

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 519.876.5

Н. П. ПОРПЛИЦЯ

Тернопільський національний економічний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕНЕТИЧНОГО ТА «БДЖОЛИНОГО»  
АЛГОРИТМІВ У ЗАДАЧІ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО  
ОПЕРАТОРА

**Анотація.** У праці проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності реалізації генетичного та «бджолиного» методів структурної ідентифікації при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора (IPO) на прикладі побудови математичної моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії виготовлення. Результати порівняльного аналізу показали, що обчислювальна складність реалізації методу структурної ідентифікації IPO на основі алгоритму бджолиної колонії є нижчою у порівнянні із обчислювальною складністю реалізації методу структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів.

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

**Аннотация.** В работе проведен сравнительный анализ вычислительной сложности реализации генетического и «пчелиного» методов структурной идентификации при решении задачи структурной идентификации интервального разностного оператора (ИРО) на примере построения математической модели распределения влажности на поверхности листа гипсокартона на завершающей стадии изготовления. Результаты сравнительного анализа показали, что вычислительная сложность реализации метода структурной идентификации ИРО на основе алгоритма пчелиной колонии ниже по сравнению с вычислительной сложностью реализации метода структурной идентификации на основе генетических алгоритмов.

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

**Abstract.** In the paper, the comparative analysis of the computational complexity of using the genetic and the "bee's" algorithms for structure identification in solving the problem of structure identification of interval difference operator (IDO) for constructing the mathematical models of the distribution of the humidity on the surface of the drywall sheet on the final stage of manufacture was held. The results of the comparative analysis showed, that the computational complexity of the implementation of the method of structure identification IBO based on the bee colonies algorithm is lower than the computational complexity of implementing the method based on genetic algorithms.

**Keywords:** structure identification, difference operator, artificial bee colony algorithm, swarm intelligence, interval data.

## Вступ

У теорії ідентифікації виділяють найбільш складні задачі, які стосуються об'єктів та процесів з розподіленими параметрами [1]. Зокрема, до такого типу процесів відносять технологічний процес сушіння гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення [2].

Для побудови моделей таких об'єктів та процесів потрібно провести два етапи: перший – структурну ідентифікацію моделі, другий – параметричну. Важливо зазначити, що саме проблема структурної ідентифікації моделі є однією із основних проблем теорії ідентифікації систем. Під задачею структурної ідентифікації розуміють теоретичне чи формальне обґрунтування загального вигляду математичної моделі [1].

Зараз існують два основних підходи до вирішення зазначеної проблеми, а саме дедуктивний та індуктивний. *Дедуктивний підхід* передбачає синтез структури моделі виходячи з фізичних міркувань. У випадку побудови моделі об'єкта з розподіленими параметрами із урахуванням неоднорідності середовища, застосування дедуктивного підходу призводить до суттєвого ускладнення математичної моделі, що підвищує часову складність процесу ідентифікації моделі та вимагає значних обчислювальних витрат. Крім того, порівняти на практиці результати моделювання із реальними даними, отриманими за умов, що відповідають умовам моделювання часто є неможливим.

На противагу дедуктивному підходу розвивають методи *індуктивного моделювання* [3-5]. У рамках індуктивного підходу структурна ідентифікація математичної моделі об'єкта з розподіленими параметрами зводиться до синтезу структури у вигляді різницевої схеми (різницевого оператора) та налаштування її параметрів на основі аналізу результатів експерименту. Вибір різницевої схеми як загального вигляду моделі пояснюється тим, що певні елементи фізичної моделі не завжди можливо адекватно інтерпретувати з математичної точки зору.

Крім того, задача структурної ідентифікації суттєво ускладнюється, коли результати експерименту представляють в інтервальному вигляді [6].

Розв'язуванню задачі структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді різницевого оператора (РО) на основі інтервальних даних присвячено ряд публікацій [7,8]. Однак наведені авторами цих статей підходи ґрунтуються на використанні генетичних алгоритмів, які, як відомо, є евристичними та вимагають налаштування цілого ряду параметрів і є малоефективними, коли недостатньо вивчена фізика процесу. Генетичні алгоритми, як і більшість евристичних методів, створені для розв'язку задач із «відкритим» простором пошуку, що є неприйнятним у випадку задачі структурної ідентифікації, яка відноситься до класу задач дискретної оптимізації. Процес адаптації генетичних алгоритмів до

зазначеного класу задач породжує необхідність використання нестандартних операторів схрещування та мутації, котрі будуть «замкненими» у просторі пошуку розв'язків задачі. До того ж використання операторів схрещування та мутації значно підвищує обчислювальну складність задачі чи призводить до появи у популяції недопустимих розв'язків.

Останнім часом для розв'язування задач дискретної оптимізації все ширше використовують такі методи та алгоритми, які ґрунтуються на засадах роевого інтелекту, як, наприклад, алгоритми бджолоїної колонії (АБК). Особливість таких алгоритмів полягає у тому, що вони сконструйовані саме для роботи у «закритих» просторах пошуку, що є характерним для задач дискретної оптимізації. Один із таких методів та алгоритм його реалізації описано у праці [9]. Розглянута задача структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора, який описує процес сушіння гіпсокартону. Разом з тим, при розгляді зазначеного методу не достатньо обґрунтовано переваги явних його переваг з точки зору складності його реалізації у порівнянні із генетичними алгоритмами. Тому метою праці є порівняльний аналіз часової складності та збіжності методів структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора із застосуванням принципів роевого інтелекту та відомих методів, побудованих на основі генетичних алгоритмів.

### Постановка задачі

Розглянемо задачу структурної ідентифікації лінійного різницевого оператора (РО) у такому загальному вигляді [9]:

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

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

де  $\vec{f}^T(\bullet)$  - вектор невідомих базисних функцій, що визначає структуру різницевого оператора;  $v_{i,j,h,k}$  - 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 різницевого оператора.

Слід зазначити, що загальний вигляд РО (1) отримуватимемо на основі аналізу експериментальних даних, які представлено в інтервальному вигляді та отримано для обмеженої кількості часових дискрет за умов різних значень чинників впливу [9]. При цьому вектор оцінок  $\hat{\vec{g}}$  параметрів  $\vec{g}$  та вектор базисних функцій  $\vec{f}^T(\bullet)$  у різницевому операторі (1) отримуватимемо із умов забезпечення заданої точності моделі [6]:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] \in [z_{i,j,h,k}^-, z_{i,j,h,k}^+], \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K \quad (2)$$

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

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

$$i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad h = 1, \dots, H, \quad k = 1, \dots, K. \quad (3)$$

Беручи до уваги те, що всі обчислення в різницевому операторі (3) необхідно проводити із застосуванням правил інтервальної арифметики, РО (3) будемо називати інтервальним різницевим оператором (ІРО) [6].

Складність задачі 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 [9].

Позначимо за  $\lambda_s$  поточну структуру ІРО:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot \hat{g}_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot \hat{g}_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot \hat{g}_{m_s}^s\} \subset \Lambda \quad (4)$$

де  $\{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$  набір структурних елементів, що задає поточну  $S$ -ту структуру ІРО.

Далі введемо наступні умовні позначення:  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$  – кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина усіх структурних елементів,  $F = \{f_1(\vec{v}_{i,j,h,k}, \vec{u}_{i,j,h,k}); \dots; f_l(\vec{v}_{i,j,h,k}, \vec{u}_{i,j,h,k}); \dots; f_L(\vec{v}_{i,j,h,k}, \vec{u}_{i,j,h,k})\}$ , де  $|F| = L$  (потужність множини  $F$ );  $\hat{g}^s$  – вектор відомих значень параметрів, оцінений для поточної структури ІРО на основі методів параметричної ідентифікації, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку [1];  $\Lambda$  – множина усіх можливих структур ІРО.

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури  $\lambda_s$  ІРО у вигляді (3), що задовольняє умови (2), які забезпечують належність інтервальних оцінок прогнозованого значення модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

Варто зазначити, що параметрична ідентифікація в даному випадку є етапом структурної ідентифікації. Як відомо, у випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектора базисних функцій (поточної структури  $\lambda_s$  ІРО) і знаходженні оцінок параметрів ІРО шляхом розв’язування інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [10].

Якість поточної структури ІРО оцінюватимемо за значенням показника  $\delta(\lambda_s)$ , який кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (2). Значення показника  $\delta(\lambda_s)$  обчислюватимемо за допомогою виразів, отриманих у праці [10]:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, k=1, \dots, K} \left\{ \text{mid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{g}^s) - \text{mid}([z_{i,j,h,k}]) \right\}, \quad (5)$$

якщо  $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \emptyset \quad \exists i = 1, \dots, I, \exists j = 1, \dots, J, \exists h = 1, \dots, H, \exists k = 1, \dots, K;$

$$\delta(\lambda_s) = \max_{i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, k=1, \dots, K} \left\{ \text{wid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{g}^s) - \text{wid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,0,h-1,0}], [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{g}^s) \cap [z_{i,j,h,k}] \right\}, \quad (6)$$

якщо  $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \emptyset \quad \forall i=1,\dots,I, \quad \forall j=1,\dots,J, \quad \forall h=1,\dots,H, \quad \forall k=1,\dots,K;$

де  $mid(\bullet)$ ,  $wid(\bullet)$  - операції визначення центру та ширини інтервалів, відповідно.

Вираз (5) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (6) у випадку  $\delta(\lambda_s)=0$  забезпечує виконання умови (2).

Тепер задачу структурної ідентифікації IPO запишемо формально у вигляді задачі знаходження мінімуму функції  $\delta(\lambda_s)$ :

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \tilde{f}_s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \tilde{f}_s(\bullet) \in F \quad (7)$$

Чим менше значення  $\delta(\lambda_s)$ , тим «краща» поточна структура IPO. Якщо  $\delta(\lambda_s) = 0$ , то поточна структура IPO дає можливість побудувати адекватну модель, для якої інтервальні оцінки прогнозованої характеристики належать до інтервалів можливих значень модельованої характеристики.

### III. Критичний аналіз методу структурної ідентифікації моделі об'єкта у вигляді IPO із застосуванням генетичних алгоритмів

Один із *методів структурної ідентифікації моделі на основі генетичних алгоритмів* наведено у праці [7]. При цьому у вказаній праці [7] введено наступні позначення: ген – структурний елемент, який відображає вид базисної функції; хромосома – відображає поточну структуру IPO; популяція – відображає множину структур IPO на поточній ітерації генетичного алгоритму.

На першому кроці реалізації методу структурної ідентифікації, формують набір  $F$  структурних елементів (генів) – компонент вектора базисних функцій  $\tilde{f}^T(\bullet)$ . При цьому припускають, що сформований набір  $F$  структурних елементів гарантовано включає усі елементи шуканої (прийнятої) структури різницевого оператора.

На другому кроці реалізації методу структурної ідентифікації, випадковим чином здійснюють формування поточних структур IPO (хромосом), що задають початкову множину структур IPO. Якщо на цьому кроці отримано хоча б одну структуру різницевого оператора, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , тоді – завершення процедури структурної ідентифікації. У протилежному випадку переходять на третій крок, де проводять селекцію множини «кращих» (з найменшими значеннями  $\delta(\lambda_s)$ ) структур IPO (популяцію найкращих особин) у кількості 50% усіх згенерованих структур IPO (популяції). Якщо на цьому кроці отримано хоча б одну структуру різницевого оператора, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , тоді завершуємо процедуру структурної ідентифікації.

На четвертому кроці проводять «схрещування» відібраних структур IPO (особин популяції) із застосуванням оператора «схрещування» генетичного алгоритму [7]. Цей оператор «схрещування», на відміну від операторів, що використовуються в межах класичних підходів, побудований на принципі «розіграшу лотереї». Після завершення процедури «схрещування» проводиться селекція найкращих структур IPO (третій крок). З метою зменшення ризику втрати важливих структурних елементів для шуканої моделі на наступний ряд селекції, окрім отриманих пар в результаті комбінування поточних структур, подають також і структури з попереднього ряду селекції.

Таким чином вхідними параметрами для реалізації генетичного алгоритму є:  $S$  – розмір популяції,  $[I_{\min}; I_{\max}]$  – нижня та верхня межі інтервалу, який визначає кількість структурних елементів у поточній структурі, а також множина структурних елементів  $F$ .

У ході критичного аналізу методу структурної ідентифікації моделі об'єкта з розподіленим параметрами у вигляді IPO із застосуванням генетичного алгоритму були виявлені нижченаведені недоліки методу.

*По-перше*, випадкове формування початкової множини структур IPO (хромосом), що здійснюється на першій ітерації методу проводиться таким чином, щоб використати увесь сформований набір структурних елементів  $F$  (генів), що призводить до суттєвого збільшення початкової кількості структур IPO (особин популяції), адже початкової кількості структур IPO (особин популяції) прямо пропорційно залежить від кількості структурних елементів (генів) у наборі  $F$ .

Така залежність обумовлена тим, що метод структурної ідентифікації на основі генетичного алгоритму базується на жорсткому припущенні, що множина структурних елементів  $F$  повинна гарантовано включати всі елементи шуканої оптимальної структури IPO. Внаслідок чого, для задач структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами набір генів (множина

структурних елементів  $F$ ) повинен містити у собі усі можливі комбінації з множини елементів  $\{V_{0,0,0,0}, \dots, V_{0,0,h-1,0}, V_{i-1,0,0,0}, \dots, V_{0,j-1,0,0}, \dots, V_{i-1,j-1,h-1,k-1}\}$  у відповідності до заданого порядку IPO у поєднанні з комбінаціями із множини елементів  $\{\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}\}$ , які генерують, виходячи з аналізу фізичних властивостей модельованого реального процесу, що призводить до збільшення потужності множини  $F$ , а відповідно і підвищує обчислювальну складність методу.

*По-друге*, у ході селекції множини «кращих» (з найменшими значеннями показника якості –  $\delta(\lambda_s)$ ) структур IPO (популяції найкращих особин) на кожній ітерації відкидають 50% усіх згенерованих структур, що в результаті може бути причиною відсутності прийнятної структури IPO після завершення процедури структурної ідентифікації, внаслідок втрати важливих компонентів моделі.

*По-третє*, «схрещування» відібраних структур IPO (особин популяції) відбувається із застосуванням оператора «схрещування», який побудовано на принципі «розіграшу лотереї», де відбувається попарне «схрещування» структур (особин), які відбираються із множини кращих структур IPO (популяції кращих особин) випадковим чином. Основним недоліком такого оператора схрещування є нерациональний випадковий вибір структур (особин) для «схрещування». У праці [11] запропоновано «схрещувати» структури IPO (особин популяції) на основі принципу «кращий з кращим», однак зважаючи на інші недоліки методу, навіть такий підхід не суттєво впливає на обчислювальну складність методу структурної ідентифікації моделі із розподіленими параметрами на основі генетичних алгоритмів.

*По-четверте*, у запропонованому в праці [7] методі структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів відсутній оператор мутації, що унеможлиблює отримання різноманіття популяції кращих особин.

Зважаючи на усі вищеописані недоліки методу структурної ідентифікації моделі об'єкта з розподіленими параметрами у вигляді IPO із застосуванням генетичних алгоритмів, постає актуальна задача пошуку якісно нового методу структурної ідентифікації, який на основі аналогій із популяціями біологічних систем дає можливість створити більш ефективний механізм формування потенційних структур моделі і при цьому знизити обчислювальну складність реалізації методу розв'язку задачі структурної ідентифікації. Одною із таких біологічних систем є бджолина колонія. У статті [9] розглянуто базові принципи методу структурної ідентифікації IPO, що ґрунтується на засадах роевого інтелекту притаманного колонії медоносних бджіл. Тому предметом досліджень цієї праці є саме проведення порівняльного аналізу відомого методу структурної ідентифікації на основі генетичного аналізу із методом на основі алгоритму бджолиної колонії, запропонованим у праці [9], як з точки зору обчислювальної складності їх реалізації, так і з точки зору «оптимальності» знайдених розв'язків.

#### IV. Особливості методу структурної ідентифікації моделі об'єктів у вигляді IPO із застосуванням алгоритму бджолиної колонії

Метод структурної ідентифікації макромоделі на основі алгоритму бджолиної колонії запропонований у праці [9]. Уведемо наступні означення: *поведінка бджоли* при виборі місцезнаходження джерела нектару безпосередньо реалізує сам алгоритм синтезу поточної структури IPO; *область пошуку нектару* – множина допустимих розв'язків задачі структурної ідентифікації IPO, тобто множина усіх можливих структур IPO із відомими оцінками компонентів вектора параметрів  $\hat{g}$ ; *окіл джерела нектару* – множина структур IPO, що можуть бути згенеровані на основі поточної структури IPO шляхом часткової заміни її структурних елементів; *координати джерела нектару* – поточна структура IPO; *якість джерела нектару* представляється обчисленим значенням функції  $\delta(\lambda_s)$ , що задає точність моделі, побудованої на основі поточної структури.

Для реалізації АБК усіх бджіл колонії, котрі займаються пошуком джерел їжі, умовно поділяють на три типи [12]: *робочі бджоли* (проводять пошук їжі в околі уже відомих джерел нектару та інформують бджіл-дослідників про якість досліджуваних джерел нектару); *бджоли-дослідники* (знаходяться у вулику, де отримують інформацію від робочих бджіл, після чого відправляються на пошуки нектару в окол знайдених робочими бджолами джерел нектару); *бджоли-розвідники* (здійснюють випадковий пошук нових джерел нектару).

Загальна схема АБК формулюється наступним чином: **Крок 1. Ініціалізація.** Дослідником задаються значення вхідних параметрів алгоритму:  $MCN$ ,  $LIMIT$ ,  $S$ ,  $[I_{min}; I_{max}]$  та множина структурних елементів  $F$ . Далі відбувається формування випадковим чином множини структур IPO  $\Lambda_{mcn}$  потужності  $S$ , де кожна структура IPO задає координати джерела нектару. **Крок 2. Фаза активності робочих бджіл**, яка в контексті задачі структурної ідентифікації IPO означає – синтез поточних структур IPO, після чого проводиться попарна селекція структур IPO та формування множини найкращих структур. Якщо на цьому кроці знайдено хоча б одне «оптимальне» джерело нектару, тобто

таку структуру різницевого оператора, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , тоді завершуємо процедуру структурної ідентифікації. **Крок 3. Фаза активності бджіл-дослідників**, яка в контексті задачі структурної ідентифікації IPO означає – синтез множини поточних структур IPO з урахуванням «якості» структур, після чого проводиться погурпова селекція поточних структур IPO та формування множини найкращих структур. Якщо на цьому кроці знайдено хоча б одне «оптимальне» джерело нектару, тобто таку структуру різницевого оператора, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , тоді завершуємо процедуру структурної ідентифікації. **Крок 4. Фаза активності бджіл-розвідників**, яка в контексті задачі структурної ідентифікації IPO означає – перевірку «критерію відмови» (бджоли покидають вичерпані джерела нектару, якщо такі є). Якщо на цьому кроці знайдено хоча б одне «оптимальне» джерело нектару, тобто таку структуру різницевого оператора, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , тоді завершуємо процедуру структурної ідентифікації. Повернення на **крок 2** поки не буде досягнуто критерію зупинки.

Вхідні параметри реалізації методу:  $M_{CN}$  (максимальна кількість ітерацій),  $LIMIT$  – «критерій вичерпності»,  $S$  – розмір популяції),  $[I_{\min}; I_{\max}]$  та множина  $F$ .

#### IV. Порівняльний аналіз методів структурної ідентифікації моделі у вигляді IPO із застосуванням генетичного алгоритму та на основі розв'язку інтелекту (на прикладі задачі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону)

Із постановки задачі видно, що найскладнішою процедурою в обох алгоритмах структурної ідентифікації є процедура обчислення показника якості поточної структури IPO –  $\delta(\lambda_s)$ . У праці [2] наведено результати досліджень, які показують, що ефективність алгоритмів структурної ідентифікації можна визначити за кількістю обчислень значень показника  $\delta(\lambda_s)$ , який визначає цільову функцію у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора.

Розглянемо процес виробництва листів гіпсокартону стандартних розмірів. Результати вимірювань вологості на поверхні листа гіпсокартону за умов двох режимів технологічного процесу, наведено у таблиці 1 [2].

У таблиці 1 використано такі позначення:  $i$ -дискретне значення координати  $x$  з кроком  $\Delta x = 300$  мм (перша дискрета на відстані 200 мм від краю листа);  $j$ -дискретне значення координати  $y$  із кроком  $\Delta y = 300$  мм, початкові точки зазначено на відстані 150 мм від краю листа.

Таблиця 1 - Виміряні значення відносної вологості  $z_{i,j,k}$  на листі гіпсокартону для заданих технологічних чинників

$u_{1,0} = 120^\circ, u_{2,0} = 0.25 \text{ м/хв.}$								
$I \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,6	0,63	0,66	0,66	0,68	0,65	0,62	0,61
1	0,68	0,74	0,78	0,82	0,85	0,83	0,79	0,71
2	0,72	0,78	0,82	0,85	0,86	0,82	0,78	0,73
3	0,62	0,63	0,68	0,7	0,71	0,67	0,66	0,65
$u_{1,k} = 125^\circ, u_{2,k} = 0.28 \text{ м/хв.}$								
$I \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,71	0,75	0,76	0,79	0,79	0,75	0,73	0,69
1	0,76	0,8	0,87	0,91	0,96	0,94	0,89	0,82
2	0,78	0,89	0,93	0,97	0,98	0,96	0,88	0,82
3	0,73	0,75	0,78	0,79	0,8	0,77	0,76	0,71

Користуючись даними наведеними у таблиці 1 та відомим значенням похибки вимірювань  $\varepsilon = 5\%$ , інтервальні дані  $[z_{i,j,k}^-; z_{i,j,k}^+]$ ,  $i = 0, \dots, 3$ ,  $j = 0, \dots, 7$ ,  $k = 0, 1$ , отримаємо із виразів

$z_{i,j,k}^- = z_{i,j,k} - z_{i,j,k} \cdot \varepsilon$  та  $z_{i,j,k}^+ = z_{i,j,k} + z_{i,j,k} \cdot \varepsilon$ , де  $z_{i,j,k}$  - виміряні значення відносної вологості на поверхні листа гіпсокартону.

Для реалізації методів структурної ідентифікації (на основі генетичних алгоритмів та на основі алгоритму бджолоїної колонії) макромоделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії сушіння, у праці було згенеровано упорядковану множину структурних елементів  $F$  у кількості  $L=160$ . У процесі досліджень було проведено 5 обчислювальних експериментів.

Варто зазначити, що кількість структурних елементів у множині  $F$  змінювалася в ході експериментів, тобто у 1 експерименті  $L=160$ , в 2 експерименті  $L=140$ , тоді як у 5 –  $L=80$ . Множину структурних елементів, яка була використана у ході 5 експерименту, показано у таблиці 2. Для отримання цієї множини генерувалися структурні елементи, які містять поліноміальні функції не вище другого степеня для різницевого оператора не вище другого порядку.

Таблиця 2 – Множина структурних елементів макромоделі розподілу вологості на листі гіпсокартону на стадії сушіння

№пп	Структурний елемент	№пп	Структурний елемент
1	$v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	41	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
2	$v_{i,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	42	$v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
3	$v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	43	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
4	$v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	44	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
5	$v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	45	$v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
6	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	46	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
7	$v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	47	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
8	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	48	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
9	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	49	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
10	$v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	50	$v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
11	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	51	$v_{i-1,j} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
12	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	52	$v_{i,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
13	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	53	$v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
14	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	54	$v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
15	$v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$	55	$v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
16	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j}$	56	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
17	$v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2}$	57	$v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
18	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1}$	58	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
19	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2}$	59	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
20	$v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2}$	60	$v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
21	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1}$	61	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
22	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2}$	62	$v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$

23	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2}$	63	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
24	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2}$	64	$v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
25	$v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2}$	65	$v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
26	$v_{i-1,j}$	66	$v_{i-1,j}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$
27	$v_{i,j-1}$	67	$v_{i,j-1}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$
28	$v_{i-1,j-1}$	68	$v_{i-1,j-1}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$
29	$v_{i,j-2}$	69	$v_{i,j-2}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$
30	$v_{i-1,j-2}$	70	$v_{i-1,j-2}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$
31	$v_{i-1,j}^2$	71	$v_{i-1,j}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
32	$v_{i,j-1}^2$	72	$v_{i,j-1}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
33	$v_{i-1,j-1}^2$	73	$v_{i-1,j-1}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
34	$v_{i,j-2}^2$	74	$v_{i,j-2}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
35	$v_{i-1,j-2}^2$	75	$v_{i-1,j-2}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$
36	$v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$	76	$v_{i-1,j}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
37	$v_{i,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$	77	$v_{i,j-1}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
38	$v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$	78	$v_{i-1,j-1}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
39	$v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$	79	$v_{i,j-2}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$
40	$v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$	80	$v_{i-1,j-2}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$

Для кожного з 5 обчислювальних експериментів було задано однакові початкові умови для реалізації обох методів структурної ідентифікації IPO:  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 8]$  (інтервал  $[I_{\min}; I_{\max}]$ , що включає число  $m_s$ , що задає кількість структурних елементів для поточної структури IPO); та початкова множина структур IPO у кількості  $S=10$ .

Початкові умови для реалізації методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії такі:  $MCN=100$ ,  $Limit=4$ .

Далі, для кожного експерименту, випадковим чином згенеровано початкову множину структур IPO  $\Lambda_0$ , яка однакова для обох методів структурної ідентифікації у ході поточного експерименту.

Як уже зазначалося, задачу структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону у вигляді IPO кожним із методів структурної ідентифікації розв'язували по 5 разів (за заданих аналогічних початкових умов). Порівняння обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії та відповідно на основі генетичних алгоритмів для усіх проведених експериментів проілюстровано на рис. 1.

У результаті порівняльного аналізу встановлено, що значення показника часової складності реалізації методу структурної ідентифікації IPO на основі алгоритму бджолоїної колонії на 6-24% менше, ніж на основі генетичних алгоритмів.

Початкові умови для реалізації обох методів структурної ідентифікації було задано наступним чином:  $[\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] = (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i,j,k=0}^-; \hat{v}_{i,j,k=0}^+] \subset [z_{i,j,k=0}^-; z_{i,j,k=0}^+] =$

$[z_{i,j,k=0} - z_{i,j,k=0} \cdot 0,01; z_{i,j,k=0} + z_{i,j,k=0} \cdot 0,01]$ ,  $\{i=0, \dots, 3, j=0, \dots, 1\}$   $\{i=0, \dots, 1, j=0, \dots, 7\}$  – задані початкові умови;  $u_{1,0}, u_{1,k}$  - температури у сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення відповідно;  $u_{2,0}, u_{2,k}$  - швидкості переміщення листа у сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення відповідно.

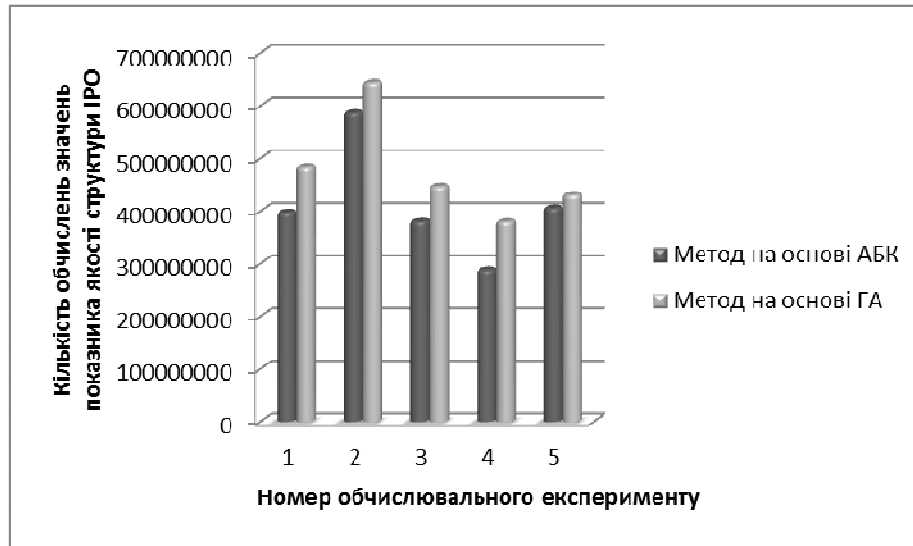


Рисунок 1 – Обчислювальна складність методів

У результаті проведених експериментів отримали структури IPO наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Отримані структури IPO

№	Структура IPO (метод на основі АБК)	Структура IPO (метод на основі ГА)
1	$[\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] = 0.1923 - 0.2903 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \hat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - 0.4599 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \hat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.8333 \cdot [\hat{v}_{i,j-1,k}^-; \hat{v}_{i,j-1,k}^+] + 0.6309 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i-1,j,k}^-; \hat{v}_{i-1,j,k}^+]$	$[\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] = 0.4778 + 0.6946 \cdot [\hat{v}_{i-1,j,k}^-; \hat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\hat{v}_{i,j-1,k}^-; \hat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.1567 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \hat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - 0.3141 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \hat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot [\hat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \hat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.5684 \cdot [\hat{v}_{i,j-1,k}^-; \hat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.3003 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i,j-2,k}^-; \hat{v}_{i,j-2,k}^+]$
2	$[\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] = 0.5173 - 0.2211 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i-1,j,k}^-; \hat{v}_{i-1,j,k}^+]$	$[\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] = 0.49 - 0.2202 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \hat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$

	$ \begin{aligned} & -0.3606 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & + 0.6034 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.4728 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] \\ & + 0.8523 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & -0.2726 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \\ & + 0.6014 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.3622 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] \\ & + 0.6785 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \end{aligned} $
3	$ \begin{aligned} & [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.49 - \\ & 0.1625 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & - 0.3164 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & + 0.6008 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & + 0.6969 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.4010 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.2072 \\ & - 0.0054 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.4483 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \\ & + 0.6075 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \\ & + 0.8325 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.2574 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & - 0.0366 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & - 0.0084 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] \end{aligned} $
4	$ \begin{aligned} & [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.1867 - \\ & 0.2779 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & - 0.4362 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \\ & + 0.6187 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \\ & + 0.8337 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.02 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = -0.1482 + \\ & 0.0017 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ & + 0.6253 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \\ & + 0.9577 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\ & - 0.1629 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] \\ & - 0.7161 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \\ & + 0.2662 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \end{aligned} $
5	$ \begin{aligned} & [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.2031 - \\ & 0.2996 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\ & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \end{aligned} $	$ \begin{aligned} & [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.2024 - \\ & 0.4503 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \end{aligned} $

$  \begin{aligned}  & - 0.0299 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot \\  & \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\  & - 0.4483 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \\  & + 0.619 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\  & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \\  & + 0.8522 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]  \end{aligned}  $	$  \begin{aligned}  & + 0.6084 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\  & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \\  & + 0.8286 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \\  & - 0.2613 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot \\  & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\  & - 0.0331 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot \\  & \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\  & - 0.0006 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+]  \end{aligned}  $
---	--

Порівняння «складності» отриманих структур моделей у вигляді ІРО проілюстровано на рисунками 2 та 3.



Рисунок 2 – Кількість структурних елементів у отриманих структурах моделей у вигляді ІРО

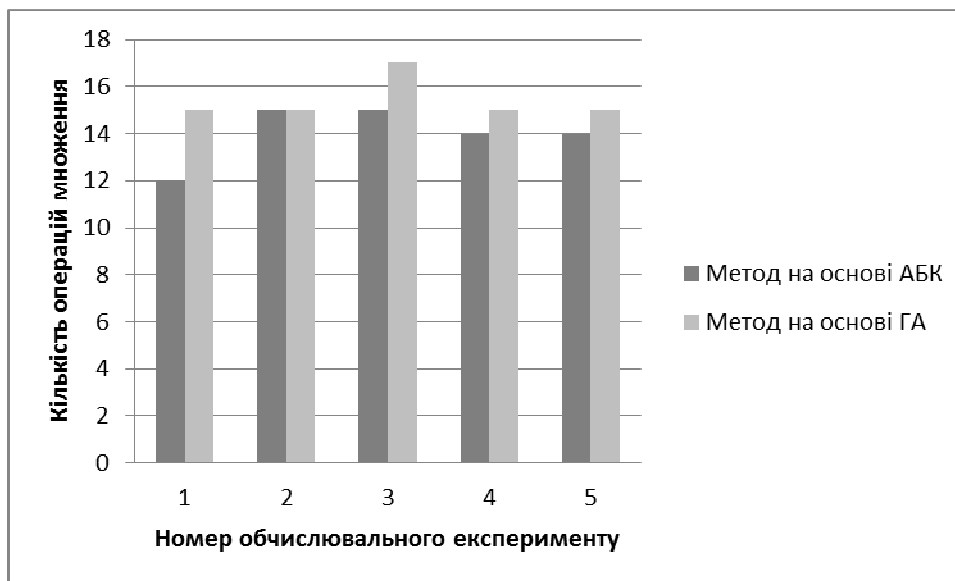


Рисунок 3 – Кількість операцій множення, які необхідно виконати для прогнозування значення вологості на поверхні листа гіпсокартону для однієї точки

Як бачимо з таблиці 3 та з рисунків 2, 3 – структури ІРО отримані в результаті застосування методу структурної ідентифікації, який базується на алгоритмі бджолоїної колонії є простішими, ніж структури ІРО отримані на основі методу, який базується на генетичних алгоритмах.

Варто зазначити, що такий вигляд структур ІРО отриманих у результаті застосування методу структурної ідентифікації на основі АБК, досягається внаслідок більшого покриття області пошуку розв'язків задачі у процесі реалізації методу у порівнянні із відомим методом на основі ГА.

#### В. Висновки

У праці проведено порівняльний аналіз застосування методів структурної ідентифікації на прикладі побудови математичної моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення.

У процесі досліджень за допомогою імітаційного експерименту встановлено, що обчислювальна складність реалізації методу структурної ідентифікації ІРО на основі алгоритму бджолоїної колонії від 6% до 24% (залежно від початкових умов) є нижчою і порівнянні із обчислювальною складністю реалізації методу структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів.

Метод структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії має ряд переваг у порівнянні з методом структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів. Зокрема, забезпечує знаходження простіших структур ІРО, а знайдені на його основі структури ІРО мало відрізняються одна від одної, що засвідчує «кращу» збіжність методу структурної ідентифікації на основі АБК у порівнянні з генетичними алгоритмами.

Крім того, метод структурної ідентифікації на основі АБК забезпечує ширше покриття області допустимих структур ІРО на відміну від методу на основі ГА і при цьому відзначається меншою обчислювальною складністю його реалізації.

#### Список використаних джерел

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. – 432 с.
2. Дивак Т. М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння / Т. М. Дивак // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : міжнар. наук.-техн. журнал. – 2012. – Вип. 3. – С. 79–85.
3. Ивахненко А. Г. Численное исследование помехоустойчивости многокритериальной селекции моделей / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко // Автоматика. –1982. – № 4. – С. 26-36.
4. Степашко В.С. Элементы теории индуктивного моделирования. – Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія / Кол. авторів. – Київ: Наукова думка, 2010. – С. 481-496.
5. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А.Г. Ивахненко - Киев: - Наукова думка, 1981.- 296 с.
6. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними.- Тернопіль: Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011.-216 с.
7. Войтюк І. Ф., Метод та генетичний алгоритм структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів в задачах екологічного моніторингу / І. Ф. Войтюк, М. П. Дивак, В. М. Неміш// Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету серії „Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка“. – 2011. - Вип. 14 (188). - С. 8-17.
8. Войтюк. І. Ф. Особливості оптимізації структури інтервального різницевого оператора / Войтюк. І. Ф., Манжула В. І., Дивак Т. М. // Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці. Збірка наукових праць учасників міжнародної науково-практичної конференції „Трансформаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах“. – Вінниця, 2009. – С. 146-154.
9. Порплиця Н.П., Дивак М.П. Синтез структури інтервального різницевого оператора з використанням алгоритму бджолоїної колонії. / Н. П. Порплиця, М. П. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем . - 2013. - Вип. 5. - С. 256-269.
10. Дивак М. П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С.Степашко. – Київ : МННЦ ІТС, 2009. – Вип. 1. – 236 с. – С. 35–43.
11. Очеретнюк Н.П. Структурна ідентифікація інтервальної моделі процесу сушіння гіпсокартону /Н. П. Очеретнюк, М. П. Дивак// Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах».-2013.-№2.-С. 211-217.

12. D. Karaboga, B. Basturk “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, 2007.

**Відомості про автора**

**Порплиця Наталія Петрівна** – аспірант кафедри комп’ютерних наук факультету комп’ютерних інформаційних технологій ТНЕУ ocheretnyuk.n@gmail.com.