2 \in \Lambda_{mci}^2$  для яких виконується умова  $Limit_s \geq LIMIT$ , вважаються «вичерпаними». Якщо структура є «вичерпаною», то вона замінюється «ною» (генерується випадковим чином із набору  $F$ ).

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

Метою роботи є розробка програмного забезпечення для реалізації вищеописаного алгоритму, яке буде доступним для широкого кола користувачів. У результаті проведення аналізу вимог до системи було виділено наступні варіанти використання, які проілюстровано на рис. 2.

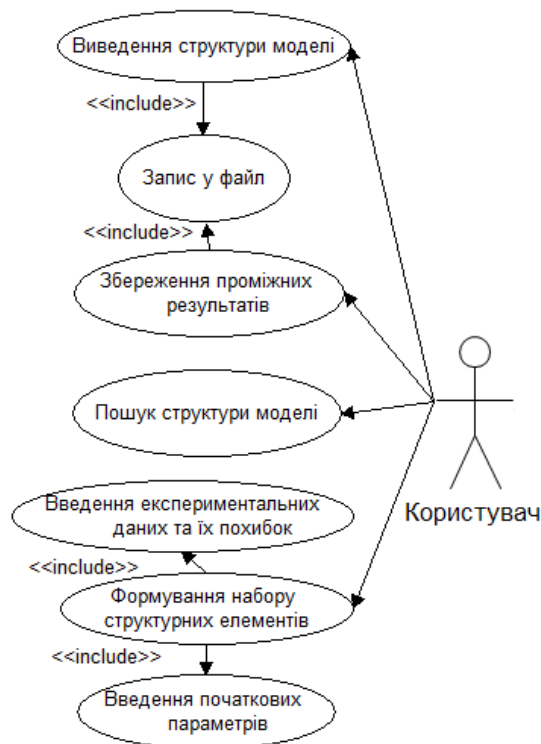


Рисунок 2 – Діаграма варіантів використання

Як показано на рис. 2, програмна система повинна надавати користувачеві можливість введення експериментальних даних та початкових параметрів реалізації методу. Крім того, необхідно реалізувати функцію «Формування набору структурних елементів», яка на основі внесених параметрів реалізації методу автоматично формуватиме масив усіх можливих структурних елементів. Функція «Пошук структури моделі» повинна реалізувати метод структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії. Функція «Збереження проміжних результатів» повинна забезпечувати можливість зупинки програми у процесі роботи функції пошуку структури та збереження проміжних результатів.

Програмний комплекс для автоматизації процесу пошуку структури математичної моделі у вигляді IPO розроблено із використанням об'єктно-орієнтованого підходу. Для реалізації програмного комплексу було застосовано технологію NET, мову програмування C# та використано інтегроване середовище розробки програмних продуктів Microsoft Visual Studio. Варто зазначити, що розроблена програмна система задовольняє усі вищезазначені функціональні вимоги та є браузернонезалежною.

Для зручності використання програмної системи було розроблено графічний інтерфейс для введення даних, котрий представлено на рис. 3-8. Розглянемо детальніше особливості реалізації інтерфейсу програмної системи на прикладі розв'язання задачі структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії виготовлення.

Математична модель розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення представляється у вигляді різницевого оператора. Для побудови зазначеної моделі використовують дані (отримані в результаті вимірювань на сітці), які містять як похибки вимірювань вологості, так і межі допустимих значень цієї вологості [5, 10].

Результати аналізу технологічної схеми виробництва гіпсокартону свідчать про те, що при установленій конструкції сушильної камери, основними технологічними чинниками на цій стадії є температура у сушильній камері та швидкість подачі листа. Крім того, із проведеного аналізу технологічного процесу виробництва гіпсокартону впливає, що найбільше впливає на забезпечення високої якості гіпсокартону саме завершальна стадія його виробництва – процес сушіння, оскільки саме тоді формується кінцевий розподіл вологості в листі гіпсокартону, який і є визначальним для виявлення браку серед готової продукції. При цьому на виробництві немає можливості проводити вимірювання вологості для кожного листа. За таких умов доцільно побудувати макромодель об'єкта з розподіленими параметрами, яка б відображала залежність розподілу вологості у листі гіпсокартону від технологічних чинників на стадії його сушіння.

На рис. 3 проілюстровано сторінку програмної системи «Input Data» для введення експериментальних даних. У зазначеній задачі ними є результати

вимірювань вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння для заданих технологічних чинників. Спочатку вводимо розмірність таблиці з експериментальними даними (поля: Rows=4, Columns=8). Після цього на сторінці динамічно генерується таблиця заданої розмірності. Далі заповнюємо її експериментальними даними. Після цього, вводимо (як показано на рис. 3): Max Step Rows, Max Step Columns задають порядок різничевого оператора, тобто визначають початкові умови для реалізації методу структурної ідентифікації IPO; Input data deviation визначає величину похибки вимірювань істинних значень прогнозованої характеристики (значення повинно лежати в межах від 0 до 1), Initial condition deviation визначає величину похибки для завдання початкових умов (значення повинно лежати в межах від 0 до 1).

### Input Data

Rows: 4 Max Step Rows: 1 Input data deviation: 0.05  
 Columns: 8 Max Step Columns: 2 Initial condition deviation: 0.01

0.6	0.63	0.66	0.66	0.68	0.65	0.62	0.61
0.68	0.74	0.78	0.82	0.85	0.83	0.79	0.71
0.72	0.78	0.82	0.85	0.86	0.82	0.78	0.73
0.62	0.63	0.68	0.7	0.71	0.67	0.66	0.65

Next>>

Рисунок 3 – Сторінка для введення експериментальних даних

У випадку, якщо на модельовану характеристику мають вплив вхідні параметри (управління), то для реалізації методу структурної ідентифікації потрібно перейти на сторінку «Experiments» натиснувши кнопку «Next».

### Experiments

Array Size: 2 2

120	0.25
125	0.28

<<Previous Next>>

Рисунок 4 – Сторінка для введення вхідних змінних (управлінь)

Із рис. 4 видно, що для введення векторів вхідних змінних (управлінь)  $\bar{u}_{i,j,h,0}, \dots, \bar{u}_{i,j,h,k}$  спочатку необхідно ввести розмірність векторів та їх кількість. У випадку задачі структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону є два вектори вхідних змінних, кожен з яких містить два значення технологічних чинників, а саме: температура у сушильній камері та швидкість переміщення у сушильній камері. Після того як на вкладці динамічно згенерувалася таблиця для введення значень вхідних змінних, заповнюємо її (як показано на рис. 4).

Для програмної реалізації функції «Формування набору структурних елементів» необхідно ввести відношення між вхідними змінними, як це рекомендовано у праці [1], тоді як відношення між елементами множини заданих початкових умов формуватимуться автоматично. Для введення відношень між вхідними змінними потрібно перейти на сторінку «Parameters Allowed Operations», загальний вигляд якої проілюстровано на рис. 5. Для переходу необхідно натиснути кнопку «Next».

Важливо зазначити, що при переході на сторінку «Parameters Allowed Operations», на ній уже відображаються кнопки із вхідними змінним (управліннями), що попередньо були введені на сторінці «Experiments».

### Parameters Allowed Operations

Operation: u1\_0/u2\_0 Add / \*

u1\_0 u2\_0  
u1\_1 u2\_1

<<Previous Next>>

Рисунок 5 – Сторінка для введення комбінацій вхідних змінних (управлінь)

Для формування відношень між вхідними змінними доступні арифметичні операції: «\*», «/». Далі, по чергово вводимо усі необхідні відношення між вхідними змінними. Приклад виконання зазначеної операції проілюстровано на рис. 5. Варто зазначити, що комбінації з множини елементів (вхідних змінних)  $\{\bar{u}_{i,j,h,0}, \dots, \bar{u}_{i,j,h,k}\}$  потрібно генерувати, виходячи з фізичного аналізу модельованого реального процесу для забезпечення умови зменшення обчислювальної складності реалізації методу.

Після введення усіх комбінацій вхідних змінних, потрібно задати початкові параметри реалізації методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолиної колонії, для цього потрібно перейти на сторінку «Logic Settings».

### Logic Settings

Number of structures for calculation: 10

Number of elements used in structure:

From: 4 To: 8

Max number of iterations: 100

Max number of unchangeable structure: 4

Time for structure change: 10 0 0

<<Previous Next>>

Рисунок 6 – Сторінка для введення початкових параметрів реалізації методу

На рис. 6 проілюстровано загальний вигляд сторінки «Logic Settings». Тут необхідно заповнити усі поля: Number of Schemes for calculation – S, Number of elements in structure –  $[I_{\min}; I_{\max}]$ , Max number of iterations – MCN, Max number of unchangeable structure – LIMIT, Time for structure change – час для проведення параметричної ідентифікації поточної структури IPO.

Далі переходимо безпосередньо до етапу структурної ідентифікації IPO, для цього запускаємо функцію «Пошук структури моделі», натиснувши кнопку «Next», та переходимо на сторінку «Main», де можна прослідкувати за перебігом процесу структурної ідентифікації.



Рисунок 7 – Сторінка для моніторингу процесу структурної ідентифікації

На сторінці «Main» відображається наступне: поточна структура IPO, поточне значення її показника якості, а також поточне значення показника обчислювальної складності реалізації методу. Варто зазначити, що на цій же сторінці і буде виведено «оптимальну» структуру IPO (як показано на рис. 8).

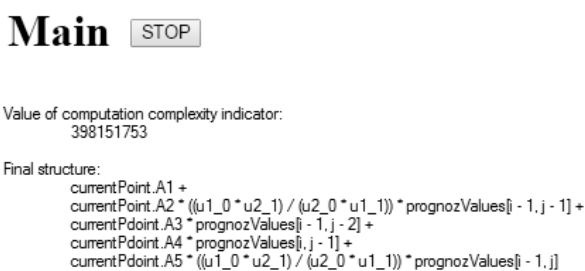


Рисунок 8 – Сторінка «Main» після завершення процедури структурної ідентифікації IPO

У результаті проведення процедури структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону отримали структуру моделі, показану на рис. 8. Крім того, було оцінено значення вектора параметрів IPO, а також обчислено прогнозовані значення модельованої характеристики, тобто вологості на поверхні листа гіпсокартону. Після завершення процедури структурної ідентифікації зазначені величини програмна система запише у текстовий файл.

ВИСНОВКИ. Створено алгоритм та програмну систему для структурної ідентифікації різницевого оператора за умови, що вхідні дані представлено в інтервальному вигляді. Важливо зауважити, що в основу алгоритму розв'язання зазначеної задачі покладено принципи поведінки колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару). Програмна система є універсальною, оскільки може бути використана для пошуку структур макромоделей різних об'єктів та процесів з розподіленими параметрами. Крім того, результати тестування розробленої програмної системи на прикладі задачі структурної ідентифікації макромоделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння показали, що програма працює коректно.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: "Техніка", 1975. – 311 с.
2. Graupe D. Identification of systems. – New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1976. – 304 p.
3. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: "Наукова думка", 1982. – 296 с.
4. Порплиця Н. П., Дивак М. П. Синтез структури інтервального різницевого оператора з використанням алгоритму бджолоїної колонії // Індуктивне моделювання складних систем. – 2013. – Вип. 5. – С. 256–269.
5. Порплиця Н. П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та "бджолоїної" алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 1. – С. 55–67.
6. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. – Тернопіль: Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011. – 216 с.
7. Дивак М. П., Дивак Т. М. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора // Індуктивне моделювання складних систем: збір. наук. праць. – К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2009. – Вип. 1. – С. 35–43.
8. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
9. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39, Issue 3. – PP. 459–471.
10. Дивак Т. М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 3. – С. 79–85.

## IMPLEMENTATION OF THE STRUCTURE IDENTIFICATION METHOD FOR INTERVAL DIFFERENCE OPERATORS BASED ON THE ALGORITHM OF BEE COLONY BEHAVIOR

N. Porplytsya, M. Dyvak

Ternopil National Economic University

Chekhova St., 8, Ternopil, 46000, Ukraine. E-mails: ocheretnyuk.n@gmail.com, mdy@tneu.edu.ua

The problem of structure identification of an interval difference operator as the model of an object with distributed parameters has been considered. It is shown that this problem is a discrete optimization problem and its solving algorithms are NP-complete. This makes it extremely difficult in terms of solving and requires the use of the self-organization principles of multi-agent systems. For solving the task, it was proposed to use the method for the structure identification of the interval difference operator, which unlike the existing one built by analogy with the foraging behavior of a honey bee colony. The method is based on the behavior of the bee colony while searching for the rich food sources. This method of structure identification is to belong to the inductive modeling methods, when the mathematical model of the process is constructed in the form of a difference operator based on the analysis of the experimental data obtained under the conditions of incomplete information. Notify, in the article it was considered the case, when the experimental data obtained in interval form.

In the article, the aspects of algorithmic and software implementation of the method of structure identification of interval difference operator as a model of the object with distributed parameters is considered. The feature of the software implementation the method of structure identification of interval difference operator is a creation of the software system, which will be accessible to a wide range of users. This software system must run the function of tool for mathematical modeling of processes and objects with distributed parameters, in case when the initial data for construction the model is represented in interval form. Wide access for the users is provided by the creation the web-based interface. The software system was created using the C# language and Microsoft Visual Studio.

The developed software system also was tested on the example of solving the problem of structure identification of the model for humidity distribution on the surface of the drywall sheet at the final stage of manufacture. The results of the testing of the developed software shows: the software works correct. In addition, the article describes the structure of a mathematical model for humidity distribution on the surface of the drywall sheet at the final stage of manufacture. The structure of a mathematical model was found with using of the developed software. References 10, figures 8.

**Key words:** structure identification, interval difference operator, bee colony algorithm, interval data.

### REFERENCES

1. Ivakhnenko, A.G. (1975), *Dolgosrochnoye prognozirovaniye i upravleniye slozhnyimi sistemami* [Long-term forecasting and management of complex systems], Tekhnika, Kyiv, Ukraine.
2. Graupe, D. (1976), *Identification of systems*, Robert E. Krieger Publishing Co., Huntington, New York, USA.
3. Ivakhnenko, A.G. (1982), *Induktivnyy metod samoorganizatsii modeley slozhnykh system* [The inductive method of self-organizing models of complex systems], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
4. Porplytsya, N.P., Dyvak, M.P. (2013), "Synthesis of structure of interval difference operator using artificial bee colony algorithm", *Inductive modeling of complex systems*, vol. 5, pp. 256–269.
5. Porplytsya, N.P. (2015), "Comparative analysis of genetic and bee's algorithm in the problem of structure identification of interval difference operator", *Information Technologies and Computer Engineering*, vol. 1, pp. 55–67.
6. Dyvak, M.P. (2011), *Zadachi matematychnoho modelyuvannya statychnykh system z intervalnyimi danymi* [Problems of mathematical modeling of static systems with interval data], Vydavnytstvo TNEU Economichna Dumka, Ternopil, Ukraine.
7. Dyvak, M.P., Dyvak, T.M. (2009), "Features of construction of interval systems of algebraic equations and methods of solving problems in identification of interval linear difference operator", *Inductive modeling of complex systems*, vol. 1, pp. 35–43.
8. Karaboga, D. (2005), "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization", *Technical Report TR06*, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
9. Karaboga, D., Basturk, B. (2007), "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm", *Journal of Global Optimization*, vol. 39, issue 3, pp. 459–471.
10. Dyvak, T.M. (2012), "Parametric identification of interval difference operator on the example of macromodel for distribution of humidity in the drywall sheets in the process of drying", *Information Technologies and Computer Engineering*, vol. 3, pp. 79–85.

Стаття надійшла 18.07.2015.