https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-71-3-7
УДК 519.876.5

АНДРІЙ МЕЛЬНИК
Західноукраїнський національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7799-9877
melnyk.andriy@gmail.com
МИКОЛА ДИВАК
Західноукраїнський національний університет
https://orcid.org/0000-0002-9049-4993
e-mail: mdy@wunu.edu.ua

# МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ АДАПТИВНИМ НАЛАШТУВАННЯМ ВИБОРУ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*Розглянуто задачу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів та метод її розв'язування на основі поведінкової моделі бджолиної колонії. Досліджено особливості реалізації цього методу. Встановлено, що під час формування структур на різних фазах обчислювальної схеми методу здійснюємо вибір із множини елементів випадково і заміну структурних елементів здійснюємо також випадково. В основі такого вибору покладено рівномірний закон розподілу.*

*Спираючись на ці факти, сформульовано задачу про необхідність встановлення приорітетності обрання структурних елементів із множини для формування оптимальної, в сенсі задачі структурної ідентифікації структури інтервальної дискретної моделі, що у підсумку забезпечить зниження обчислювальної складності методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів.*

*В роботі запропоновано та обґрунтовано новий метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, який на відміну від існуючих, містить обчислювальні процедури адаптивного налаштування вибору структурних елементів у спосіб встановлення для кожного елемента множини структурних елементів ймовірності вибору будь-якого елемента і на основі зміни цього розподілу на різних фазах поведінкової моделі бджолиної колонії, що у сукупності знижує обчислювальну складність реалізації методу.*

*Ключові слова: математичне моделювання, інтервальний аналіз, структурна ідентифікація, адаптивне управління.*

ANDRIY MELNYK, MYKOLA DYVAK
West Ukrainian National University

# METHOD OF STRUCTURAL IDENTIFICATION OF INTERVAL DISCRETE MODELS OF COMPLEX OBJECTS WITH ADAPTIVE ADJUSTMENT OF SELECTION OF STRUCTURAL ELEMENTS

*The problem of structural identification of interval discrete models of complex objects and the method of solving it based on the behavioral model of a bee colony are considered. Peculiarities of the implementation of this method have been studied. It was established that during the formation of structures at different phases of the computational scheme of the method, we make a selection from a set of elements randomly and replace structural elements also randomly. This choice is based on the uniform distribution law.*

*Based on these facts, the problem of the need to prioritize the selection of structural elements from a set to form an optimal, in the sense of the problem of structural identification of the structure of an interval discrete model, is formulated, which will ultimately ensure a reduction in the computational complexity of the method of structural identification of interval discrete models of complex objects.*

*The paper proposes and substantiates a new method of structural identification of interval discrete models of complex objects, which, unlike the existing ones, contains computational procedures for adaptive adjustment of the selection of structural elements in a way of establishing for each element of a set of structural elements the probability of selecting any element and based on the change of this distribution in different phases of the behavioral model of the bee colony, which collectively reduces the computational complexity of the method implementation.*

*Keywords: mathematical modeling, interval analysis, structural identification, adaptive management.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Математичні та комп'ютерні (дискретні) моделі об'єктів з розподіленими параметрами набули широкого використання у різних прикладних сферах: від військового застосування до екології, енергетики та медицини [1,2,3]. Прикладом можуть слугувати рої ударних безпілотних літальних апаратів (американська програма Gremlin), апаратів наземного, надводного та підводного використання, процеси забруднення атмосфери, ґрунтів та ґрунтових вод, просторово-розподілені характеристики тканин живих організмів та людини [3-5]. Представлення цих моделей у вигляді інтервальних різницевих рівнянь має переваги для комп'ютерного моделювання, проте вимагає застосування методів структурної та параметричної ідентифікації на основі результатів спостережень, які переважно є неточними. Разом з тим, розроблені математичні та комп'ютерні моделі відзначаються високою обчислювальною складністю, яка необхідна для забезпечення адекватності та достатньої для прийняття рішень точності. Проблема складності пов'язана із необхідністю розширення сфери застосування моделі у певній предметній області, при збереженні прогностичних властивостей моделі [6-9].

Сучасна теорія математичного моделювання та теорія ідентифікації в межах індуктивного підходу ґрунтуються на кількісному аналізі даних, які отримують для різних умов проведення експерименту. Важливим завданням цих теорій є не констатація фактів на основі експериментальних даних, а прогнозування та передбачення, що вимагає їх застосування за межами експерименту. В додаток до аналізу інтервальних даних, який забезпечує побудову моделей з гарантованими прогностичними властивостями, використання онтологічного аналізу предметної області забезпечить виявлення та урахування чинників, які не можливо встановити під час кількісного аналізу, але які змінюють прогностичні властивості моделі. Такий розвиток теорії моделювання та теорії ідентифікації забезпечить розширення сфер застосування математичного та комп'ютерного моделювання [10-12].

З іншого боку, спираючись на гіпотезу про те, що онтологічний опис предметної області моделювання дає можливість формалізувати та розширити умови використання інтервальної моделі, то необхідно розробити гібридні методи налаштування структури моделі та параметрів з метою підвищення її прогностичних властивостей. Таким чином, розроблення методів та засобів побудови дискретних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу [13] та аналізу інтервальних даних для розширення сфери та умов застосування моделей при забезпеченні її заданих прогностичних властивостей є актуальною проблемою, розв'язування якої створює умови для розвитку теорії ідентифікації та математичного моделювання, а також слугуватиме поштовхом для розвитку прикладних досліджень у сферах оборони країни, охорони довкілля, медицини та інших галузях [14-15].

**Постановка проблеми**

Спочатку проведемо детальний аналіз обчислювальних процедур методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів.

Як було зазначено у першому розділі, задача структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів породжена отриманням інтервальних даних у формі

$$[z_{i,j,h,k}^{-};z_{i,j,h,k}^{+}],i=0,...,I,j=0,...,J,h=0,...,H,k=0,...,K\ , \qquad (1)$$

де $[z_{i,j,h,k}^{-};z_{i,j,h,k}^{+}]$ – нижня та верхня межі експериментально отриманої характеристики об'єкта в точці з дискретними координатами $i=0,...,I,j=0,...,J,h=0,...,H$ та у дискретні моменти часу $k=0,...,K$ .

Математичну модель характеристики об'єкта у загальному вигляді розглядаємо, як дискретну модель у такому вигляді:

$$\begin{aligned}v_{i,j,h,k}=\vec{f}^{T}(&v_{i-d,j-d,h-d,k-d},v_{i-d+1,j-d,h-d,k-d,...,}v_{j-d+1,d,d,d,...,}v_{i-1,j-1,h-1,k-1,...,}\\&v_{i,j,h-1,k})\cdot\vec{g},\ i=d,...,I,j=d,...,J,h=d,...,H,k=d,...,K\end{aligned} \qquad (2)$$

де $v_{i,j,h,k}$ - означає прогнозоване чи модельоване значення виміряної характеристики об'єкта в точці з дискретними координатами $i=d,...,I,j=d,...,J,h=d,...,H$ , тобто поза точками вимірювань та у дискретні моменти часу $k=d,...,K$ , тобто в дискретні моменти часу поза дискретами, у яких проводилися вимірювання; $d$ – порядок різницевої схеми( .2); $\vec{g}$ – вектор параметрів моделі, значення яких необхідно оцінити на основі інтервальних даних; $\vec{f}^{T}(\bullet)$ - вектор базисних функцій, які перетворюють значення модельованої характеристики для попередніх точок та дискретних моментів часу, тобто для кожної базисної функції матимемо у виразі (2) для перетворення, в загальному вигляді, такий вектор:

$$\vec{V}=(v_{i-d,j-d,h-d,k-d},v_{i-d+1,j-d,h-d,k-d},...,v_{j-d+1,d,d,d},\cdots,v_{i-1,j-1,h-1,k-1},...,v_{i,j,h-1,k})^{T} \qquad (3)$$

Критерієм достатньої точності математичної моделі (2) за таких умов є:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}^{-};\hat{v}_{i,j,h,k}^{+}]\subset[z_{i,j,h,k}^{-};z_{i,j,h,k}^{+}]\forall i=0,...,I,\forall j=0,...,J,\forall h=0,...,H,\forall k=0,...,K \qquad (4)$$

де $[\hat{v}^{-}_{i,j,h,k};\hat{v}^{+}_{i,j,h,k}]$ - є числовим інтервалом модельованої характеристики об'єкта.

Як зазначалося, структура моделі є набір взаємопов'язаних компонент

$$\lambda_s = \{f_1^s(\vec{V})\cdot g_1^s; f_2^s(\vec{V})\cdot g_2^s;...; f_{m_s}^s(\vec{V})\cdot g_{m_s}^s\} \tag{5}$$

а їх адитивна згортка:

$$Q(\lambda_s) = f_1^s(\vec{V})\cdot g_1^s + f_2^s(\vec{V})\cdot g_2^s + ... + f_{m_s}^s(\vec{V})\cdot g_{m_s}^s \tag{6}$$

є дискретною моделлю об'єкта. У виразі (5), s – означає певний набір структурних елементів.

Оскільки для обчислень за різницевою схемою (2) необхідно задати початкові умови

$$\begin{gathered}[\hat{v}^{-}_{0,0,0,0};\hat{v}^{+}_{0,0,0,0}]\subseteq[z^{-}_{0,0,0,0};z^{+}_{0,0,0,0}],...,[\hat{v}^{-}_{1,d-1,1,0};\hat{v}^{+}_{1,d-1,1,0}]\subseteq[z^{-}_{1,d-1,1,0};z^{+}_{1,d-1,1,0}],...,\\ [\hat{v}^{-}_{d-1,d-1,d-1,d-1};\hat{v}^{+}_{d-1,d-1,d-1,d-1}]\subseteq[z^{-}_{d-1,d-1,d-1,d-1};z^{+}_{d-1,d-1,d-1,d-1}].\end{gathered} \tag{7}$$

для усіх моделей претендентів, то беручи до уваги ще і умови для точності моделі (4) і різні їх структури, то усі моделі- претенденти матимуть такий вигляд :

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}(\lambda_s,[\vec{\hat{V}}])] = [f_1^s([\vec{\hat{V}}])]\cdot\hat{g}_1^s + [f_2^s([\vec{\hat{V}}])]\cdot\hat{g}_2^s + ... + [f_{m_s}^s([\vec{\hat{V}}])]\cdot\hat{g}_{m_s}^s \tag{8}$$

а для їх ідентифікації отримуємо ІСНАР

$$\begin{cases}[\hat{v}^{-}_{0,0,0,0};\hat{v}^{+}_{0,0,0,0}]\subseteq[z^{-}_{0,0,0,0};z^{+}_{0,0,0,0}],...,\\ [\hat{v}^{-}_{d-1,d-1,d-1,d-1};\hat{v}^{+}_{d-1,d-1,d-1,d-1}]\subseteq[z^{-}_{d-1,d-1,d-1,d-1};z^{+}_{d-1,d-1,d-1,d-1}];\\ \\ z^{-}_{i,j,h,k}\le[f_1^s(\vec{\hat{V}})]\cdot\hat{g}_1^s + [f_2^s(\vec{\hat{V}})]\cdot\hat{g}_2^s + \ldots + [f_{m_s}^s(\vec{\hat{V}})]\cdot\hat{g}_{m_s}^s \le z^{+}_{i,j,h,k};\\ i=d,...I,\ j=d,...,J,\ h=d,...,H,\ k=d,...,K.\end{cases} \tag{9}$$

У виразі (8) $f_i^s([\vec{\hat{V}}]) = f_i^s([\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}],...,[\hat{v}_{i,j-d,h,k}],...,[\hat{v}_{i,j,h-1,k}],\vec{u}_{i,j,h,0},...,\vec{u}_{i,j,h,k})$ а $[\vec{\hat{V}}] = [\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}],...,[\hat{v}_{i,j-d,h,k}],...,[\hat{v}_{i,j,h-1,k}]$ - інтервальний вектор з компонентами, які означають інтервальні оцінки модельованої характеристики. При чому, на початкових дискретах ці інтервали є виміряними, а в подальшому їх обчислюємо на основі інтервальної різницевої схеми у вигляді (8). Математичний вираз у вигляді (8) називаємо інтервальною дискретною моделлю об'єкта, яку налаштовуємо на основі спостережень за модельованою характеристикою об'єкта.

Якщо у ІСНАР (9) зафіксувати структуру моделі, тобто поточний вектор базисних функцій, то з її розв'язку можемо отримати невідомі оцінки $\vec{\hat{g}}^s$ параметрів моделі. Враховуючи високу обчислювальну складність розв'язування цієї системи (комбінаторну), на практиці, обчислюють тільки точкові оцінки параметрів $\vec{\hat{g}}^s$. При цьому процес оцінювання трансформують до розв'язування такої оптимізаційної задачі:

$$\delta(\lambda_s,\vec{\hat{g}}_l^s)\xrightarrow{\lambda_s=\{f_1^s([\vec{V}])\cdot g_{l1}^s,f_2^s([\vec{V}])\cdot g_{l2}^s,...,f_{m_s}^s([\vec{V}])\cdot g_{lm_s}^s\}}\min \tag{10}$$

$$(\ m_s\in[I_{\min};I_{\max}],\ f_1^s([\vec{V}]),f_2^s([\vec{V}]),...,f_{m_s}^s([\vec{V}])\in F\ ,$$

$$\hat{g}_{jl}^s\in[g_{jl}^{low};g_{jl}^{up}],\ j=1,...,m,\ l=1,...,S \tag{11}$$

де $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ – кількість структурних елементів s-ї структури інтервальної моделі; $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ - множина потенційних структурних елементів моделі; $g_{li}^{low}, g_{li}^{up}$ - нижнє та верхнє можливе значення кожного параметра моделі.

У виразі (10), показник якості $\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)$ - критеріальна функція, формується із ІСНАР (9) у спосіб, описаний у першому розділі і має такий вигляд

$$\begin{aligned}\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) = & \max_{i=d,...,I, j=d,...,J, h=d,...,H, k=d,...,K} \{ \left| mid(f_1^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{l1}^s + f_2^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{l2}^s + ... \right. \\ & \left. + f_m^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{lm}^s) - mid([z_{i,j,h,k}]) \right| \}\end{aligned} \tag{12}$$

якщо $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \varnothing, \exists i = d,...,I, \exists j = d,...,J, \exists h = d,...,H, \exists k = d,...,K$, або:

$$\begin{aligned}\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) = & \max_{i=d,...,I, j=d,...,J, h=d,...,H, k=d,...,K} \{ wid(f_1^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{l1}^s + f_2^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{l2}^s + ... \\ & + f_m^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{lm}^s) - wid(f_1^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{l1}^s + \\ & + f_2^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{l2}^s + ... + f_m^s([\hat{\vec{V}}]) \cdot \hat{g}_{lm}^s) \cap [z_{i,j,h,k}] \}\end{aligned} \tag{13}$$

якщо $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \varnothing, \forall i = d,...,I, \forall j = d,...,J, \forall h = d,...,H, \forall k = d,...,K$, де $mid(\bullet), wid(\bullet)$ - є операціями визначення центру інтервалу та його ширини, відповідно.

Отже, як бачимо, критеріальна функція $\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)$ оптимізаційної задачі (10), (11) є дискретною і достатньо складною. Її значення можливо обчислити тільки алгоритмічно. Це суттєво ускладнює задачу структурної ідентифікації. Більше того, успішність отримання розв'язку цієї задачі залежить від повноти формування множини структурних елементів $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$.

Також кількість обчислень значень цієї функції в оптимізаційній процедурі (10), (11) визначає її часову обчислювальну складність. Зважаючи на ці факти, у багаточисленних працях запропоновано використати методи випадкового пошуку розв'язку цієї оптимізаційної задачі на основі ПМБК [5,8,9]. Спочатку розглянемо детально цю обчислювальну схему, а потім проаналізуємо її проблемні місця.

Отже, процес розв'язування оптимізаційної задачі (10), (11) складається з чотирьох фаз, які імітують поведінку колонії медоносних бджіл при пошуку найкращих джерел нектару.

Фаза ініціалізації. На цій фазі задаємо основні параметри методу: LIMIT; S; $[I_{\min}; I_{\max}]$; mcn = 0 – поточний номер ітерації; MCN – загальна кількість ітерацій та множину структурних елементів F, а також випадковим чином (на основі рівномірного закону розподілу ймовірностей) формуємо початкову множину $\Lambda_0$ (з потужністю S) структур $\lambda_s$ із набору структурних елементів $F$.

Фаза робочих бджіл. Для зручності оперування структурними елементами, множину всіх структурних елементів $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ пронумеруємо за допомогою десяткових чисел і подамо у таблиці 1.

Таблиця 1.

**Кодування структурних елементів**

| № | Структурний елемент |
|---|---|
| 1 | $f_1([\vec{V}])$ |
| 2 | $f_2([\vec{V}])$ |
| … | … |
| m | $f_m([\vec{V}])$ |

В такому разі, кожен структурний елемент із множини $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ кодується десятковим кодом, який наведено в таблиці 1. Тоді, кожну структуру $\lambda_s$ при організації обчислень та формуванні структур замінюємо набором десяткових чисел.

В основі алгоритмів маніпуляції структурами ІДМ на підставі ПМБК є ряд операторів. Ці оператори реалізують чітко окреслені процедури ПМБК, але над структурами ІДМ, на відміну від класичних АБК.

Фаза робочих бджіл в ПМБК, в методі структурної ідентифікації ІДМ, означає перетворення поточних структур в нові. При цьому оператор $O(\Lambda_{mcn}, F)$ , здійснює перетворення структури ІДМ у вигляді (8), на підставі правил ПМБК, пов'язаних із процедурами дослідження робочими бджолами околу відомого джерела нектару. По суті методу структурної ідентифікації, на поточній ітерації реалізації, оператор $O(\Lambda_{mcn}, F)$ на основі кожної з структур $\lambda_s$ ІДМ формує по одній «новій» структурі $\lambda'_s$ , яка є близькою до поточної в сенсі співпадання більшості їх структурних елементів.

Отже, оператор $O(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснює перетворення кожного елементу множини $\Lambda_{mcn}$ поточних структур $\lambda_s$, на mcn-тій ітерації у множину $\Lambda'_{mcn}$ структур $\lambda'_s$. Нові структури $\lambda'_s$ для кожної поточної формуємо випадковим вибором елементів із множини $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]),..., f_m([\vec{V}])\ \}$ та заміни частини елементів, також обраних випадково у поточній структурі $\lambda_s$. При цьому, у кожному випадку використовуємо рівномірний закон розподілу ймовірності вибору елементів. Тут важливим питанням є: скільки елементів у поточній структурі необхідно замінити? З цією метою у ряді праць запропоновано увести змінну $n_s$, значення якої задає кількість елементів поточної структури $\lambda_s$ ІДМ, які потрібно замінити іншими структурними елементами. При цьому приймається така гіпотеза: «значення $n_s$ пропорційно залежне від значення критеріальної функції $\delta(\lambda_S, \hat{\hat{g}}_l^S)$ для фіксованої структури». Отже, чим більше значення критеріальної функції $\delta(\lambda_S, \hat{\hat{g}}_l^S)$ при фіксованій структурі ІДМ, тим більше елементів цієї структури необхідно замінити. Іншу умову, яку необхідно урахувати при обчисленні значення змінної $n_s$, це можлива загальна кількість елементів у поточній структурі, яка переважно є різною для різних структур, але задана в межах інтервалу $m_S \in [I_{\min}; I_{\max}]$. Спираючись на ці припущення та обмеження, отримаємо один із можливих виразів для обчислення значення $n_s$:

$$n_s = \begin{cases} \operatorname{int}\left(\left(1 - \dfrac{\min\left\{\delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \middle| s = 1\ldots S\right\}}{\delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s)}\right) \cdot m_s\right), \\ \quad if\ \delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \neq \min\left\{\delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \middle| s = 1\ldots S\right\}\ and\ n_s \neq 0; \\ 1, \quad if \quad \delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) = \min\left\{\delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \middle| s = 1\ldots S\right\}\ or\ n_s = 0. \end{cases} \tag{14}$$

де $m_s$ - загальна кількість елементів у поточній структурі.

Детальніше обґрунтування формули (14), наведено у праці [1]. Зазначена фаза завершується попарною селекцію, для вибору кращої структури з поточної та згенерованої. Для цього використовуємо оператор попарної селекції із пари структур $\lambda_s$, $\lambda'_s$:

$$D_1(\lambda_s, \lambda'_s) : \lambda_s^1 = \begin{cases} \lambda_s, якщо\ \delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \leq \delta(\lambda'_s, \hat{\hat{g}}_l^s)_s) \\ \lambda', якщо\ \delta(\lambda_s, \hat{\hat{g}}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \end{cases} \tag{15}$$

Оператором $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ обираємо «кращі» структури попарним порівнянням із поточних множин $\Lambda_{mcn}$, $\Lambda'_{mcn}$ і таким чином отримуємо множину структур першого ряду формування $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1$.

Фаза бджіл дослідників. В ПМБК є процес, коли бджоли-дослідники обирають (за ймовірністю) нові джерела нектару в околі поточних. В контексті задачі структурної ідентифікації це означає, що необхідно згенерувати певну кількість нових структур на основі існуючої множини відібраних структур, сформованої на попередній фазі. Формування нових структур в «околі» існуючих $\lambda_s^1$ означає внесення незначних змін в набір структурних елементів кожної із поточних структур. Для виконання цієї процедури спочатку необхідно для кожної структури $\lambda_s^1$ із множини $\Lambda_{mcn}^1$ визначити кількість $R_s$ структур, які будуть згенеровані на її основі. Зазначений показник $R_s$ у контексті поведінкової моделі бджолиної колонії визначає кількість бджіл-дослідників, які обрали відоме джерело-нектару. Характеристикою розміщення джерела нектару (його координатами) в даному випадку є поточна структура $\lambda_s^1$. Для обчислення кількості $R_s$ ймовірних структур, сформованих на основі поточної, приймаємо таке припущення: кількість бджіл-дослідників, що летить в окіл джерела нектару, про яке повідомила робоча бджола, прямопропорційно залежить від його якості.

Отже цей показник має ймовірнісний характер і ґрунтується на обчисленні для кожного поточного джерела нектару ймовірності того, що група бджіл-дослідників обере саме окіл s–того джерела нектару. Таким чином, для обчислення ймовірної кількості новосформованих структур ІДМ на основі поточної структури спочатку для кожної структури обчислюємо цю ймовірність $P_s(\lambda_s^1)$ на підставі якості кожної із поточних структур, яка як відомо є значенням критеріальної функції $\delta(\lambda^1{}_s, \hat{\hat{g}}_l^s)$ оптимізаційної задачі (10), (11):

$$P_s(\lambda_s^1) = \frac{1}{\delta(\lambda^1{}_s, \hat{\hat{g}}_l^s) \cdot \sum_{s=1}^{S} \frac{1}{\delta(\lambda^1{}_s, \hat{\hat{g}}_l^s)}}, s = 1...S-1. \tag{16}$$

Тоді, на підставі цієї ймовірності, обчислюємо ймовірні значення кількості «нових» структур моделей, які потрібно сформувати на основі кожної поточної (відомої) структури $\lambda_s^1$ за такою формулою:

$$R_s = ToInt(P_{s-1}(\lambda_{s-1}^1) \cdot S), \quad s = 2...S, \quad R_1 = 0. \tag{17}$$

Далі на цій фазі використовуємо оператор $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$, який здійснює перетворення кожної структури відповідно до процедури в ПМБК «дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками», подібно як на фазі робочих бджіл. Тільки на відміну від зазначеної фази, де формувалася одна структура в околі поточної, в цьому випадку кількість структур навколо поточної визначається виразом (17) на основі ймовірності, обчисленої за виразом (16).

Отже, можемо стверджувати, що оператор $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ подібний до оператора $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ і означає перетворення кожної структури $\lambda_s^1$ з множини структур $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1$ першого ряду формування, згенерованих на $mcn$ ітерації методу, у множини структур $\Lambda'_s$ (де $s = 1..S$). Його подібність полягає в тому, що як і у випадку застосування оператора $O(\Lambda_{mcn}, F)$ на фазі робочих бджіл ПМБК, на цій фазі нові $R_s$ структур $\lambda_s^1$ для кожної поточної формуємо випадковим вибором елементів із множини $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ та заміни частини елементів у поточній структурі $\lambda_s^1$ також обраних випадково. При цьому, у кожному випадку використовуємо рівномірний закон розподілу ймовірності вибору елементів, а кількість $n_s$ елементів у поточній структурі які необхідно замінити визначаємо за формулою (14), враховуючи якість $\delta(\lambda^1{}_s, \hat{\hat{g}}_l^s)$ кожної із поточних структур.

На завершальному етапі цієї фази проводимо групову (на відміну від випадку фази робочих бджіл, де проводили попарну селекцію) селекцію «кращої» структури із поточної $\lambda_s^1$ та сформованої в її околі множини $\Lambda'_s = \{\lambda_1 ... \lambda_r ... \lambda_{Rs}\}$. При цьому спираємося на обчислені значення критеріальної функції задачі (10), (11). З цією метою використовуємо оператор групової селекції $D_2(\lambda_s^1, \Lambda_s^{'})$, який реалізує процес синтезу множини «кращих» структур ІДМ $\Lambda_{mcn}^2$ із поточних множин $\Lambda_{mcn}^{'}$ та $\Lambda_{mcn}^{''}$ у спосіб селекції структур $\lambda_s^2$ за показниками якості, де $\Lambda_{mcn}^{''} = \{\Lambda_1^{'} \cup \Lambda_2^{'} ... \cup ... \Lambda_s^{'} ... \cup \Lambda_S^{'}\}, s = 1..S$ Цей оператор, виконує процедури порівняння якості структур за аналогією оператора $D_1(\lambda_s, \lambda_s^{'})$ (15), але на відміну від останнього, обирає по одній структурі із кожної групи, сформованої для кожної із поточних структур.

Таким чином, в результаті застосування цього оператора отримуємо множину структур ІДМ другого ряду формування $\Lambda_{mcn}^2$ і при цьому кількість обраних структур завжди залишається рівною $S$. З метою уникнення зациклень при попаданні в локальний мінімум критеріальної функції мети оптимізаційної задачі (10), (11) використовуємо процедури ПМБК на фазі бджіл розвідників.

Зазначена фаза ПМБК необхідна для обрання нових джерел нектару внаслідок вичерпання поточних джерел нектару. В методі структурної ідентифікації ця фаза реалізується у спосіб формування нових структур випадковим чином. При цьому усі елементи структури обираються випадково із множини $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$, точно так як на фазі ініціалізації.

Саме для цього для кожної поточної структури $\lambda_s$ на фазі ініціалізації і на наступних фазах формування нових структур уводимо лічильник Limits, зміна значення якого в ПМБК моделює процес зменшення кількості нектару відповідно до процедури виявлення вичерпаних джерел нектару.

Таким чином, для розв'язування виходу із локальних мінімумів критеріальної функції оптимізаційної задачі (10), (11), значення лічильника $Limit_s$ збільшуємо на «1» кожного разу, якщо під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася», та обнуляємо - в іншому випадку. Як вже зазначалося, збільшення значення лічильника $Limit_s$ моделює процес вичерпування джерела нектару. При цьому константа LIMIT, значення якої встановлюємо як один із параметрів методу структурної ідентифікації перед його застосуванням, слугує для побудови критерію вичерпаності джерела нектару в ПМБК, тобто в контексті розв'язування задачі (10), (11) це означає відмову від подальшої модифікації цієї структури. Таким чином, кожна структура $\lambda_s^2$ моделі другого ряду формування, для якої виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$ $\geq$ LIMIT, вважатиметься локальним мінімумом.

Генерування нових структур у такому випадку здійснюємо оператором $O_N = (F, I_{\min}, I_{\max})$, який випадковим чином генерує «нову» структуру $\lambda_s^2$ з множини F всіх структурних елементів, де кількість структурних елементів для цієї структури визначається також випадково, вибором відповідного числа з інтервалу $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$. Варто зазначити, що у всіх випадках використовуємо рівномірний закон розподілу при виборі нових елементів. У «класичній» реалізації цього методу кількість згенерованих структур на цій фазі є усього декілька відсотків від значення S усіх поточних структур (усіх робочих бджіл). У деяких реалізаціях цього методу для задач оптимізації також використовують динамічний розподіл кількості бджіл різних типів на різних фазах.

Перейдемо тепер до аналізу проблемних місць в реалізації вище розглянутого методу. Як бачимо із вище наведеного опису, на фазі ініціалізації формуємо множину структурних елементів F, а на інших фазах здійснюємо вибір цих елементів для формування структур ІДМ. При цьому, на кожній фазі структури ІДМ формуємо випадково, або заміну структурних елементів здійснюємо також випадково, виходячи з умов задачі. За основу випадкового вибору елементів структури з множини F покладено рівномірний закон розподілу. Це означає, що будь-який елемент структури рівноймовірно може бути обраний для формування структури як на початкових фазах так і на наступних фазах. Ці процедури є ключовими з точки зору часової складності реалізації методу, оскільки якість сформованих структур безпосередньо залежить від «успішності» обрання того чи іншого елемента із множини $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$. З іншого боку, набір структурних елементів різницевої схеми (8) визначається властивостями модельованого об'єкта і множина $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ структурних елементів, з яких синтезується ця різницева схема, повинна вміщувати характерні елементи, які будуть включені до кінцевої моделі об'єкта.

Спираючись на ці факти, можемо висловити гіпотезу: «про необхідність встановлення пріоритетності обрання структурних елементів із множини $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ для формування оптимальної, в сенсі задачі (10), (11), структури ІДМ (8), що у підсумку забезпечить зниження обчислювальної складності методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів. Скоріше всього, що ця пріоритетність буде залежати від історії «успішності» вибору того чи іншого елемента множини структурних елементів на попередніх ітераціях.

Таким чином, вище викладені міркування, на відміну від відомого методу, вимагають адаптивного налаштування процедур вибору структурних елементів із множини $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}]) \}$ при формуванні нових структур.

**Метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів із адаптивним налаштуванням вибору структурних елементів**

Основне завдання при реалізації методу на основі висловленого припущення «про необхідність встановлення пріоритетності обрання структурних елементів із множини на основі їх історії «успішності» вибору», полягає у визначенні та формальному представлені історії «успішності» вибору.

Варто зазначити, що «успішність» вибору елементів структури апріорі має ймовірнісну природу. Отже для опису цих процедур вибору у відомому методі використаємо ймовірнісний підхід.

Нехай, маємо повну множину структурних елементів $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}])\ \}$ для реалізації вищеописаного методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів на основі ПМБК. Повнота сформованої множини означає, що їй належать елементи, які будуть складати оптимальну, в сенсі задачі (10), (11), структуру ІДМ.

Поставимо у відповідність кожному структурному елементу $f_i([\vec{V}]) \in F$ ймовірність його вибору $P_i(f_i([\vec{V}])) = P_i$ із усієї множини $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}])\ \}$. При цьому, як було зазначено вище, ймовірність вибору будь-якого елемента без наявної історії вибору є однаковою для усіх елементів, тобто:

$$P_1 = P_2 = ... = P_i = ... = P_m = \frac{1}{m} \tag{18}$$

Як можемо бачити з вищеописаного методу структурної ідентифікації, історія успішності вибору структурних елементів відслідковується на двох фазах ПМБК. Спочатку на фазі робочих бджіл, коли оператором $O(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснюємо перетворення структури ІДМ у вигляді (8), відповідно до процедур ПМБК. А саме процедури «дослідження робочими бджолами околу відомого джерела нектару» у спосіб заміни випадковим чином певної кількості елементів поточної структури, такою ж кількістю елементів із множини $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}])\ \}$. Також історія успішності вибору фіксується на фазі бджіл дослідників. У цьому випадку, оператором $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ перетворюємо структури відповідно до процедури ПМБК «дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками», подібно як на фазі робочих бджіл у спосіб заміни певної кількості структурних елементів. Тільки на відміну від фази робочих бджіл ПМБК, на якій формувалася одна структура в околі поточної, у випадку цієї фази, кількість структур навколо поточної визначається виразами (16), (17). В обох випадках кількість елементів $n_s$ для заміни у кожній структурі ІДМ визначається формулою (14).

Якщо заміна відповідних елементів виявилася успішною, тобто, коли значення критеріальної функції $\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)$ оптимізаційної задачі (10), (11), зменшується, то кожному із цих обраних із $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}])\ \}$ $n_s$-елементів $f_i([\vec{V}])$ підвищуємо ймовірність вибору в майбутньому, на підставі частотного методу обчислення ймовірності, а саме:

$$P_i = \begin{cases} P_i + \dfrac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\dfrac{\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}\right), якщо:\ \delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s) \wedge (P_i < \dfrac{1}{m_s}) \\ P_i, якщо\ \ \delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) \le \delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s) \vee (P_i \ge \dfrac{1}{m_s}) \end{cases}, \tag{19}$$

де $\lambda_s$, $\lambda'_s$ - означає поточну та новозгенеровану структури, відповідно; символи $\wedge$, $\vee$ -означають операції кон'юнкції та диз'юнкції, відповідно; $\Pi(\dfrac{\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}) \in [1,2]$ - значення функції «премії» за успішність вибору даного елемента структури.

При цьому, у випадку обчислення ймовірності $P_i$ за формулою

$$P_i = P_i + \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}\right), якщо:\ \delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s) \wedge (P_i < \frac{1}{m_s}), \tag{20}$$

тобто у випадку успішності вибору $n_s$ елементів з множини $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), ..., f_m([\vec{V}])\ \}$, проводимо перерахунок ймовірності вибору для усіх інших структурних елементів, які не використовувалися для новозгенерованої структури $\lambda'_s$. З цією метою використовуємо таку формулу:

$$P_j = P_j - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_s}\left(\dfrac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\dfrac{\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{\vec{g}}_l^s)}\right)\right)}{m - n_s}\right), j \ne i, \tag{21}$$

Тепер перейдемо до обґрунтування запропонованих виразів. У виразі (19) множник $\frac{1}{m \cdot n_s}$ означає збільшення поточного значення ймовірності вибору елемента структури із урахуванням частоти його успішного, в сенсі оптимізаційної задачі (10), (11), включення в структуру ІДМ (8). Оскільки таких елементів може бути $n_s$ підчас виконання обчислювальної процедури на фазі робочих бджіл чи фазі бджіл дослідників, тому цей внесок у підвищення ймовірності вибору елементів, розподіляється між усіма $n_s$ елементами. Далі, у цій же формулі, множник $\Pi(\frac{\delta(\lambda_s,\hat{\hat{g}}_l^s)}{\delta(\lambda'_s,\hat{\hat{g}}_l^s)})$ є значенням функції «премії», який визначає наскільки успішним в сенсі розв'язування оптимізаційної задачі (10), (11) на даній ітерації було включення цього елемента у новосформовану структуру ІДМ (8). Тобто, чим менше значення критеріальної функції оптимізаційної задачі (10), (11) забезпечує новосформована структура моделі, тим більше значення цього множника за успішність вибору елемента чи декількох елементів структури. Верхню межу обмеження на значення цього множника обираємо емпірично. Варто зазначити, що залежність $\Pi(\frac{\delta(\lambda_s,\hat{\hat{g}}_l^s)}{\delta(\lambda'_s,\hat{\hat{g}}_l^s)})$ вимагає окремого дослідження з метою встановлення найбільш прийнятної з точки зору зменшення обчислювальної складності усього методу.

Обмеження у вигляді $P_i < 1/m_s$ у формулі (19) необхідне, щоб уникнути зациклювання обчислювальних процедур на основі ПМБК на виборі окремих елементів. З іншого боку, при формуванні поточної структури ІДМ (8) приймаємо гіпотезу, що усі $m_s$ елементи цієї структури мають однаковий внесок у її якість. Принаймні встановити чи надати перевагу певним елементам практично складно. Тому вважатимемо, що у поточній структурі їх внесок є однаковим. З цих міркувань обрано максимальну ймовірність $\frac{1}{m_s}$. Формулу (21) отримуємо із міркувань, що сума ймовірностей вибору усіх елементів із множини $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]),..., f_m([\vec{V}])\ \}$ дорівнює 1.

Спираючись на вище наведені міркування та на опис основних процедур у методі структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, отримаємо нову модифікацію цього методу із адаптивним налаштуванням вибору структурних елементів. При цьому сконцентруємося тільки на описі відмінностей. Наведені міркування щодо адаптивного налаштуванням процедур вибору структурних елементів при формуванні нових моделей претендентів стосуються тільки двох фаз ПМБК: фази робочих бджіл та фази бджіл-дослідників, а також фази ініціалізації. Тому розглянемо процедури тільки для цих фаз.

Отже, на фазі ініціалізації додатково до вищеописаних дій, встановлюємо для кожного елемента множини структурних елементів $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]),..., f_m([\vec{V}])\ \}$ ймовірність вибору будь-якого елемента на основі формули (18). Далі, на фазі робочих бджіл в процесі виконання оператора $O(\Lambda_{mcn}, F)$, який здійснює перетворення структури ІДМ (8) у спосіб заміни $n_s$ структурних елементів, випадковим чином обраних із множини $F = \{\ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]),..., f_m([\vec{V}])\ \}$ ураховуємо ймовірності вибору $P_1, P_2,..., P_i,..., P_m$ для кожного елемента і таким чином формуємо нові структури для кожної поточної. У випадку зменшення значення критеріальної функції $\delta(\lambda'_s,\hat{\hat{g}}_l^s)$ задачі (10), (11) для новосформованої структури $\lambda'$, для обраних $n_s$- елементів $f_i([\vec{V}])$ із множини $F$ обчислюємо значення ймовірності $P_i$ за формулою (20). Після цього, за формулою (21) перераховуємо значення ймовірностей $P_j, j \neq i$, для решти $m - n_s$ елементів із набору $F$. Усі решта обчислювальних операцій на цій фазі залишаються незмінними. Таким чином отримаємо множину нових структур і для кожного елемента множини структурних елементів новий розподіл ймовірностей вибору з урахуванням історії успішності їх використання.

Подібні зміни щодо обчислень вносимо також на фазі бджіл дослідників ПМБК. Кожен раз, коли використовуємо оператор $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$, який здійснює перетворення структури відповідно до процедури ПМБК - дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками, у спосіб випадкової заміни $n_s$ структурних елементів (подібно як на фазі робочих бджіл), обраних із множини $F$, також ураховуємо при випадковому виборі поточні ймовірності $P_1, P_2,..., P_i,..., P_m$ для кожного елемента і таким чином формуємо нові структури $\lambda'_s$ для кожної поточної $\lambda_s$. Коли, цей вибір елементів успішний, тобто забезпечує зменшення значення критеріальної функції $\delta(\lambda'_s, \hat{\hat{g}}_l^s)$ задачі (10), (11) для новосформованої структури $\lambda'_s$, то для цих $n_s$- елементів $f_i\ ([\vec{V}])$ із множини $F$ обчислюємо значення ймовірності $P_i$ за формулою (20). Тоді також обчислюємо нові значення ймовірностей $P_j$, $j \neq i$ за формулою (21) для решти $m - n_s$ елементів із набору $F$ Решта обчислювальних операцій на цій фазі залишаються незмінними.

Таким чином, наведені зміни в обчисленнях на кожній із зазначених фаз ПМБК дають можливість адаптивно налаштовувати процедури вибору структурних елементів для ІДМ, виходячи із обчислення на кожній ітерації ймовірностей вибору $P_1, P_2, ..., P_i, ..., P_m$ для кожного елемента. Такий підхід встановлює приорітетність для вибору одних структурних елементів над іншими.

Для ілюстрації функціонування запропонованої схеми, розглянемо приклад. Нехай для структурної ідентифікації сформовано множину структурних елементів із 10 елементів $F = \{\ f_1\ ([\vec{V}]), f_2\ ([\vec{V}]), ..., f_{10}([\vec{V}])\ \}$. Тоді, для кожного елемента на фазі ініціалізації ймовірності вибору: $P_1 = P_2 = ... = P_i = ... = P_{10} = 0{,}1$ . Припустимо, що кількість згенерованих структур на фазі ініціалізації S=5, кожна з яких має по 4 елементи. Також припустимо, що на фазі робочих бджіл ПМБК було сформовано нових 5 структур у спосіб випадкової заміни одного ( $n_s = 1$ ) із елементів у кожній структурі.

Нехай, у результаті обчислення значення критеріальної функції задачі (10), (11) маємо такий результат: для випадково вибраного елемента $f_2\ ([\vec{V}]) - \delta(\lambda'_{s=1}, \hat{\hat{g}}_l^{s=1}) < \delta(\lambda_{s=1}, \hat{\hat{g}}_l^{s=1})$ та $\dfrac{\delta(\lambda_{s=1}, \hat{\hat{g}}_l^{s=1})}{\delta(\lambda'_{s=1}, \hat{\hat{g}}_l^{s=1})} = 1{,}2$, $\Pi(\dfrac{\delta(\lambda_{s=1}, \hat{\hat{g}}_l^{s=1})}{\delta(\lambda'_{s=1}, \hat{\hat{g}}_l^{s=1})}) = 1{,}2$; для випадково вибраного елемента $f_1\ ([\vec{V}]) - \delta(\lambda'_{s=2}, \hat{\hat{g}}_l^{s=2}) > \delta(\lambda_{s=2}, \hat{\hat{g}}_l^{s=2})$; для випадково вибраного елемента $f_4\ ([\vec{V}]) - \delta(\lambda'_{s=3}, \hat{\hat{g}}_l^{s=3}) < \delta(\lambda_{s=3}, \hat{\hat{g}}_l^{s=3})$ та $\dfrac{\delta(\lambda_{s=3}, \hat{\hat{g}}_l^{s=3})}{\delta(\lambda'_{s=3}, \hat{\hat{g}}_l^{s=3})} = 1{,}1$, $\Pi(\dfrac{\delta(\lambda_{s=3}, \hat{\hat{g}}_l^{s=3})}{\delta(\lambda'_{s=3}, \hat{\hat{g}}_l^{s=3})}) = 1{,}1$; для випадково вибраного елемента $f_5\ ([\vec{V}]) - \delta(\lambda'_{s=4}, \hat{\hat{g}}_l^{s=4}) > \delta(\lambda_{s=4}, \hat{\hat{g}}_l^{s=4})$; для випадково вибраного елемента $f_2\ ([\vec{V}]) - \delta(\lambda'_{s=5}, \hat{\hat{g}}_l^{s=5}) < \delta(\lambda_{s=5}, \hat{\hat{g}}_l^{s=5})$ та $\dfrac{\delta(\lambda_{s=5}, \hat{\hat{g}}_l^{s=5})}{\delta(\lambda'_{s=5}, \hat{\hat{g}}_l^{s=5})} = 1{,}1$, $\Pi(\dfrac{\delta(\lambda_{s=5}, \hat{\hat{g}}_l^{s=5})}{\delta(\lambda'_{s=5}, \hat{\hat{g}}_l^{s=5})}) = 1{,}1$. Тоді в результаті формування нових структур на даній фазі робочих бджіл послідовно використаємо формули (19) та (21), відповідно, і отримаємо такі розподіли.

Після формування першої структури (s=1): $P_2 = 0{,}1 + 0{,}1 \cdot 1{,}2 = 0{,}22$, ймовірності для решти елементів $P_1 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = P_j = 0{,}1 - \dfrac{0{,}12}{10-1} = 0{,}0867$. Після формування другої структури ($s = 2$) – розподіл не змінюється. Після формування третьої структури ($s = 3$): $P_4 = 0{,}0867 + 0{,}1 \cdot 1{,}1 = 0{,}1967$, ймовірності для решти елементів $P_2 = 0{,}22 - \dfrac{0{,}11}{9} = 0{,}20778$, $P_1 = P_3 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} =\ 0{,}0867 - \dfrac{0{,}11}{9} = 0{,}0745$. Після формування четвертої структури ($s = 4$) – розподіл не змінюється. Після формування п'ятої структури ($s = 5$): $P_2 = 0{,}20778 + 0{,}11 = 0{,}31778$, $P_4 = 0{,}1967 - \dfrac{0{,}11}{9} = 0{,}1845$ ймовірності для решти елементів $P_1 = P_3 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} =\ 0{,}0745 - \dfrac{0{,}11}{9} = 0{,}06228$.

Таким чином, в результаті проведених обчислень на фазі робочих бджіл початковий рівномірний розподіл ймовірностей вибору елементів із множини $F = \{\ f_1\ ([\vec{V}]), f_2\ ([\vec{V}]), ..., f_{10}([\vec{V}])\ \}$ для подальшого формування структур змінюється і набуває такого вигляду: $P_1 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10} = 0.06228\ \ P_2 = 0.31778, = P_4 = 0.1845$.

Ефективність запропонованого методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів із адаптивним налаштуванням вибору структурних елементів буде досліджено на конкретних прикладах побудови інтервальних дискретних моделей. Оскільки, у випадку використання інтервальних даних, задача структурної ідентифікації дискретних моделей належить до класу NP-складних, у подальших дослідженнях планується перевірка обчислювальної складності запропонованого підходу на тестових наборах даних.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Розглянуто задачу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів та метод її розв'язування на основі поведінкової моделі бджолиної колонії. Досліджено особливості реалізації цього методу. Встановлено, що під час формування структур на різних фазах обчислювальної схеми методу здійснюємо вибір із множини елементів випадково і заміну структурних елементів здійснюємо також випадково. В основі такого вибору покладено рівномірній закон розподілу. Це означає, що будь-який елемент структури рівно ймовірно може бути обраний для формування структури як на початкових фазах так і на наступних фазах. Також показано, що ці процедури є ключовими з точки зору часової складності реалізації методу, оскільки якість сформованих структур безпосередньо залежить від «успішності» обрання того чи іншого елемента із множини елементів. З іншого боку, набір структурних елементів різницевої схеми, яка є моделлю об'єкта визначається властивостями модельованого об'єкта і множина структурних елементів, з яких синтезується ця різницева схема, повинна вміщувати характерні елементи, які будуть включені до кінцевої моделі об'єкта.

Спираючись на ці факти, сформульовано задачу про необхідність встановлення пріоритетності обрання структурних елементів із множини для формування оптимальної, в сенсі задачі структурної ідентифікації структури ІДМ, що у підсумку забезпечить зниження обчислювальної складності методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів.

**Література**

1. Дивак, М. П. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних [Текст] : монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2018. – 220 с.
2. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. - Т. : Економ. думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.
3. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Парплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.
4. Dyvak M., Porplytsya N., Borivets I. and Shynkaryk M., "Improving the computational implementation of the parametric identification method for interval discrete dynamic models," 2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2017, pp. 533-536, doi: 10.1109/STC-CSIT.2017.8098844.
5. Dyvak M., "Parameters Identification Method of Interval Discrete Dynamic Models of Air Pollution Based on Artificial Bee Colony Algorithm," 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2020, pp. 130-135, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208972.
6. Camazine S., Sneyd J., "ABCA A model of collective nectar source by honey bees: Self-organization through simple rules",Journal of Theoretical Biology,No 149,pp. 547–571, 1991
7. Alefeld G., Mayer G, "Interval analysis: theory and applications",Journal of Computational and Applied Mathematics, No 121,pp. 421-464.2000.
8. Karaboga, D.; Kaya, E. Estimation of number of foreign visitors with ANFIS by using ABC algorithm. Soft Comput. 2019, 24, 7579–7591.
9. Karaboga, D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Technical Report—TR06; Technical Report; Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005.
10. Stepashko V., Moroz O., "Hybrid searching GMDH-GA algorithmfor solving inductive modeling task", Proceedings of the First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP'2016),pp. 350-355.2016.
11. Степашко В. С., Елементи теорії індуктивного моделювання.Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія, Кол. Авторів.Київ, Україна: Наукова думка, 2010,с. 481-496.
12. Dyvak, M.; Porplytsya, N.; Maslyiak, Y.; Kasatkina, N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. In Proceedings of the 2017 14th International Conference, The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017; pp. 50–54.
13. Dyvak M., Melnyk A., Rot A., Hernes M., Pukas A., "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022
14. Дивак М., Манжула В., Мельник А., Пукас А., «Метод структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей статичних об'єктів», ІТКІ, вип. 54, вип. 2, с. 103–114, Чер 2022.

15. Dyvak M., Melnyk A., Pukas A., Dostalek L., Control of mathematical modeling process of dynamics of harmful substances concentrations on the basis of ontological approach // Computational Problems of Electrical Engineering, 2022. – Vol. 12, Issue 1, P. 7–16.

## References

1. Dyvak, M. P. Identyfikatsiia dyskretnykh modelei system z rozpodilenymy parametramy na osnovi analizu intervalnykh danykh [Tekst] : monohrafiia / M. P. Dyvak, N. P. Porplytsia, T. M. Dyvak. – Ternopil: Ekonomichna dumka TNEU, 2018. – 220 s.
2. Dyvak M. P. Zadachi matematychnoho modeliuvannia statychnykh system z intervalnymy danymy : monohrafiia / M. P. Dyvak. - T. : Ekonom. dumka TNEU, 2011. - 215 c.
3. Dyvak M. P. Prykladni zadachi strukturnoi ta parametrychnoi identyfikatsii intervalnykh modelei skladnykh obiektiv [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / M. P. Dyvak, A. V. Pukas, N. P. Parplytsia, A. M. Melnyk. - Ternopil : Universytetska dumka, 2021. - 212 s.
4. Dyvak M., Porplytsya N., Borivets I. and Shynkaryk M., "Improving the computational implementation of the parametric identification method for interval discrete dynamic models," 2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2017, pp. 533-536, doi: 10.1109/STC-CSIT.2017.8098844.
5. Dyvak M., "Parameters Identification Method of Interval Discrete Dynamic Models of Air Pollution Based on Artificial Bee Colony Algorithm," 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2020, pp. 130-135, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208972.
6. Camazine S., Sneyd J., “ABCA A model of collective nectar source by honey bees: Self-organization through simple rules”,Journal of Theoretical Biology,No 149,pp. 547–571, 1991
7. Alefeld G., Mayer G, “Interval analysis: theory and applications”,Journal of Computational and Applied Mathematics, No 121,pp. 421-464.2000.
8. Karaboga, D.; Kaya, E. Estimation of number of foreign visitors with ANFIS by using ABC algorithm. Soft Comput. 2019, 24, 7579–7591.
9. Karaboga, D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Technical Report—TR06; Technical Report; Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005.
10. Stepashko V., Moroz O., “Hybrid searching GMDH-GA algorithmfor solving inductive modeling task”, Proceedings of the First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP’2016),pp. 350-355.2016.
11. Stepashko V. S. ,Elementy teorii induktyvnoho modeliuvannia. Stan ta perspektyvy rozvytku in-formatyky v Ukraini: monohrafiia, Kol. Avtoriv.Kyiv, Ukraina: Naukova dumka, 2010, s. 481-496[in Ukrainian].
12. Dyvak, M.; Porplytsya, N.; Maslyiak, Y.; Kasatkina, N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. In Proceedings of the 2017 14th International Conference, The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017; pp. 50–54.
13. Dyvak M., Melnyk A., Rot A., Hernes M., Pukas A., "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022
14. Dyvak M., Manzhula V., Melnyk A., Pukas A., «Metod strukturnoi identyfikatsii neliniinykh intervalnykh modelei statychnykh obiektiv», ITKI, vyp. 54, vyp. 2, s. 103–114, Cher 2022.
15. Dyvak M., Melnyk A., Pukas A., Dostalek L., Control of mathematical modeling process of dynamics of harmful substances concentrations on the basis of ontological approach // Computational Problems of Electrical Engineering, 2022. – Vol. 12, Issue 1, P. 7–16.