

*Магістр, ст. викладач кафедри інформатики та управління захистом інформаційних систем інституту інформаційної безпеки, радіоелектроніки та телекомунікацій Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна*

## МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ ШУМОМ ПЕРЛІНА

**Актуальність.** На сьогоднішній день інформатизація є одним з пріоритетних напрямків розвитку всіх економічних галузей. Процес впровадження нових інформаційних технологій в усі сфери життя суспільства неможливий без вирішення питання інформаційної безпеки. Складовою частиною якого, є розробка методів визначення автентичності цифрових зображень, побудова яких в багатьох областях має визначальне значення. Все це робить тему даної роботи надзвичайно актуальною.

**Мета.** Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані наступні задачі. Виконано дослідження параметрів цифрового зображення, наявність або відсутність характерних ознак яких надає можливість встановити порушення цілісності цифрового зображення для поданого способу фальсифікації. Запропоновано використовувати для виявлення фальсифікації наступну форму сингулярних чисел, як параметрів цифрового зображення, що однозначно визначають матрицю цифрового зображення – дискретну функцію швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку. На основі поданої форми параметрів цифрового зображення розроблено спосіб підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації.

**Метод.** У роботі представлено метод виявлення фальсифікації цифрового зображення, розроблений на основі загального підходу, що базується на використанні матричного аналізу, теорії збурень, та надає можливість для розв'язку задачі виявлення порушення цілісності цифрового сигналу. Під фальсифікацією цифрового зображення у роботі розуміється порушення цілісності цифрового зображення, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна.

**Результати.** З метою перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, проведено розрахунковий експеримент для цифрових зображень, що зберігались без втрат, з визначення помилок першого та другого роду.

**Висновки.** Наукова новизна роботи полягає в наступному: представлено спосіб підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації, в результаті генерації шуму Перліна, на основі застосування замість дискретної функції сингулярних чисел блоку, дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення. Результатом роботи є програмний продукт для виявлення порушення цілісності цифрового зображення, на основі шуму Перліна, що може бути використаний для доповнення комплексної системи виявлення порушення цілісності цифрових зображень.

**Ключові слова:** цифрове зображення, фальсифікація, шум Перліна, сингулярний розклад.

### НОМЕНКЛАТУРА

$F$  – матриця цифрового зображення;

$F_{k,p}$  – блок матриці цифрового зображення;

$\Sigma$  – діагональна матриця сингулярних чисел матриці зображення;

$U$  – ортогональна матриця лівих сингулярних векторів матриці зображення;

$V$  – ортогональна матриця правих сингулярних векторів матриці зображення;

$\Omega(F_{k,p})$  – дискретна функція сингулярних чисел блоку матриці зображення;

$\bar{\Psi}(F_{k,p})$  – дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку;

$\Psi(F_{k,p})$  – дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку в логарифмічному масштабі;

$\Phi(F_{k,p})$  – дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення.

### ВСТУП

Завдяки значному росту обчислювальної потужності комп'ютерів, останнім часом, та активному розвитку розрахункових методів комп'ютерної графіки, що постійно збагачують інструментарій різних графічних редакторів, задача реалізації реалістичної фальсифікації цифрового зображення стала надзвичайно простою. Отже, задача доказу справжності, виявлення порушення

цілісності цифрового зображення, розв'язок якої в багатьох областях життєдіяльності людини, таких як: судова експертиза, медична діагностика, військова розвідка, електронний документообіг та інші, має вирішальне значення, стає складнішою рік від року.

Об'єктом дослідження в роботі виступає процес виявлення порушення цілісності цифрового зображення.

Предметом дослідження є параметри цифрового зображення, що застосовуються для виявлення порушення цілісності цифрового зображення.

Метою даної роботи є підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації цифрового зображення. Під фальсифікацією цифрового зображення у роботі розуміється порушення цілісності цифрового зображення, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В роботі виконується дослідження цифрових зображень, що збережені в форматі без втрат, наступних типів. Перший – цифрові зображення, що містили небо та хмари, отримані сучасними цифровими фотокамерами. Другий – цифрові зображення, що отримані в результаті генерації шуму Перліна для моделювання візуально реалістичного природного явища, хмар та неба. Третій – цифрові зображення, змодельовані при заміщенні частини основного зображення штучною областю, яка отримана в результаті генерації шуму Перліна.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1) визначити характерні ознаки параметрів зображення, наявність або відсутність яких надає можливість встановити порушення цілісності цифрового зображення для поданого способу фальсифікації;

2) на основі визначених ознак параметрів цифрового зображення розробити спосіб підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації.

3 метою перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, необхідно визначити помилки першого та другого роду.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

На даний час, для розв'язку поставленої задачі ведеться активна робота з розробки методів виявлення фальсифікації цифрових зображень [1–4].

Найбільшу увагу приділено дослідженню фальсифікації, що реалізовано за допомогою афінного перетворення переносу, як найбільш простому та найпоширенішому способу фальсифікації [1, 2]. Наступним за поширеністю способом фальсифікації є порушення цілісності цифрового зображення в результаті виконання композиції двох афінних перетворень: переносу та розтягненню [3] або повороту деякої прямокутної області зображення [4].

Одним з найскладніших способів фальсифікації для дослідження та виявлення, вважаються порушення цілісності цифрового зображення, що засновані на моделюванні візуально реалістичних природних явищ, які є невід'ємною частиною практично будь-якої природної сцени: такі об'єкти як хмари та небо.

З точки зору комп'ютерної графіки, хмара представляє собою сукупність значення кольору та прозорості в спостережуваній точці. Прозорість, в свою чергу, безпосередньо визначає існування хмари. Величина прозорості може бути оцінена через величину щільності. Таким чином, завдання моделювання хмари представляє собою задачу визначення аналітичної форми для розрахунку величини щільності в даній точці простору при заданих умовах [5].

На сьогоднішній день запропоновано та реалізовано розмаїття методів моделювання хмар [5–10]. За способом представлення об'єкта, методи моделювання хмар можна класифікувати на дві категорії.

До першої категорії відносять методи моделювання хмар, що розглядають об'єкт з функціональної точки зору.

В роботі [7–9] запропоновано метод моделювання хмар засобами симуляції динаміки газу та рідини в заданому об'ємі, характеризується високою обчислювальною складністю або вимагає великих витрат апаратури для зберігання даних та виконує візуалізацію з низьким рівнем деталізації.

До другої категорії відносять методи моделювання хмар, що розглядають об'єкт з структурної точки зору.

В роботі [10] представлено метод моделювання хмар та хмарного шару за допомогою шаблонів. На основі випадкового розподілу або вручну хмарний шар моделюється з підготовлених шаблонів для різних типів хмар. Основним недоліком такого методу є можливість моделювання обмеженої кількості типів хмар та необхідність застосування сторонніх програм для виконання моделювання.

Одним з найпоширеніших методів моделювання візуально реалістичних хмар, що реалізовані в розповсюджених та загальнодоступних графічних редакторах, є метод заснований на реалізації шуму Перліна.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В [1] на основі теорії збурень та матричного аналізу розроблено загальний підхід, що надає можливість для розв'язку задачі виявлення порушення цілісності цифрового сигналу.

Відповідно до даних основ, запропоновано математичні параметри, що несуть в собі інформацію про стан, а їх збурення – інформацію про зміну стану цифрового сигналу. Різноманітні способи збурення (зокрема, різні способи порушення цілісності) цифрового сигналу призводять до різних характерних збурень математичних параметрів, що сигналізують про відповідний вплив.

Нехай  $F = (f_{y,x})_{R \times C}$  матриця,  $R \geq C$  з елементами

$f_{y,x}$ ,  $y = \overline{1, R}$ ,  $x = \overline{1, C}$ . Сингулярний розклад матриці  $F$  [11]:

$$F = U \Sigma V^T. \quad (1)$$

Стовпці  $u_1, \dots, u_C$  матриці  $U$  називаються лівими сингулярними векторами матриці  $F$ . Стовпці  $v_1, \dots, v_C$  матриці  $V$  називаються правими сингулярними векторами матриці  $F$ . Величини  $\sigma_1, \dots, \sigma_C$  – сингулярними числами. Для  $R < C$  будують сингулярний розклад  $F^T$  [11].

Сингулярний розклад матриці  $F$  у загальному випадку не є єдиним. Відповідно до [12] вектор називають лексикографічно позитивним, якщо його перша ненульова компонента є позитивною. Сингулярний розклад  $F = U \Sigma V^T$  називають нормальним, якщо стовпці матриці  $U$  лексикографічно позитивні та діагональні елементи матриці  $\Sigma$  знаходяться в не зростаючому порядку. У відповідності до теореми [12] матриця має єдиний нормальний сингулярний розклад, якщо її сингулярні числа попарно різні та відмінні від нуля. Таким чином сингулярні числа та сингулярні вектори, отримані в результаті нормального сингулярного розкладу, однозначна визначають матрицю.

Отже, набір сингулярних векторів та сингулярних чисел, що отримані в результаті нормального сингулярного розкладу матриці цифрового зображення несуть в собі всю інформацію про стан цифрового сигналу [1].

Для розв'язку задачі виявлення порушення цілісності цифрового зображення, що заснована на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна, розглянемо наступні форми представлення параметрів матриці цифрового зображення: дискретна функція сингулярних чисел блоку матриці зображення; дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення; дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення.

Дискретна функція сингулярних чисел блоку  $F_{k,p} = (f_{y,x})$ ,  $y = \overline{(k-1)n+1, kn}$ ,  $x = \overline{(p-1)n+1, pn}$ ,

розміром  $n \times n$ , матриці зображення  $F = (F_{k,p})$ ,

$k = 1, \overline{\left[ \frac{R}{16} \right]}$ ,  $p = 1, \overline{\left[ \frac{C}{16} \right]}$ , розміром  $R \times C$ , визначена наступним чином:

$$\Omega_i(F_{k,p}) = \sigma_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Розглянемо два цифрових зображення. Перше  $F^P$ , розміром  $400 \times 400$ , отримано в результаті моделювання візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, за допомогою генерації шуму Перліна (рис. 1а). Друге зображення  $F^I$  – цифрова фотографія розміром  $400 \times 400$ , що збережена в форматі без втрат *png* (рис. 1б). Для цифрових зображень побудована сітка, що розділяє матрицю зображення на блоки розміром  $16 \times 16$ . Окремо виділені блоки

$F_{14,8}^P$  та  $F_{21,16}^I$ , що використовуються для подальшої демонстрації результатів дослідження.

Для наведених блоків матриць цифрового зображення (рис. 1) графік дискретної функції сингулярних чисел має наступний вигляд (рис. 2).

У відповідності до геометричної інтерпретації сингулярного розкладу матриці, сингулярні числа представляють собою довжини півосей еліпсоїду. Відношення найменшої до найбільшої довжини півосей еліпсоїду, тобто відношення найменшого до найбільшого сингулярних чисел визначає число обумовленості матриці, що пов'язано з ексцентриситетом. Таким чином, визначене число обумовленості матриці, представляє ступінь сплюсненості еліпсоїду лише відносно одної найменшої півосі.

Поняття числа обумовленості можливо розширити, в результаті дослідження ступеня відхилення кожної півосі від найменшої півосі, для блоку  $n \times n$  матриці цифрового зображення.

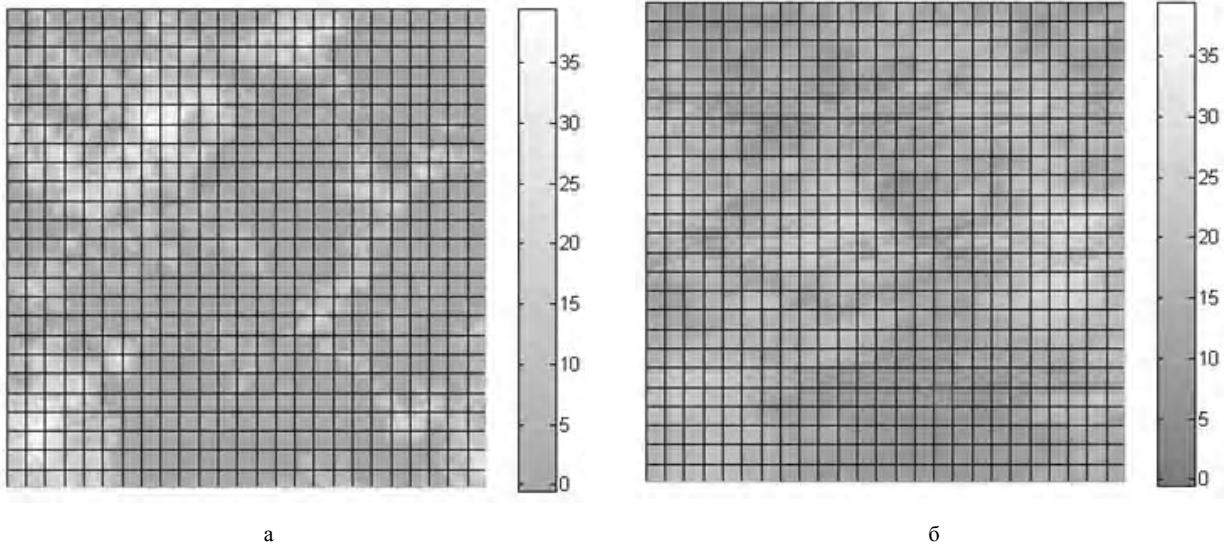


Рисунок 1 – Дослідження параметрів цифрового зображення а –  $F^P$ ; б –  $F^I$

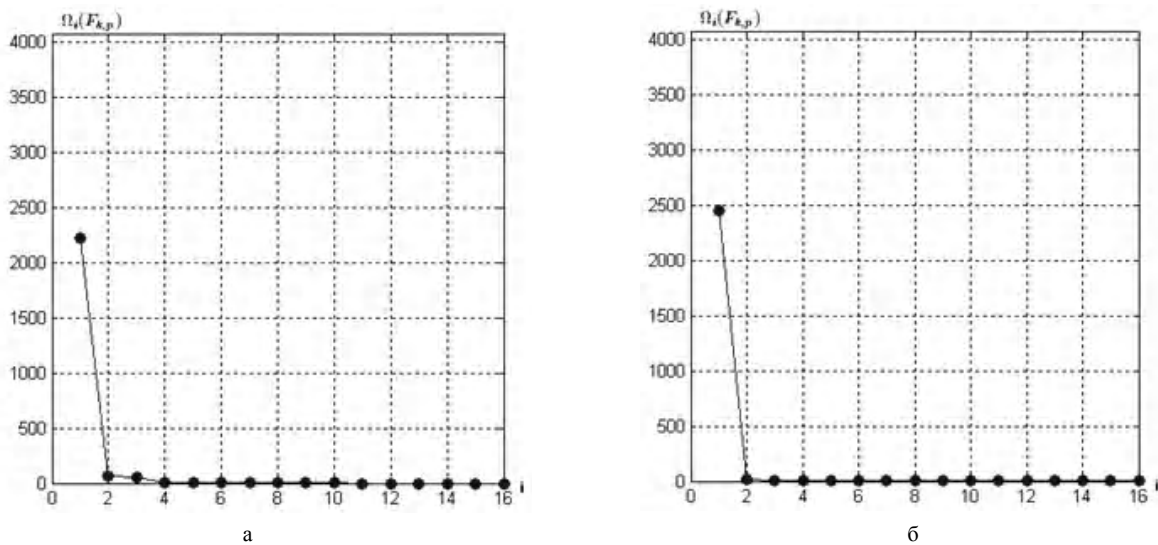


Рисунок 2 – Дослідження дискретної функції сингулярних чисел блоку  $16 \times 16$  матриці зображення а –  $F_{14,8}^P$ ; б –  $F_{21,16}^I$

Отже, дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку  $F_{k,p} = (f_{y,x})$ ,  $y = \overline{(k-1)n+1, kn}$ ,  $x = \overline{(p-1)n+1, pn}$ , розміром  $n \times n$ , матриці зображення  $F = (F_{k,p})$ ,  $k = 1, \overline{\left[\frac{R}{16}\right]}$ ,  $p = 1, \overline{\left[\frac{C}{16}\right]}$ , розміром  $R \times C$ , визначена наступним чином:

$$\bar{\Psi}_i(F_{k,p}) = \frac{\sigma_i}{\sigma_n}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Для подальшого дослідження використана дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку в логарифмічному масштабі:

$$\Psi_i(F_{k,p}) = \log_{10} \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_n} \right), \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

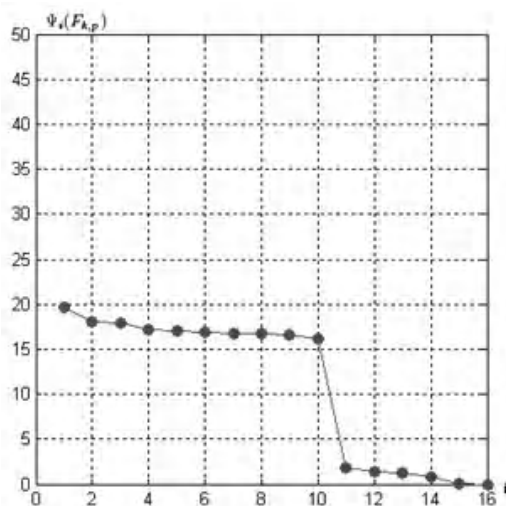
Так, для блоків матриць зображення (рис. 1а та б) графіки дискретної функції відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення мають наступний вигляд (рис. 3).

Для дослідження швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення визначена похідна функції (4). Оскільки функція дискретна, для виконання чисельного диференціювання, застосовано розділену різницю першого порядку.

Дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку  $F_{k,p} = (f_{y,x})$ ,  $y = \overline{(k-1)n+1, kn}$ ,  $x = \overline{(p-1)n+1, pn}$ , розміром  $n \times n$ , матриці зображення

$$F = (F_{k,p}), \quad k = 1, \overline{\left[\frac{R}{16}\right]}, \quad p = 1, \overline{\left[\frac{C}{16}\right]}, \quad \text{розміром } R \times C, \quad \text{визначена наступним чином:}$$

$$\Phi_i(F_{k,p}) = \frac{\Psi_{i+1}(F_{k,p}) - \Psi_i(F_{k,p})}{(i+1) - i}, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad (5)$$



а

$$\Phi_i(F_{k,p}) = \log_{10} \left( \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_n} \right) - \log_{10} \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_n} \right), \quad i = \overline{1, n-1}, \quad (6)$$

$$\Phi_i(F_{k,p}) = \log_{10} \left( \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} \right), \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (7)$$

Так, для блоків матриць зображення (рис. 1а та б) графіки дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення мають наступний вигляд (рис. 4).

Таким чином, основні кроки методу виявлення порушення цілісності цифрового зображення шумом Перліна наступні:

а) побудова матриці цифрового зображення

$$F = (F_{k,p}), \quad k = 1, \overline{\left[\frac{R}{16}\right]}, \quad p = 1, \overline{\left[\frac{C}{16}\right]}, \quad \text{розміром } R \times C;$$

б) розбиття отриманої матриці стандартним чином на блоки розміром  $16 \times 16$   $F_{k,p} = (f_{y,x})$ ,

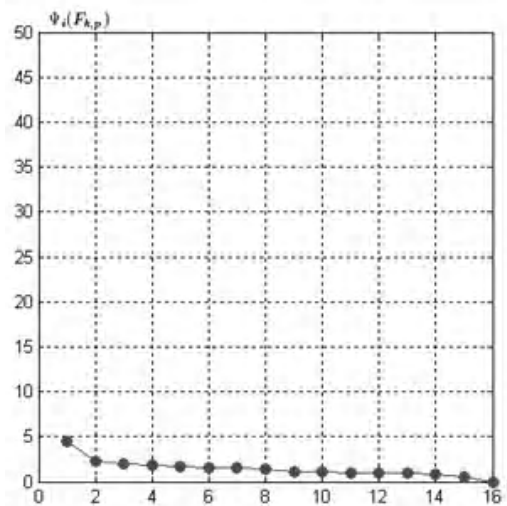
$$y = \overline{16 \cdot (k-1) + 1, 16 \cdot k}, \quad x = \overline{16 \cdot (p-1) + 1, 16 \cdot p};$$

в) побудова дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел для кожного блоку матриці зображення  $\Phi_i(F_{k,p})$ ,  $i = \overline{1, 15}$ ;

г) виділення в матриці зображення блоків, для яких виконується умова:

$$\bar{F} = \left\{ F_{k,p} \mid \max_{i=1}^{15} \left( \Phi_i(F_{k,p}) \right) > 10, k = 1, \overline{\left[\frac{R}{16}\right]}, p = 1, \overline{\left[\frac{C}{16}\right]} \right\}, \quad (8)$$

представляють собою блоки, що є результатом порушення цілісності цифрового зображення.



б

Рисунок 3 – Дослідження дискретної функції відношення сингулярних чисел блоку  $16 \times 16$  матриці зображення, що збережено в форматі без втрат а –  $F_{14,8}^P$ ; б –  $F_{21,16}^I$

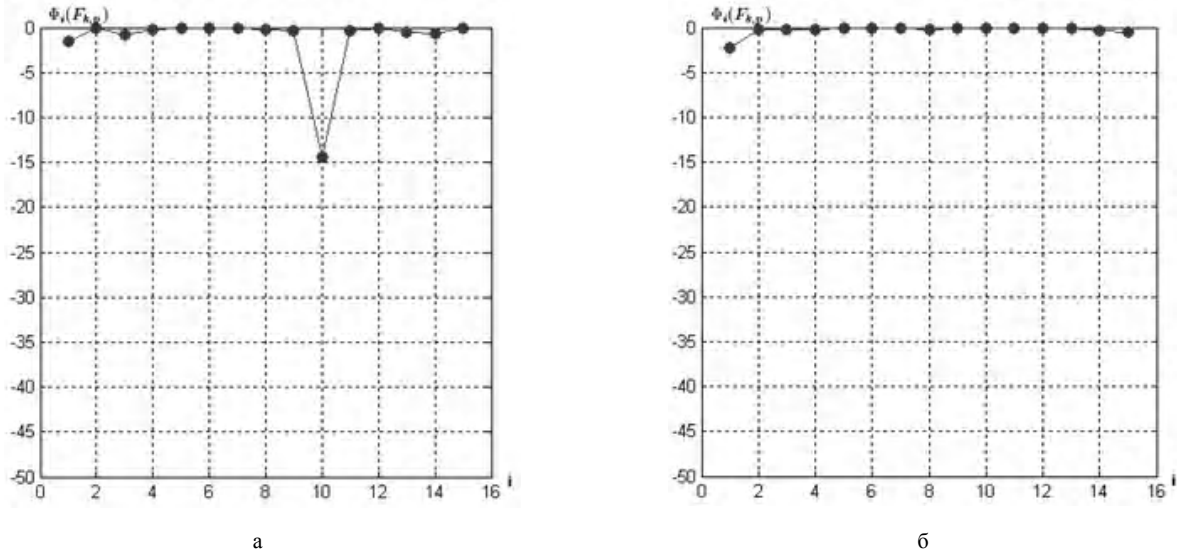


Рисунок 4 – Дослідження дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку  $16 \times 16$  матриці зображення, що збережено в форматі без втрат

а –  $F_{14,8}^P$ ; б –  $F_{21,16}^I$

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

З метою перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, в результаті розрахункового експерименту виконано тестування 500 цифрових зображень, що зберігались в форматі без втрат.

Помилкою першого роду являється випадок, коли цифрове зображення, що отримано цифровою фотокамерою, вважається цифровим зображенням, отриманим в результаті генерації шуму Перліна.

Помилкою другого роду являється випадок, коли цифрове зображення, що отримано в результаті генерації шуму Перліна, вважається цифровим зображенням, що отримано цифровою фотокамерою.

Розглянемо матрицю цифрового зображення

$$F^t = (F_{k,p}^t), \quad k=1, \left\lceil \frac{R}{16} \right\rceil, \quad p=1, \left\lceil \frac{C}{16} \right\rceil, \quad t=1,500, \text{ розміром } R \times C.$$

Для кожного блоку матриці побудована дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел та визначено її найбільше значення

$$\max_{i=1}^{15} \left( \left| \Phi_i(F_{k,p}^t) \right| \right), \quad k=1, \left\lceil \frac{R}{16} \right\rceil, \quad p=1, \left\lceil \frac{C}{16} \right\rceil. \text{ Серед усіх найбільших за модулем значень дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел для всього цифрового зображення визначено найменше значення наступним чином:}$$

більших за модулем значень дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел для всього цифрового зображення визначено найменше значення наступним чином:

$$Z_{\min}^t = \min_{k=1, p=1} \left\lceil \frac{R}{16} \right\rceil \left\lceil \frac{C}{16} \right\rceil \left( \max_{i=1}^{15} \left( \left| \Phi_i(F_{k,p}^t) \right| \right) \right). \quad (9)$$

Для розрахункового експерименту побудована координатна площина, вісь абсцис –  $t=1,500$ , номер цифро-

вого зображення, вісь ординат –  $Z_{\min}^t$ , що отримано за допомогою (9). Кожне зображення на площині представлено точкою з координатами  $(t, Z_{\min}^t)$ .

Точки квадратної форми відповідають цифровим зображенням, отриманим в результаті генерації шуму Перліна, точки круглої форми – цифрові зображення отримані цифровою фотокамерою (рис. 5). Отже, в результаті розрахункового експерименту встановлено, що помилки першого та другого роду склали 2%.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

На основі отриманих результатів дослідження форм представлення параметрів цифрового зображення, що однозначно визначають цифровий сигнал, – сингулярних чисел, розглянемо метод виявлення фальсифікації, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна.

Розглянемо цифрові зображення неба та хмар, що отримані сучасними цифровими фотокамерами. Нехай частина основного зображення (ОЗ), замінюється штучною областю, яка отримана в результаті генерації шуму Перліна (ЗО) (для більшої наочності одержуваних нижче висновків ніяка подальша обробка зображення не виконується).

Таким чином побудоване цифрове зображення, приклад якого на основі зображення (рис. 6а), демонструє порушення цілісності цифрового зображення, представлено на (рис. 6б) зберігається без втрат.

Графіки дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриць ОЗ та зображення, що містить ЗО, наочно демонструють під області порушення цілісності даного типу (рис. 6д,е).

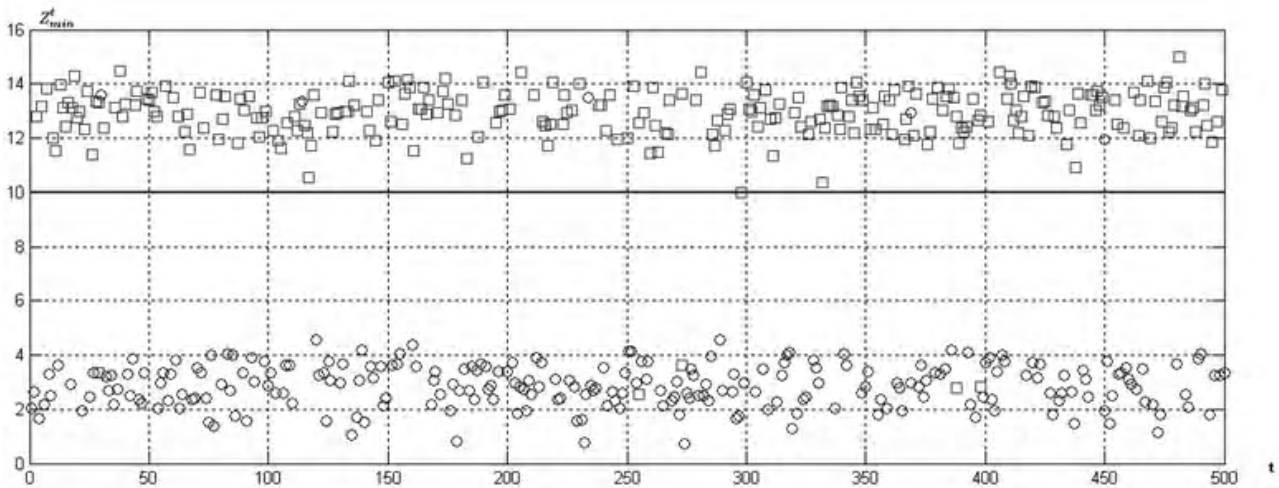


Рисунок 5 – Відображення цифрових зображень, отриманих цифровою фотокамерою та в результаті генерації шуму Перліна на координатній площині залежності  $t$  від  $Z_{\min}^t$

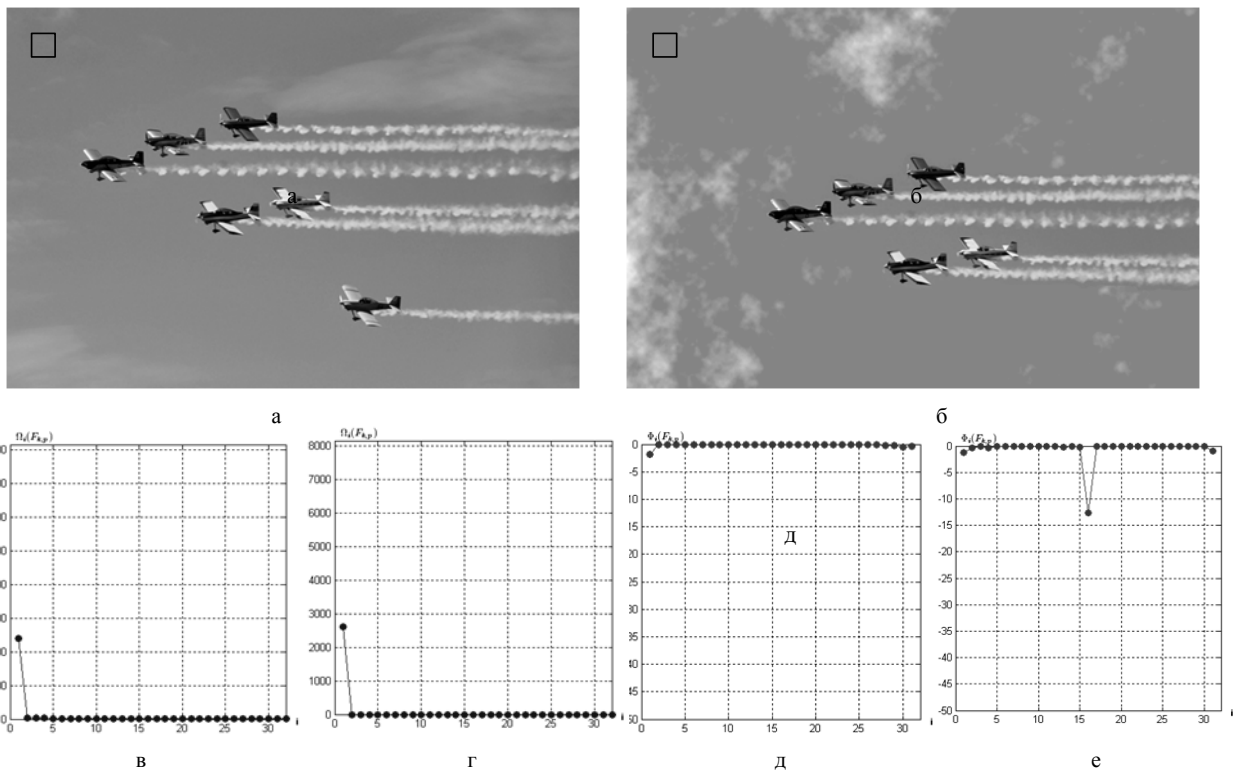


Рисунок 6 – Приклад порушення цілісності цифрового зображення результаті генерації шуму Перліна:

$$а - O_3 F^I ; б - O_3 з 30 F^P ; в - \Omega(F_{2,2}^I) ; г - \Omega(F_{2,2}^P) ; д - \Phi(F_{2,2}^I) ; е - \Phi(F_{2,2}^P)$$

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Таким чином, спосіб підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації, що заснована на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна, представляє собою використання замість дискретної функції сингулярних чисел блоку, дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення.

## ВИСНОВКИ

В результаті даної роботи для підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації цифрового зображення, на основі порушення цілісності цифрового зображення, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна, запропоновано використовувати нову форму представлення параметрів цифрового зображення.

На основі дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел представлено основні кроки методу виявлення фальсифікації цифрового зображення розглянутого типу.

В результаті перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, розрахунковий експеримент визначив, що на основі запропонованої форми сингулярних чисел блоку матриці, для визначення порушення цілісності цифрового зображення, помилки першого та другого роду складають по 1%.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної тематики кафедри «Інформатики та управління захистом інформаційних систем» Одеського національного політехнічного університету «Розробка методів підвищення ефективності комплексної системи захисту інформації» (№ держреєстрації 0115U000834).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобозева А. А. Матричний аналіз – основа общего подходу обнаружения фальсификации цифрового сигнала / А. А. Кобозева, О. В. Рыбальский, Е. А. Трифонова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2008. – №8 (126), Частина 1. – С. 62–72.
2. Трифонова К. О. Підвищення ефективності методу виявлення несанкціонованого втручання «сорупaste» в цифрове зображення / К. О. Трифонова // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – 2012. – №741. – С. 227–230.
3. Трифонова Е. А. Метод идентификации и локализации масштабирования в цифровом изображении / Е. А. Трифонова // Информатика и математические методы в моделировании. – 2013. – № 1. – С. 22–34.
4. Трифонова К.О. Адаптація інваріантних до афінних перетворень моментів цифрового зображення для виявлення фальсифікації / К. О. Трифонова, В. В. Мурова // Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології». – Одеса. – 20–22 вересня 2016р. – С. 40–41.
5. Подлесный В. В. Метод процедурного моделирования облаков различных типов для авиационного тренажера / В. В. Подлесный // Труды СПИИРАН. – 2013. – №5 (28). – С. 230–238.
6. Подлесный В. В. Выбор метода моделирования облаков для авиационных тренажеров / В. В. Подлесный // МГТУ ГА: Научный Вестник. – 2012. – № 177. – С. 105–111.
7. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware / [M. Harris, W. Baxter, T. Scheuermann, A. Lastra] // Proceedings of Graphics Hardware. – 2003. – P. 92–101.
8. Harris M. Physically-based visual simulation on graphics hardware / M. Harris, G. Coombe, T. Scheuermann, A. Lastra // Proceedings of Graphics Hardware. – 2002. – P. 1–10.
9. Harris M. Real-time cloud rendering / M. Harris, A. Lastra // Proceedings of Eurographics. – 2001. – Vol. 20, № 3. – P. 76–84.
10. Wang N. Realistic and fast cloud rendering / N. Wang // Proceeding Siggraph'03 Acm Siggraph 2003 Sketches & Applications. – 2003. – P. 1–17.
11. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения / Дж. Деммель. – М. : Мир, 2001. – 430 с.
12. Bergman C. Unitary Embedding for Data Hiding with the SVD / C. Bergman, J. Davidson // Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII, SPIE. – 2005. – Vol. 5681. – P. 619–630.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2017.

Після доробки 29.12.2017.

Трифонова Е. А.

Магистр, ст. преподаватель кафедры информатики и управления защитой информационных систем института информационной безопасности, радиоэлектроники и телекоммуникаций Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ШУМОМ ПЕРЛИНА

**Актуальность.** На сегодняшний день информатизация является одним из приоритетных направлений развития всех экономических отраслей. Процесс внедрения новых информационных технологий во все сферы жизни общества невозможен без решения вопроса информационной безопасности. Составной частью которого является разработка методов определения подлинности цифровых изображений, построение которых во многих областях имеет определяющее значение. Все это делает тему данной работы чрезвычайно актуальной.

**Цель.** Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи. Выполнено исследование параметров цифрового изображения, наличие или отсутствие характерных признаков которых позволяет установить нарушения целостности цифрового изображения для представленного способа фальсификации. Предложено использовать для выявления фальсификации следующую форму сингулярных чисел, в качестве параметров цифрового изображения, которые однозначно определяют матрицу цифрового изображения – дискретную функцию скорости изменения отношения сингулярных чисел блока. На основании представленной формы параметров цифрового изображения разработан способ повышения эффективности метода обнаружения фальсификации.

**Метод.** В работе представлен метод обнаружения фальсификации цифрового изображения, разработанный на основании общего подхода, который базируется на использовании матричного анализа, теории возмущений, и предоставляет возможность для решения задачи обнаружения нарушения целостности цифрового сигнала. Под фальсификацией цифрового изображения в работе понимается нарушение целостности цифрового изображения, которое основано на моделировании визуально реалистического природного явления, облаков и неба, в результате генерации шума Перлина.

**Результаты.** С целью проверки эффективности модифицированного метода выявления фальсификации, проведен вычислительный эксперимент для цифровых изображений, которые хранились без потерь, по определению ошибок первого и второго рода.

**Выводы.** Научная новизна работы заключается в следующем: представлено способ повышения эффективности метода обнаружения фальсификации, в результате генерации шума Перлина, на основе применения вместо дискретной функции сингулярных чисел блока, дискретной функции скорости изменения отношения сингулярных чисел блока матрицы изображения. Результатом работы является программный продукт для выявления нарушения целостности цифрового изображения, на основе шума Перлина, который может быть использован для дополнения комплексной системы выявления нарушения целостности цифровых изображений.

**Ключевые слова:** цифровое изображение, фальсификация, шум Перлина, сингулярное разложение.

Tryfonova K. O.

Master of Science, Senior Lecturer, Department of Computer Science and Management Information Systems Protection, Information Security Institute of Radio Electronics and Telecommunications, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

#### METHOD OF DETECTION INTEGRITY VIOLATIONS OF DIGITAL IMAGE BY PERLIN NOISE

**Context.** Today informatization is one of the priority directions of economic sectors development. Introduction process of new information technologies in all society spheres is impossible without solving the problem of information security. An integral part of which is the development of methods for determining the authenticity of digital images, the construction of which in many areas is crucial. All this makes the topic of this work is extremely important.

**Objective.** To achieve the goal the following tasks are solved. Performed the research of digital image parameters, the presence or absence of the characteristic features of which allows to establish integrity violations of the digital image for the present forgery type. It is proposed to use for forgery detection ensuing form of singular values, as a digital image parameters, that uniquely define a matrix of digital image – a discrete function of the speed change ratio of block singular values. Based on developed form digital image parameters, was architected a way of increasing the efficiency of forgery detection method.

**Method.** This paper presents a method for forgery detection of the digital image, developed on the basis of a common approach, which is use matrix analysis, perturbation theory, and provides an opportunity to solve the problem of detection integrity violations of the digital signal. Under the digital image forgery in the work refers to a integrity violation of the digital image, which is based on realistic visual simulation of natural phenomena, clouds and sky, as a result of Perlin noise generation.

**Results.** In order to test the effectiveness of the modified forgery detection method, computational experiments performed for digital images that are stored without losses, to determine errors of the first and second type.

**Conclusions.** The scientific novelty of the work is as follows: presented method of increasing the efficiency of the method of falsification detection, resulting in the generation of Perlin noise, based on the application instead of a discrete function of singular values of the block, a discrete function rate of change of the relationship matrix of singular values of image block. The result of work is a program product for detecting violation of the integrity of the digital image, based on Perlin noise, which can be used to supplement the complex detection systems integrity violation of the digital image.

**Keywords:** digital image, forgery, Perlin noise, singular decomposition.

#### REFERENCES

1. Kobozeva A. A., Ry'bal'skij O. V., Trifonova E. A. Matrichny'j analiz – osnova obshhego podxoda obnaruzheniya fal'sifikacii cifrovogo signala, *Visnik Sxidoukrai'ns'kogo nacional'nogo universitetu im. V. Dalya*, 2008, No. 8(126), Chastina1, pp. 62–72.
2. Trifonova K. O. Pidvishhennya efektyvnosti metodu viyavlennya nesankcionovanogo vtruchannya «copypaste» v cifrove zobrazhennya, *Visnik Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politexnika» «Avtomatika, vimiryuvannya ta keruvannya»*, 2012, No. 741, pp. 227–230.
3. Trifonova E. A. Metod identyfikacii i lokalizacii masshtabirovaniya v cifrovom izobrazhenii, *Informatika i matematicheskie metody' v modelirovanii*, 2013, No. 1, pp. 22–34.
4. Trifonova K. O., Murova V. V. Adaptaciya invariantnix do afinnix peretvoren' momentiv cifrovogo zobrazhennya dlya viyavlennya fal'sifikacii, *Tezi dopovidej V mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii «Informacijni upravlyayuchi sistemi ta texnologii»*. Odesa, 20–22 veresnya 2016 r, pp. 40–41.
5. Podlesny'j V.V. Metod procedurnogo modelirovaniya oblakov razlichny'x tipov dlya aviacionnogo trenazhera, *Trudy' SPIRAN*, 2013, No. 5(28), pp. 230–238.
6. Podlesny'j V. V. Vy'bor metoda modelirovaniya oblakov dlya aviacionny'x trenazherov, *MGTU GA: Nauchny'j Vestnik*, 2012, No. 177, pp. 105–111.
7. Harris M., Baxter W., Scheuermann T., Lastra A. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware, *Proceedings of Graphics Hardware*, 2003, pp. 92–101.
8. Harris M., Coombe G., Scheuermann T., Lastra A. Physically-based visual simulation on graphics hardware, *Proceedings of Graphics Hardware*, 2002, pp. 1–10.
9. Harris M., Lastra A. Real-time cloud rendering, *Proceedings of Eurographics*, 2001, Vol. 20, No. 3, pp. 76–84.
10. Wang, N. Realistic and fast cloud rendering, *Proceeding Siggraph '03 Acm Siggraph 2003 Sketches & Applications*, 2003, pp. 1–17.
11. Demmel', Dzh. Vy'chislitel'naya linejnaya algebra. Teoriya i prilozheniya. Moscow, Mir, 2001, 430 p.
12. Bergman S., Davidson J. Unitary Embedding for Data Hiding with the SVD, *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII, SPIE*, 2005, Vol.5681, pp. 619–630.



# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 519.8: 005.31

Гусев В. Б.

Канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

#### АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ДАННЫХ И РЕФЛЕКСИВНЫХ ПРОЦЕДУР ВЫВОДА

**Актуальность.** При принятии решений достаточно распространена ситуация, когда сложные объекты управления функционируют в условиях неопределенности и характеризуются наличием нескольких критериев выбора, а также наличием параметров, плохо поддающихся измерению или имеющих качественный характер. В таких ситуациях для получения оценок и принятия решений разумно применять экспертные подходы. Это в свою очередь требует разработки специальных методов формализации рассматриваемых объектов и систем управления, а также соответствующих процедур численной обработки экспертных данных.

**Цель.** Целью работы является разработка процедур расчета оценок для последствий взаимодействия факторов управления на основе экспертных данных и метода выбора рациональных решений при наличии нескольких критериев.

**Метод.** Предметом рассмотрения является метод экспертного анализа, использующий рефлексивные процедуры многозначного логического вывода для получения транзитивного замыкания оценок взаимного влияния факторов и метод принятия решений на основе сбалансированного учета нескольких критериев.

**Результаты.** Предложенный метод принятия решений включает две составляющие: процедуру рефлексий для расчета транзитивного замыкания первичных оценок и процедуру формирования взвешенного критерия для сбалансированного учета нескольких критериев, учитывающих различные аспекты выбора. В ситуации двухкритериальности введен гибкий критерий, формирование которого основано на балансировке (учете степени важности) максиминного и минимаксного значений исходных критериев и на использовании релевантного подмножества учитываемых факторов. В качестве примера приведен расчет рационального выбора структуры нематериальных активов предприятия.

**Выводы.** Специфика рассмотренного подхода, обладающего принципиальной новизной, заключается в учете неопределенности, заключенной, как в свойствах экспертных данных, так и в наличии нескольких критериев выбора. Применение алгебры многозначной логики в процедуре рефлексий позволяет наиболее адекватно учитывать экспертные данные при оценивании вариантов принятия управленческих решений. Гибкий критерий является атрибутом самоорганизации управляемой системы. Разработанный метод экспертного анализа факторов управления, учитывающий последствия их взаимодействия, позволяет оценивать и выделять наиболее значимые факторы с точки зрения заданных критериев, принимать рациональные решения как для оперативного реагирования на сложившуюся ситуацию, так и при долгосрочном и стратегическом планировании. Численный пример представляет информативную демонстрацию эффективности предложенного подхода.

**Ключевые слова:** экспертные данные, многозначный логический вывод, оценки взаимного влияния факторов, транзитивное замыкание, управление нематериальными активами предприятия.

#### НОМЕНКЛАТУРА

$C$  – группа критериев;

$i$  – индекс критерия,  $i \in C$ ;

$M$  – множество факторов;

$U$  – управляющая группа факторов,  $U \subset M$ ;

$r \in U$  – стратегия выбора управления,  $r \in U$ ;

$f_i(r)$  – критерий  $i$  для стратегии  $r$ ;

$\Delta_{ij}(r), j \in [M]$  – оценки факторов для стратегии  $r$ ;

$s_{ij}, i \in C; j \in [M]$  – веса линейной свертки оценок;

$U^l$  – множество стратегий  $r$ , включающих  $l$  факторов из множества  $U$ ;

$U_1^l$  – множество стратегий, для которых реализуется

максимум 1-го критерия,  $U_1^l = \arg \max_{r \in U^l} f_1(r)$ ;

$U_{12}^l$  – часть множества парето для 2-х-критериальной задачи, где приоритетным является 1-й критерий,

$U_{12}^l = \arg \min_{r \in U_1^l} f_2(r)$ ;

$U_{21}^l$  – часть множества парето для 2-х-критериальной задачи, где приоритетным является 2-й критерий,  
 $U_{21}^l = \arg \max_{r \in U_{21}^l} f_1(r);$

$f_1^{\max}$  – экстремальное значение критерия  $f_1(r)$  в задаче  $\max_{r \in U_{21}^l} f_1(r);$

$f_2^{\max}$  – экстремальное значение критерия  $f_2(r)$  в задаче  $\min_{r \in U_{21}^l} f_2(r);$

$\hat{f}(r)$  – критерий для смешанной стратегии;

$\alpha$  – относительная частота решений  $U_{21}^l$  по отношению к решениям  $U_{12}^l;$

$A$  – экспертная матрица с коэффициентами  $a_{ij};$

$x$  – вектор оценок состояния;

$\oplus$  – логическая сумма;

$\otimes$  – логическое произведение;

$\Delta \bar{x}$  – транзитивное замыкание оценок взаимодействия.

## ВВЕДЕНИЕ

Действие одних факторов на другие затрагивает различные аспекты. В результате сложения эффекта от всех цепочек воздействий, исходящих от каждого фактора-причины и заканчивающихся факторами-следствиями, формируется системный эффект, определяемый полной совокупностью возникающих косвенных связей.

При принятии решений можно выбирать интерпретацию применяемых числовых данных, как оценки интенсивности взаимодействия факторов. Конкретный аспект взаимодействия обладает своей спецификой и требует соответствующего математического аппарата.

Отличительной чертой экспертного подхода является включение в анализ набора факторов, достаточно полно определяющих причинно-следственные связи рассматриваемого объекта. Используемые данные основываются на мнении экспертов и могут не иметь отражения в официальной статистике, дополняя их для целей анализа. Получаемые в результате анализа полные оценки степени взаимовлияний факторов можно использовать при сравнении различных сценариев развития с целью выбора управляющих воздействий при долгосрочном планировании.

Целью работы является разработка метода формирования критериев выбора рациональных решений в условиях неопределенности, основанных на оценках взаимодействия управляемых и управляющих факторов, а также разработка процедур расчета соответствующих оценок. Предметом рассмотрения является метод экспертного анализа, использующий рефлексивные процедуры многозначного логического вывода для получения транзитивного замыкания оценок взаимного влияния факторов. В качестве примера приведен расчет рационального выбора структуры нематериальных активов предприятия.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Схема примитивных (прямых) взаимодействий факторов представляется экспертной матрицей  $A$ . Коэффициент  $a_{ij}$  этой матрицы означает оценку сверху первичного прироста фактора  $i$ , вызываемого приращением фактора  $j$  (аналог пропускной способности канала, направленного от фактора  $j$  к фактору  $i$ ). Задачей анализа транзитивного замыкания взаимодействий из рассматриваемой совокупности факторов является расчет оценок полного взаимовлияния факторов, учитывающих как прямые, так и косвенные воздействия, а также получение выводов об эффективности механизмов управления с точки зрения их воздействия на целевые показатели с индексами  $i \in C$ . Исходный этап анализа – подготовка экспертных данных, представляющих первичные оценки степени взаимовлияния рассматриваемых факторов друг на друга. Результат анализа – полные оценки степени взаимовлияний факторов, учитывающие расширенный набор цепочек транзакций. Применяемые в модели оценки представляются в баллах и интерпретируются как значения истинности в многозначной логике. Для операций над оценками используются соответствующие действия многозначной логики.

В процедуре поиска управляющих решений рассматриваются несколько критериев с индексами  $i \in C$ , а среди факторов множества  $M$  выделяется управляющая группа  $U \subset M$ . Будем обозначать  $[M]$  множество индексов, соответствующих элементам  $M$ . Пусть значения критериев  $f_i(r), r \in U$  рассчитываются как линейная свертка оценок факторов  $\Delta y_j, j \in [M]$  с заданными весами  $s_{ij}, i \in C; j \in [M]$

$$f_i(r) = \sum_{j \in [M]} \Delta y_j(r) \cdot s_{ij}.$$

Для критериев группы  $C$  ищется множество стратегий (векторов приращений оценок факторов), обладающих экстремальными свойствами на множестве значений факторов управляющей группы  $U$ .

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Принятие решений при управлении сложными объектами требует учета большого числа одновременно действующих факторов. Поскольку исчерпывающий количественный анализ всего действующего набора этих факторов весьма затруднителен, имеет смысл исследовать их системное влияние на качественном уровне с применением моделей причинно-следственных влияний и методов сценарного анализа [1, 2]. Исходная система взаимных влияний в результате рефлексивного наложения всех косвенных воздействий формирует систему полных влияний как их транзитивное замыкание [3].

Результаты рефлексий оценок взаимодействий могут быть использованы в качестве подсказок при рациональном выборе набора управляющих факторов и принятии решений в ситуации, когда требуется учитывать значения более одного критерия [4, 5]. При этом, по аналогии

с матричными играми [6, 7], приходится применять идею смешанных стратегий [8]. Если применить принцип равнозначности критериев, то в работе показано, что можно перейти к одному взвешенному критерию, структура которого (набор управляющих факторов) зависит от исходных данных.

Свойство гибкости критерия присуще саморазвивающимся системам [9]. Понятия саморазвития, самоорганизации привлекают внимание известных исследователей [10]. К саморазвивающимся системам относятся также социально-экономические и организационные системы [11]. Яркими примерами нестабильных саморазвивающихся систем с автономным управлением являются национальная и мировая экономические системы, демонстрирующие циклический характер развития, плохо предсказуемые спады и кризисы. Тем не менее, в условиях изменяющейся (возможно дестабилизирующей) внешней среды саморазвивающиеся системы могут обладать потенциальной способностью поддерживать в течение определенного времени установившийся режим функционирования. Последнее обеспечивается внутренними механизмами выбора, как управляющих воздействий, так и критериев принятия решений в соответствии с состоянием самой системы и внешней среды [6].

В качестве примера применения метода анализа рассматривается выбор на уровне национальной экономической системы ведущих факторов управления нематериальными активами. Нематериальные активы (НМА) играют все большую роль в развитии экономики, основанном на инновациях, высоких технологиях, интеллектуальном багаже. Обычно к НМА предприятия причисляют типы активов, представляющие собой долгосрочные вложения в приобретение прав на имущество и не имеющее материальной формы, но приносящее предприятию доход [12, 13].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый метод включает процедуру рефлексий для расчета транзитивного замыкания первичных оценок и процедуру формирования взвешенного критерия для сбалансированного учета нескольких критериев, учитывающих различные аспекты выбора.

Рассмотрим ситуацию с двумя критериями  $C = \{1,2\}$ . При этом, по критерию 1 (например, доходу) мы ищем максимум, а по критерию 2 (затратам) – минимум. Обозначим  $U^l$  – множество стратегий  $r$ , включающие  $l$  факторов из множества  $U$ . Определим две группы стратегий, согласно которым будет вычисляться экстремум: минимаксную (гарантированный доход) и максиминную (неизбежные потери).

Стратегия 1. Обозначим для минимаксной задачи  $U1^l = \arg \max_{r \in U1^l} f1(r)$  – множество стратегий, для которых реализуется максимум 1-го критерия,  $U12^l = \arg \min_{r \in U1^l} f2(r)$  – часть множества Парето для 2-х критериальной задачи, где приоритетным является 1-й критерий. Обозначим экстремальные значения критериев в этой задаче  $f1^{\max} = \max_{r \in U1^l} f1(r)$  и  $f2^{\max} = \min_{r \in U1^l} f2(r)$ .

Стратегия 2. Аналогично для максиминной задачи  $U2^l = \arg \min_{r \in U2^l} f2(r)$  – множество стратегий, для которых реализуется минимум 2-го критерия,  $U21^l = \arg \max_{r \in U2^l} f1(r)$  – часть множества Парето для 2-х критериальной задачи, где приоритетным является 2-й критерий. Обозначим экстремальные значения критериев в этой задаче  $f2^{\min} = \min_{r \in U1^l} f2(r)$  и  $f1^{\min} = \max_{r \in U2^l} f1(r)$ .

Смешанная стратегия. Выбор управляющего решения должен учитывать результаты двух рассмотренных стратегий. Для этого можно использовать смешанную стратегию, ориентированную на чистый эффект от выбора управляющего решения. Поскольку критерии инвариантны относительно выбора масштабного коэффициента для весов  $s_{ij}, i \in C; j \in [M]$ , смешанную стратегию

$$\hat{f}(r) = f1(r) + \alpha \cdot f2(r)$$

будем определять по принципу равновесия гарантированного дохода и неизбежных потерь

$$\hat{f}(U12^l) = \hat{f}(U21^l),$$

то есть

$$f1(U12^l) + \alpha \cdot f2(U12^l) = f1(U21^l) + \alpha \cdot f2(U21^l),$$

откуда

$$\alpha = (f1(U12^l) - f1(U21^l)) / (f2(U21^l) - f2(U12^l))$$

или

$$\alpha = (f1^{\min} - f1^{\max}) / (f2^{\max} - f2^{\min}).$$

$$\text{Если } f2^{\max} \neq f2^{\min}.$$

$$\text{Если } f2^{\max} = f2^{\min}, \text{ тогда } \hat{f}(r) = f2(r).$$

$$\text{Если } f1^{\max} = f1^{\min}, \text{ тогда } \hat{f}(r) = f1(r).$$

Здесь весовой коэффициент  $\alpha$  трактуется как относительная частота решений  $U21^l$  по отношению к решениям  $U12^l$ . Таким образом, критериальная функция смешанной стратегии  $\hat{f}(r)$  зависит от количества факторов  $l$ , определяющего выбор конфигурации решающего правила, а решение и значение критерия определяются также количеством факторов  $l$ . Следовательно, при использовании смешанной стратегии необходимо получить оптимальные значения критерия при различных  $l$  и выбрать то, которое соответствует максимальному значению критерия. Смешанная стратегия позволяет сформировать критерий, отвечающий актуальным, краткосрочным целям развития и выделить группу факторов, наиболее соответствующих этому критерию.

Для формирования обобщающего критерия, соответствующего долгосрочным целям, может быть использован метод нелинейной свертки частных критериев на основе экспертных данных (комплексного оценивания [5]).

В процедуре рефлексий с логическим выводом при оценивании результатов взаимного влияния факторов рассматриваемым факторам могут быть приписаны численные значения показателей (оценки) состояния  $\chi_i$ . Прирост факторов, определяемый непосредственным действием действующих механизмов, будем характеризовать как результат примитивных взаимодействий. Наблюдаемые результаты взаимодействий факторов (полные взаимодействия) определяются как примитивными, так и косвенными влияниями. Примитивные влияния могут отличаться по степени (интенсивности) и характеру действия. Последний определяется свойствами группового воздействия: независимым или совместным. При групповом воздействии его результат оценивается по свертке оценок влияния компонент группы.

Оценки интенсивности и надежности (риска) взаимодействия могут представляться в балльной шкале. Значения коэффициентов  $a_{ij}$  матрицы примитивных взаимодействий  $\mathbf{A}$ , назначаемые экспертным способом, находятся в интервале от  $a \min$  до  $a \max$ . Знаки коэффициентов определяются характером влияния – положительным или отрицательным. Для обозначения совместного воздействия факторов кроме численного значения используются символы групп влияния.

Операции над оценками (компонентами вектора оценок состояния  $\mathbf{x}$  и матрицы  $\mathbf{A}$ ) следующие: логическая сумма  $\oplus$  (аналог конъюнкции, или логической суммы в булевой алгебре), логическое произведение  $\otimes$  (аналог дизъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре).

Результат однократного воздействия факторов переводит приращение  $\Delta \mathbf{x}$  их начального вектора состояния  $\mathbf{x}$  в состояние  $\mathbf{y} \oplus \Delta \mathbf{y}$ , определяемое как действие логической векторной операции

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{A} \otimes \Delta \mathbf{x}, \quad (1)$$

где знаком  $\otimes$  обозначена векторная операция логического умножения матрицы на вектор.

Свойствами операций многозначной логики обладают следующие правила. Результат независимого примитивного воздействия фактора  $j$  на фактор  $i$  представляется формулой логического умножения

$$y_{ij} = a_{ij} \otimes \Delta x_j = \min(|a_{ij}|, |\Delta x_j|) \text{ sign}(a_{ij} \Delta x_j).$$

Результат совместного взаимно дополнительного (комплементарного) воздействия группы факторов  $g$ , когда для результата требуется воздействие всех факторов группы, представляется формулой

$$\Delta y_i g = \min_j \{|\Delta y_{ij}|\} \text{ sign}(\prod_j \Delta y_{ij}), j \in g.$$

Для обозначения совместного воздействия факторов кроме численного значения используется символ групп влияния.

Результат взаимно компенсирующего (субституционального) воздействия факторов  $j$  и  $k$  на фактор  $i$ , когда для результата достаточно любого из действующих факторов, представляется формулой логической суммы

$$\Delta y_{ij} \oplus \Delta y_{ik} = \max(|\Delta y_{ij}|, |\Delta y_{ik}|) \text{ sign}(\Delta y_{ij} + \Delta y_{ik} \pm \varepsilon),$$

где  $0 < \varepsilon < 1$  – добавка, позволяющая оценить разброс результатов в результате вычислительной неоднозначности операции  $\text{sign}$ .

Будем считать, что номенклатура компонент векторов  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{y}$  совпадают (матрица  $\mathbf{A}$  квадратная). Тогда итеративное применение операции (1) отражает изменение состояния в модельном времени. Для расчета транзитивного замыкания оценок взаимодействия  $\Delta \bar{\mathbf{x}}$  можно использовать итеративную процедуру, использующую операцию (1) при замене  $\Delta \mathbf{y}$  на  $\Delta \bar{\mathbf{x}}$ .

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Приведем рассматриваемый перечень факторов малого предприятия, взаимовлияние которых мы будем рассматривать.

1. Бренды.
2. Знания.
3. Технологии.
4. Образование.
5. Предпринимательская активность.
6. Климат благоприятствования НТП.
7. Экспорт и импорт услуг.
8. Международные ценные бумаги.
9. Лицензии на осуществление вида деятельности.
10. Лицензии на осуществление внешнеторговых и котируемых операций.
11. Цена фирмы.
12. Права пользования природными ресурсами.
13. Лицензии на использование опыта специалистов.
14. Расходы на НИОКР.
15. Обучение специалистов.
16. Реклама.
17. Патенты.

Экспертную оценку прямого взаимного влияния факторов представляем в виде таблицы с экспертными оценками  $a_{ij}$ , где значения оценок лежат в интервале от 0 до 10. Оценки, имеющие совпадающий буквенный индекс, являются комплиментами.

Заметим, что оказывать влияние мы можем лишь на часть факторов, поэтому составим список факторов, которые возможно изменить. Это 12 факторов: Бренды, Знания, Технологии, Образование, Предпринимательская активность, Экспорт и импорт услуг, Лицензии на осуществление вида деятельности, Лицензии на осуществление внешнеторговых и котируемых операций, Лицензии на использование опыта специалистов, Расходы на НИОКР, Обучение специалистов, Реклама и Патенты.

Среди этих факторов будем искать те, изменение которых повлечет наилучший результат. В качестве оценки наилучшего результата будем считать значения для оценки затрат на осуществление данного результата и капитализации, получаемой в результате. Для этого составим экспертные оценки стоимости и прибыли в зависимости от каждого фактора. Будем получать значения для этих критериев путем произведения выходного вектора на вектор оценки.

Таблица 1 – Матрица оценок прямых зависимостей факторов друг от друга

Факторы \ №№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1. Бренды.		4	6								5					5	
2. Знания.				7									3		5		
3. Технологии.		4		5								3		4	3		
4. Образование.															7		
5. Предпринимательская активность.						6	3		4								
6. Климат благоприятствования НТП.													5				
7. Экспорт и импорт услуг.					7			3	4	5							6
8. Международные ценные бумаги.										8							
9. Лицензии на осуществление вида деятельности.	8a				6a												7
10. Лицензии на осуществление внешнеторговых и котируемых операций.					5b		6b										
11. Цена фирмы.	7						6										8
12. Права пользования природными ресурсами.					4												
13. Лицензии на использование опыта специалистов.					6c												8c
14. Расходы на НИОКР.						7d									6d		
15. Обучение специалистов.						5											
16. Реклама.	6e					5e											7
17. Патенты			8f	4f								2					

Таблица 2 – Коэффициенты свертки  $s_{ij}$ 

Номер фактора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Капитализация $S1_j$	5	0	3	0	0	0	6	5	4	5	7	3	2	0	0	0	6
Стоимость $S2_j$	6	0	6	0	0	0	3	0	4	5	0	4	5	4	3	6	4

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Процесс поиска наилучшего вектора устроим таким образом: среди векторов приращений с определенным количеством изменяемых факторов (1–4) будем искать те, которые определяют минимальные затраты при максимальной капитализации и те, которые будут соответствовать максимальной капитализации при минимальных затратах.

Таким образом, получаем 8 пар (стоимость, капитализация) значений для различного количества изменяемых исходных параметров. В каждой из таблиц указаны стоимости реализации и полученное при этом приращение капитала, а также номера управляющих факторов, при которых достигаются данные значения. В двух последних строках таблицы приводятся значения весового коэффициента  $\alpha$  и критериальной функции смешанной стратегии  $\hat{f}(r)$ .

Оптимальное значение 48,6 смешанного критерия достигается при количестве управляющих факторов  $l = 3$  и весовом коэффициенте  $\alpha = 0,84$  факторов сценария (2).

Графический вид результатов представлен на рис. 1.

В результате проведенного анализа отметим, что при увеличении количества управляющих факторов относительное изменение критериальных факторов достаточно невелико. При этом, при переходе от простых стратегий к более сложным (количество управляющих факторов  $l$  меняется от 1 до 4), объем капитала возрастает, а разность между ним и стоимостью уменьшается. Таким образом, выбор рациональной стратегии управления НМА может заключаться в компромиссе между этими стратегиями.

Основными факторами, влияющими на результат в случае использовании стратегии (1) являются 3, 5, 10 и 17, то есть Технологии, Предпринимательская активность, Лицензии на осуществление внешнеторговых и котируемых операций и Патенты соответственно. В случае использовании стратегии (2) основополагающими факторами являются 1, 2, 3, 14 и 16, то есть Бренды, Знания, Технологии, Расходы на НИОКР и Реклама.

При использовании смешанной стратегии основными (с весом 1) факторами, влияющими на результат, являются 5, 10, 17 (Предпринимательская активность, Ли-

Таблица 3 – Результаты расчетов

Количество управляющих факторов $l$		1		2		3		4	
Стратегия		1	2	1	2	1	2	1	2
Управляющие факторы $U^l$		5	1	10, 17	1, 16	5, 10, 17	1, 3, 16	3, 5, 10, 17	1, 2, 14, 16
Капитализация		216	74	261	74	279	79	284	86
$f_1^{\max}$	$f_1^{\min}$								
Стоимость		174	30	242	30	273	36	279	54
$f_2^{\max}$	$f_2^{\min}$								
$\alpha$		-0,98611		-0,88208		-0,84388		-0,88	
$\hat{f}(U_{12}^l)$	$\hat{f}(U_{21}^l)$	44,41667	44,41667	47,53774	47,53774	48,62025	48,62025	38,48	38,48

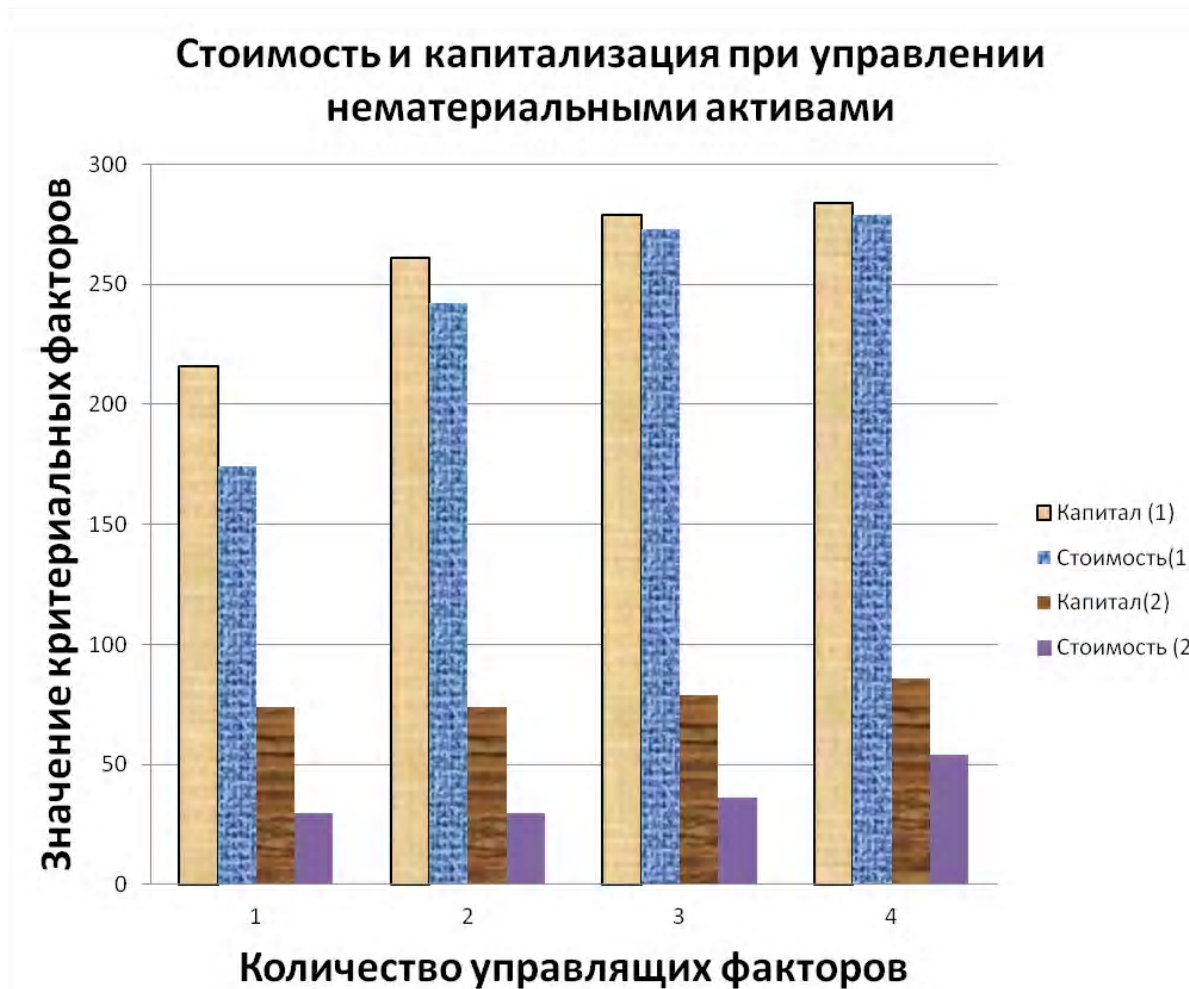


Рисунок 1 – Результаты анализа стратегий управления нематериальными активами предприятия

цензии на осуществление внешнеторговых и котируемых операций и Патенты); и с весом 0,84 – факторы 1, 3, 16 (Бренды, Технологии, Реклама).

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод принятия решений включает две составляющие, обладающие принципиальной новиз-

ной: процедуру рефлексий для расчета транзитивного замыкания первичных оценок и процедуру формирования взвешенного критерия для сбалансированного учета нескольких критериев, учитывающих различные аспекты выбора. Специфика рассмотренной задачи заключается в наличии неопределенности, заключенной, как в свойствах экспертных данных, так и в наличии несколь-

ких критерієв вибору. Применение алгебры многозначной логики в процедуре рефлексий позволяет наиболее адекватно учитывать экспертные данные при оценивании вариантов принятия управленческих решений. Формирование взвешенного критерия основано на балансировке (учете степени важности) максиминного и минимаксного значений исходных критерієв. Процесс балансировки осуществляется для различных количеств учитываемых факторов. При этом обнаружено, что наилучший результат реализуется на собственном подмножестве множества управляющих факторов (в рассмотренном примере в выбранном смешанном критерии учитывались 3 фактора из 12 управляющих факторов). Этот эффект можно объяснить тем, что в ситуации неопределенности решающее значение имеет лишь ограниченное множество управляющих факторов из всего множества возможных управлений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый алгоритм исследования взаимовлияния различных факторов (в нашем примере инструментов управления нематериальными активами предприятия). Предложенный метод моделирования и принятия решений, использующий экспертные данные, оценивает устойчивые взаимосвязи с учетом системного эффекта от взаимодействия большого количества факторов, отследить который в ручном режиме не представляется возможным. Анализ различных сценариев управления позволяет выделить набор перспективных факторов НМА с точки зрения их влияния на заданные критерии в долгосрочном периоде. Смешанный сценарий позволяет выделить наиболее перспективные факторы НМА (преимущественно в краткосрочном периоде). Метод позволяет принимать рациональные управленческие решения в области управления нематериальными активами предприятия.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Даная работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН: «Модели, методы и процедуры выбора управленческих решений при реализации программ развития крупномасштабных региональных и производственно-транспортных систем. Комплексирование методов моделирования, оптимизации и искусственного интеллекта, предназначенных для формирова-

ния и реализации программ инновационного развития региональных производственных систем».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В. Б. Принятие решений в сильносвязанных структурах взаимодействия факторов и следствий / В. Б. Гусев // Конгресс по интеллектуальным системам и технологиям «AIS-IT'10»: труды конгресса. Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2010. – Т. 1. – С. 124–130.
2. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Томас Л. Саати; науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с.
3. Гусев В. Б. Метод рефлексивного оценивания взаимодействия факторов денежно-кредитной политики / В. Б. Гусев, Н. А. Исаева // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 часть 9. – С. 2005–2009.
4. Гусев В. Б. Экспертный анализ системного эффекта от взаимовлияний факторов кредитно-денежной политики для поддержки принятия решений на основе рефлексивных процедур линейного оценивания и логического вывода / В. Б. Гусев, Н. А. Исаева // Проблемы управления. – 2014. – № 6. – С. 59–67.
5. Гусев В.Б. Использование непрерывных шкал при оценивании и принятии решений в сложных проблемных ситуациях: научное издание / В. Б. Гусев, В. В. Павельев. – М.: ИПУ РАН, 2013. – 118 с.
6. Нейман Дж. Теория игр и экономическое поведение / Дж. Нейман, О. Моргенштерн. – М.: Наука, 1970. – 418 с.
7. Гермейер Ю. Б. Игры с противоположными интересами / Ю. Б. Гермейер. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1976. – 381 с.
8. Таха Х. А. Введение в исследование операций. 6-е издание / Х. А. Таха. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 902 с.
9. Князева Е. Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М.: Наука, 1994. – 238 с.
10. Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов / Дж. Нейман. – М.: Мир, 1971. – 481 с.
11. Вишневецкий А. Г. Воспроизводство населения и общество: история, современность, взгляд в будущее / А. Г. Вишневецкий. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 287 с.
12. КППМГ. МСФО: точка зрения КППМГ. Практическое руководство по международным стандартам финансовой отчетности, подготовленное КППМГ. – М.: Альпина Паблишер, 2014. – 2832 с. – ISBN 978-5-9614-4604-3.
13. Ernst & Young. Применение МСФО 2011 в 3-х частях / Ernst & Young. – М.: Альпина Паблишер, 2011. – 4000 с. – ISSN 978-5-4295-0019-5

Статья поступила в редакцию 13.12.2017.  
После доработки 28.12.2017.

Гусев В. Б.

Канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, м. Москва, Российская Федерация

### АНАЛІЗ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРТНИХ ДАНИХ І РЕФЛЕКСИВНИХ ПРОЦЕДУР ВИСНОВКУ

**Актуальність.** Коли рішення є досить часто ситуація, де комплекс об'єкти Office, що діють в умовах невизначеності і характеризуються кілька критеріїв відбору, а також наявність погано вимірюваних параметрів або якісні в природі. В таких ситуаціях щоб отримувати оцінки та прийняття рішень, це розумно застосовувати експерт підходів. Це вимагає розробку спеціальних методів для формалізації розглянутих об'єктів і систем управління, а також відповідних процедур чисельного обробки знань.

**Мета.** Метою проекту є вдосконалення процедур оцінки впливу взаємодії чинників управління на основі досвіду та вибір методу раціональні рішення, коли у вас є кілька критеріїв.

**Метод.** Стадії розгляду – метод експертного аналізу, використовує Рефлексивне процедури багатозначних логічного виведення отримати Транзитивне замикання оцінок взаємного впливу факторів та методу прийняття рішень на основі збалансоване врахування кілька критеріїв.

**Результати.** Запропонованих рішень містить у собі дві складові: порядок розрахунку Транзитивне замикання роздуми первинні оцінки та порядок формування зважених критеріїв для балансування кілька критеріїв, що брати до уваги різні аспекти виділення. У ситуації двухкритеріальності представила гнучкий критерію, формування якого ґрунтується на балансуванні (зареєстрований рівень важливості) і максиминного МініМакс посилення критерії та цінності використання відповідних підмножин включені факторів. Як приклад обчислення раціональним вибором структури нематеріальних активів компанії.

**Висновки.** Специфіка розглянутий підхід з основних новизна зареєстрованих невизначеності, укладений як експерт дані в властивості і є кілька критеріїв відбору. Використання процедури Багатозначна логіка алгебра роздуми може адекватно брати до уваги досвід при оцінці варіантів для управлінських рішень. Гнучка критерієм є атрибут самоорганізації керовані системи. Метод експертного аналізу, контролю факторів, з урахуванням ефектів їх взаємодії, щоб оцінити і виділити найбільш важливих факторів, з точки зору конкретні критерії, приймати раціональні рішення щодо того, реагувати на ситуацію а також з довгострокове також стратегічне планування. Числовий приклад є інформативним, демонструючи ефективність запропонованого підходу.

**Ключові слова:** експертні дані, багатозначний логічний висновок, оцінки взаємного впливу факторів, транзитивне замикання, керування нематеріальними активами підприємства.

Gusev Vladislav Borisovich

PhD, Associate Professor, Chief of laboratory, Institute of Control Sciences of V. A. Trapeznikov, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

#### DECISION ANALYSIS ON THE BASIS OF EXPERT DATA AND REFLEXIVE PROCEDURES OF THE CONCLUSION

**Relevance.** At decision-making the situation is rather widespread when difficult objects of management function in the conditions of uncertainty and are characterized by existence of several criteria of a choice, and also by existence the parameters which are badly giving in to measurement or having qualitative character. In such situations it is reasonable to apply expert approaches to receiving estimates and decision-making. It in turn demands the development of special methods of formalization of the considered objects and control systems, and also the corresponding procedures of numerical processing of expert data.

**Purpose.** The purpose of work is development of procedures of calculation of estimates for consequences of interaction of factors of management on the basis of expert data and a method of a choice of rational decisions in the presence of several criteria.

**Method.** A subject of consideration is the method of the expert analysis using reflexive procedures of a multiple-valued logical conclusion for receiving transitive short circuit of estimates of mutual influence of factors and a decision-making method on the basis of the balanced accounting of several criteria.

**Results.** The offered method of decision-making includes two components: procedure of reflections for calculation of transitive short circuit of primary estimates and procedure of formation of the weighed criterion for the balanced accounting of several criteria considering various aspects of a choice. The flexible criterion which formation is based on balancing (the accounting of degree of importance) of maximin and minimax values of initial criteria and on use of a relevant subset of the considered factors is entered into double criteria situations. Calculation of a rational choice of structure of intangible assets of the enterprise is given as an example.

**Conclusions.** Specifics of the considered approach possessing basic novelty consist in the accounting of the uncertainty concluded as in properties of expert data, and available several criteria of a choice. Application of algebra of multiple-valued logic in procedure of reflections allows considering most adequately expert data at estimation of options of adoption of administrative decisions. The flexible criterion is attribute of self-organization of the operated system. The developed method of the expert analysis of factors of management considering consequences of their interaction allows estimating and allocating the most significant factors from the point of view of the set criteria, to make rational decisions as for rapid response to current situation, and at long-term and strategic planning. The numerical example represents informative demonstration of efficiency of the offered approach.

**Keywords:** expert data, multiple-valued logical conclusion, estimates of mutual influence of factors, transitive short circuit, management of intangible assets of the enterprise.

#### REFERENCES

1. Gusev V.B. Prinyatie reshenii v sil'nosvyazannykh strukturakh vzaimodeistviya faktorov i sledstviy, *Kongress po intellektual'nykh sistemam i tehnologiyam «AIS-IT'10»: trudy kongressa. Nauchnoe izdanie v 4-h tomah.* Moscow, Fizmatlit, 2010, Vol. 1, pp. 124–130.
2. Saati Tomas L. ; nauch. red. A. V. Andreichikov, O. N. Andreichikova Prinyatie reshenii pri zavisimostyah i obratnykh svyazyah: Analiticheskie seti. Per. s angl. Izd. 2-e. Moscow, Knizhnyi dom «LIBROKOM», 2009, 360 p.
3. Gusev V. B., Isaeva N. A. Metod refleksivnogo ocenivaniya vzaimodeistviya faktorov denezhno-kreditnoi politiki, *Fundamental'nye issledovaniya*, 2013, No.10 chast' 9, pp. 2005–2009.
4. Gusev V. B., Isaeva N. A. Ekspertnyi analiz sistemnogo effekta ot vzaimovliyaniy faktorov kreditno-denezhnoi politiki dlya podderzhki prinyatiya reshenii na osnove refleksivnykh procedur lineinogo ocenivaniya i logicheskogo vyvoda, *Problemy upravleniya*, 2014, No. 6, pp. 59–67.
5. Gusev V. B., Pavel'ev V. V. Ispol'zovanie nepreryvnykh shkal pri ocenivanii i prinyatii reshenii v slozhnykh problemnykh situatsiyah: nauchnoe izdanie. Moscow, IPU RAN, 2013, 118 p.
6. Neiman Dzh., Morgenshtern O. Teoriya igr i ekonomicheskoe povedenie. Moscow, Nauka, 1970, 418 p.
7. Germeier Yu. B. Igrы s neprotivopolozhnymi interesami. Moscow, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoi literatury izdatel'stva «Nauka», 1976, 381 p.
8. Taha Hemedi A. Vvedenie v issledovanie operacii. 6-e izdanie. Moscow, Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2001, 902 p.
9. Knyazeva E. N., Kurdyumov S. P. Zakony evolyucii i samoorganizacii slozhnykh sistem. Moscow, Nauka, 1994, 238 p.
10. Neiman Dzh. Teoriya samovosproizvodnykh avtomatov. Moscow, Mir, 1971, 481 p.
11. Vishnevskii A. G. Vosпроизводство naseleniya i obshestvo: Istoriya, sovremennost', vzglyad v budushee. Moscow, Finansy i statistika, 1982, 287 p.
12. KPMG. MSFO: tochka zreniya KPMG. Prakticheskoe rukovodstvo po mezhdunarodnym standartam finansovoi otchetnosti, podgotovlennoe KPMG. Moscow, Al'pina Publisher, 2014, 2832 p. ISBN 978-5-9614-4604-3.
13. Ernst & Young. Primenenie MSFO 2011 v 3-h chastyakh. Moscow, Al'pina Publisher, 2011, 4000 p. ISSN 978-5-4295-0019-5



УДК 519.63

Дивак М. П.<sup>1</sup>, Порплиця Н. П.<sup>2</sup>, Масляк Ю. Б.<sup>3</sup>, Пукас А. В.<sup>4</sup>, Мельник А. М.<sup>5</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна<sup>2</sup>Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна<sup>3</sup>Аспірант кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна<sup>4</sup>Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна<sup>5</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна

## МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ З ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИМ КЕРУВАННЯМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

**Актуальність.** В теорії ідентифікації систем розроблено ряд методів для побудови моделей об'єктів з розподіленими параметрами. Основою математичних моделей таких об'єктів являються системи диференціальних рівнянь в частинних похідних або їх різницевої аналогії. Разом з тим, для синтезу різницевого аналога необхідно використовувати методи структурно-параметричної ідентифікації. Переважно такі методи ґрунтуються на випадкових даних експерименту і похибки вимірювань не враховуються. У випадку урахування похибок вимірювань отримуємо дані в інтервальному вигляді. Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації математичних моделей використовують поведінкові моделі медоносних бджіл, які в літературі називають алгоритми бджолоїної колонії (АБК). Разом з тим, випадки структурної ідентифікації математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних, коли об'єкт з розподіленими параметрами містить просторово розподілені керуючі фактори, в літературі не розглянуто, однак є актуальними для задач моделювання просторового розподілу концентрацій забруднюючих речовин в атмосфері, задач температурно-керованого сушіння тощо.

**Мета роботи** – адаптація відомих методів АБК для розв'язування задачі структурно-параметричної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами з додатковим урахуванням просторово розподіленого керування.

**Метод.** Структурну та параметричну ідентифікацію здійснено на основі методу аналізу інтервальних даних. В запропонованому методі оператори синтезу структури моделі, на відміну від існуючих методів, побудовано на застосуванні роевого інтелекту, зокрема, на основі алгоритму бджолоїної колонії.

**Результати.** Наведено приклад застосування методу для задачі моделювання процесу сушіння гіпсокартону на завершальній стадії його виробництва. Змодельовано два режими представлення просторово розподіленого керування у вигляді температурного поля сушильної камери. Побудована математична модель адекватно відображає розподіл вологості на листі гіпсокартону при реалізації процесу його сушіння.

**Висновки.** Запропоновано метод ідентифікації інтервальних моделей об'єктів із розподіленими параметрами для випадку просторово розподіленого керування, в якому оператори синтезу структури моделі, на відміну від існуючих методів, побудовано на застосуванні роевого інтелекту. Важливою особливістю запропонованого методу є його можливість достатньо ефективно «обходити» локальні мінімуми, тобто відкидати ті набори структурних елементів моделі, які не забезпечують її задані прогностичні властивості, чи призводять до переускладнення.

**Ключові слова:** інтервальний аналіз даних, структурно-параметрична ідентифікація, алгоритм бджолоїної колонії.

### НОМЕНКЛАТУРА

ІСНАР – інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь;

АБК – алгоритм бджолоїної колонії;

РО – різницевий оператор;

ІРО – інтервальний різницевий оператор;

$\vec{f}^T(\bullet)$  – вектор невідомих базисних функцій, що визначає структуру різницевого оператора;

$V_{i,j,h,k}$  – модельована характеристика у точці з дискретно заданими просторовими координатами в момент часу  $k$ ;

$i, j, h$  – дискретно задані просторові координати;

$k$  – часова дискрета;

$\vec{u}$  – вектор вхідних змінних (керуючих факторів);

$\vec{g}$  – вектор невідомих параметрів РО;

$\eta_1(i, j, h, k), \dots, \eta_p(i, j, h, k)$  – відомі функції, які однозначно визначають розподіл керуючих факторів у всіх вузлах вимірювальної сітки;

$p$  – номер керуючого фактору;

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

$[\hat{v}_{i,j,h,k}]$  – інтервальні оцінки прогнозованої характеристики;

$\{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{I_s}^s(\bullet)\} \subset F$  – набір структурних елементів, що задає поточну  $s$ -у структуру ІРО;

$\lambda_s$  – поточна структура ІРО;

$m_s$  – кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ ;

$[I_{\min}; I_{\max}]$  – інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне та максимальне значення потенційної кількості структурних елементів у структурі ІРО;

$F$  – множина усіх структурних елементів;

$|F| = L$  – потужність множини  $F$ ;

$\hat{g}^s$  – вектор відомих значень параметрів, оцінений для поточної структури ІРО;

$\Delta$  – множина усіх можливих структур IPO;  
 $\delta(\lambda_s)$  – функція мети;  
 $\text{mid}(\bullet)$ ,  $\text{wid}(\bullet)$  – операції визначення центру та ширини інтервалів, відповідно;  
 $MCN$  – максимальна кількість ітерацій;  
 $LIMIT$  – максимально можлива кількість ітерацій «незмінності» структури;  
 $S$  – початкова кількість структур IPO;  
 $[\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+]$  – інтервальні оцінки рівня вологості на листі гіпсокартону в точках з дискретно заданими координатами в момент часу  $k$ ;  
 $\eta_p(i, j, k)$  – функція, яка задає значення температури в сушильній камері в точках з дискретно заданими координатами в момент часу  $k$ .

### ВСТУП

Задачі моделювання об'єктів з розподіленими параметрами є одними з найскладніших, оскільки, крім моделювання часових змін, необхідно одночасно моделювати просторовий розподіл їх характеристик. Під розподіленими параметрами таких об'єктів розуміють їх характеристики, наприклад: тиск, температуру, густину, вологість, рівень концентрації тощо. Такий параметр (характеристику) об'єкта називають його розподіленим параметром. Значення цього параметра відрізняється у різних точках об'єкта, тобто розподілені по ньому. Тоді об'єкт, який характеризується кількома такими параметрами (характеристиками), називають об'єктом з розподіленими параметрами.

В теорії ідентифікації розроблено ряд методів для побудови моделей таких об'єктів. В основі математичних моделей таких об'єктів є система диференціальних рівнянь в частинних похідних або її різницеві аналоги. Разом з тим, для синтезу різницевого аналога необхідно використовувати методи структурно-параметричної ідентифікації. Такі методи розроблені у працях Івахненка О. Г., Степашка В. С. [1, 2], проте передбачається, що дані експерименту є випадковими і не враховуються похибки вимірювань. У випадку урахування похибок вимірювань отримуємо дані в інтервальному вигляді. В цьому випадку задача ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами суттєво ускладнюється, оскільки передбачає оцінювання хоча б одного розв'язку ІСНАР [3, 7, 10]. Для формування загальної структури моделі використовують методи групового урахування аргументів або ж генетичні алгоритми, однак ці методи не придатні у випадку представлення результатів експерименту в інтервальному вигляді.

Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації математичних моделей використовують поведінкові моделі медоносних бджіл, які в літературі називають алгоритмами бджолиної колонії (АБК) [4–6]. Проте, якщо математична модель містить входні змінні у вигляді просторово розподілених керуючих факторів, зазначена задача суттєво ускладнюється. Тому метою даної праці є адаптація відомих методів АБК для розв'язування задачі структурно-параметричної ідентифікації моделей

об'єктів з розподіленими параметрами з додатковим урахуванням просторово розподіленого керування.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачу структурної ідентифікації РО зазвичай розглядають у такому загальному вигляді [6, 7]:

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

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

Однак, у випадку розв'язування задач ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами з просторово розподіленими керуючими факторами (значення керуючих факторів не є сталими для усіх вузлів вимірювальної сітки), доцільно переписати загальний вигляд РО (1) наступним чином:

$$v_{i,j,h,k} = \tilde{f}^T(v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \eta_1(i, j, h, k), \dots, \eta_p(i, j, h, k)) \cdot \vec{g},$$

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, h = 1, \dots, H, k = 1, \dots, K, p = 1, \dots, P, \quad (2)$$

Зауважимо, що функція керування може бути задана як аналітично, так і таблично. Наприклад, у випадку двовимірної вимірювальної сітки, розподіл керуючого фактору можна подати у вигляді таблично заданої функції  $\eta_1(i, j, k)$  наступним чином (табл. 1).

Наприклад, у табл. 1 значення  $\eta_1(0, 0, 1)$  означає відоме значення фактору керування у вузлі вимірювальної сітки з координатами  $i=0, j=0$ , в момент часу  $k=1$ .

Загальний вигляд РО (2) отримуватимемо на основі аналізу експериментальних даних, які представлено в інтервальному вигляді та отримано для обмеженої кількості часових дискрет за умов просторово розподілених керуючих факторів впливу. При цьому вектор оцінок  $\hat{\vec{g}}$  параметрів  $\vec{g}$  та вектор базисних функцій  $\tilde{f}^T(\bullet)$  у різницевому операторі (2) отримуватимемо із умов забезпечення гарантованої точності моделі:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] \in [z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+],$$

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

Інтервальні оцінки прогнозованої характеристики з виразу (3)  $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$  обчислюватимемо на основі такого різницевого оператора:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] = [\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+] = \tilde{f}^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, h = 1, \dots, H, k = 1, \dots, K, p = 1, \dots, P. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Таблично задана функція

$j \backslash i$	0	...	1
0	$\eta_1(0, 0, 1)$	...	$\eta_1(I, 0, 1)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
J	$\eta_1(0, J, 1)$	...	$\eta_1(I, J, 1)$

Беручи до уваги те, що всі обчислення в РО (4) необхідно проводити із застосуванням правил інтервальної арифметики, РО (4) будемо називати ІРО [3, 6–8].

Складність задачі налаштування ІРО (4) полягає в тому, що невідомими є не лише параметри, а і його структура. Для початку введемо ряд позначень, які необхідні для розкриття суті формальної постановки задачі.

Позначимо за  $\lambda_s$  поточну структуру ІРО:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot \hat{g}_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot \hat{g}_2^s; \dots; f_m^s(\bullet) \cdot \hat{g}_m^s\} \subset \Lambda. \quad (5)$$

Множина усіх структурних елементів  $F = \{f_1(\bar{v}_{i,j,h,k}, \eta_1(i,j,h,k), \dots, \eta_p(i,j,h,k)); \dots; f_l(\bar{v}_{i,j,h,k}, \eta_1(i,j,h,k), \dots, \eta_p(i,j,h,k)); \dots; f_L(\bar{v}_{i,j,h,k}, \eta_1(i,j,h,k), \dots, \eta_p(i,j,h,k))\}$ . Вектор відомих значень параметрів  $\hat{g}^s$  оцінений для поточної структури ІРО на основі методів параметричної ідентифікації, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку [9, 10].

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури  $\lambda_s$  ІРО у вигляді (4), що задовольняє умови (3) на множині усіх дискрет. Варто зазначити, що параметрична ідентифікація в цьому 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 ІСНАР [3, 7, 10].

Якість поточної структури ІРО оцінюватимемо за значенням показника  $\delta(\lambda_s)$ , який кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (3). Значення показника обчислюватимемо за допомогою таких виразів:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, k=1, \dots, K, p=1, \dots, P} \left\{ \text{mid}(\bar{f}_s^T \times \right. \\ \times ([\bar{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\bar{v}_{0,0,h-1,0}], [\bar{v}_{-1,0,0,0}], \dots, \\ [\bar{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\bar{v}_{-1,j-1,h-1,k-1}], \eta_1(i,j,h,k), \dots, \\ \left. \dots, \eta_p(i,j,h,k)) \cdot \hat{g}^s) - \text{mid}([z_{i,j,h,k}]) \right\}, \quad (6)$$

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

$$\delta(\lambda_s) = \max_{i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, h=1, \dots, H, k=1, \dots, K, p=1, \dots, P} \left\{ \text{wid}(\bar{f}_s^T \times \right. \\ \times ([\bar{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\bar{v}_{0,0,h-1,0}], [\bar{v}_{-1,0,0,0}], \dots, \\ [\bar{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\bar{v}_{-1,j-1,h-1,k-1}], \eta_1(i,j,h,k), \dots, \\ \left. \dots, \eta_p(i,j,h,k)) \cdot \hat{g}^s) \cap [z_{i,j,h,k}] \right\}, \quad (7)$$

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

Вираз (6) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (7) у випадку  $\delta(\lambda_s) = 0$  забезпечує виконання умов (3).

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

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \bar{f}_s(\bullet)} \min, \quad m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \quad \bar{f}_s(\bullet) \in F. \quad (8)$$

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

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

До класу об'єктів та процесів з розподіленими параметрами з просторово розподіленим керуючим фактором, можуть належати, наприклад, процес сушіння гіпсокартону під час його виробництва [11, 12], де його розподіленим параметром (характеристикою) є вологість на поверхні листа, а керуючим фактором – розподіл температурного поля в сушильній камері, та процес поширення забруднення автотранспортом атмосфери, де розподіленим параметром є рівень концентрації шкідливих викидів, а керуючим фактором – розподіл інтенсивності автотранспорту у різних точках ділянки, для якої будують модель та ін.

Як в задачах сушіння гіпсокартону, так і при вимірюванні рівня концентрацій шкідливих викидів у атмосфері, спільним є те, що в одному та в іншому випадках експериментальні дані подають в інтервальному вигляді. Для побудови адекватної моделі потрібно забезпечити її точність в межах вимірних даних з інтервальними похибками. Подібні задачі розглянуто у праці [12]. Але там не враховано просторового розподілу факторів керування. У таких випадках задача суттєво ускладнюється і ідентифікація стає не просто складною оптимізаційною задачею з заданими умовами у вигляді інтервальних даних, а ще й задачею, в якій треба врахувати функцію розподілу. Тому функція мети цієї задачі ускладнюється суттєвим чином. Для знаходження оптимальних параметрів функції мети потрібно застосовувати методи ройового інтелекту, притаманного бджолиній колонії.

У працях [6, 12] розглянуто метод структурно-параметричної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами, який застосовували за умов постійних керуючих факторів впливу. Цей метод побудовано на основі аналогії з харчовою поведінкою колонії медоносних бджіл. Метою цієї праці є удосконалення зазначеного методу структурно-параметричної ідентифікації шляхом урахування функції розподілу керуючих факторів впливу.

Методи ройового інтелекту моделюють колективну поведінку мультиагентних децентралізованих систем. Ці

методи застосовують для розв'язування складних оптимізаційних задач, зокрема багатовимірної оптимізації, дискретної оптимізації, багатокритеріальної оптимізації тощо [4–6]. В основу методів ройового інтелекту покладено біологічний принцип: особини об'єднуються у зграї чи колонії для покращення умов своєї життєдіяльності. Зокрема, кожна особина колонії має більше шансів на виживання у боротьбі з хижаками, загалом колонія може ефективніше проводити пошук їжі, ніж кожна особина самостійно тощо. Таким чином, будь-яка колонія живих організмів у процесі функціонування ефективно вирішує оптимізаційні і, як правило, багатокритеріальні задачі.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вищезгаданий метод структурно-параметричної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами ґрунтується на основі АБК, запропонованого Д. Карраболою для розв'язування оптимізаційної задачі із складною функцією мети багатьох змінних [4–6]. Основна ідея АБК полягає у моделюванні поведінки колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару).

Розглянемо зазначений метод, який побудований на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, шляхом детального аналізу схеми його реалізації, наведеної на рис. 1.

На рис. 1 оператор  $P(\Lambda_{mcn}, F)$  здійснює перетворення структури різницевого оператора у вигляді (5) відповідно до процедури дослідження околу відомого джерела нектару робочими бджолами. У контексті задачі структурної ідентифікації це означає, що на поточній ітерації застосування методу структурної ідентифікації потрібно на основі кожної з поточних структур математичної моделі  $\lambda_s$ , які задають координати відомих джерел нектару, згенерувати по одній «новій»  $\lambda'_s$ , які задаватимуть координати точок в околі цих джерел їжі. Варто зазначити, що згадана «нова» структура означає окіл джерела нектару, тому має бути «близькою» до первинної структури IPO  $\lambda_s$ . Тобто оператор  $P(\Lambda_{mcn}, F)$  здійснює перетворення множини поточних координат джерел нектару в координати точок віх околі, тобто здійснює перетворення множини поточних структур IPO  $\Lambda_{mcn}$ , згенерованих на ітерації алгоритму msp у множини структур IPO  $\Lambda'_{mcn}$ . Генеруємо таку «нову» структуру шляхом заміни випадковим чином частини елементів поточної  $\lambda_s$ . Заміну частини елементів здійснюємо наступним чином: чим «гірша» структура  $\lambda_s$ , тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Показник  $n_s$  визначає кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ , які потрібно замінити.

На рис. 1 оператор попарної селекції  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  «кращої» із структур IPO  $\lambda_s$  та  $\lambda'_s$  за значеннями функції мети відповідно до процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл. Оператор  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  реалізує процес синтезу множини «кращих» структур IPO  $\Lambda^1_{mcn}$  із поточних множин  $\Lambda_{mcn}$ ,  $\Lambda'_{mcn}$ . Та-

ким чином, отримуємо множини структур IPO першого ряду формування  $\lambda_s^1 \in \Lambda^1_{mcn}$ ,  $s=1\dots S$ . Варто зазначити, що розподіл бджіл у популяції задаємо наступним чином: робочі бджоли – 50% популяції; бджоли-дослідники – 50%.

На рис. 1 оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$  означає перетворення структури різницевого оператора у вигляді (1) відповідно до процедури дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками. Оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$  означає перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  з множини структур  $\Lambda^1_{mcn}$  першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму msp, у множини структур IPO  $\Lambda'_s$  (де  $s=1\dots S$ ) у спосіб заміни випадковим чином  $n_s$  елементів кожної структури, елементами із множини структурних елементів  $F$ .

На рис. 1 оператор погрупової селекції  $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$  «кращої» структури IPO із  $\lambda_s^1$  та множини  $\Lambda'_s = \{\lambda_1 \dots \lambda_r \dots \lambda_{R_s}\}$  за значеннями функції мети відповідно до процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару для бджіл-дослідників. Оператор погрупової селекції  $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$  реалізує процес синтезу множини «кращих» структур IPO  $\Lambda^2_{mcn}$  із поточних множин  $\Lambda^1_{mcn}$  та  $\Lambda'_{mcn}$  у спосіб селекції структур IPO  $\lambda_s^2$  за показниками якості, де  $\Lambda'_{mcn} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$ ,  $s=1\dots S$ . Таким чином отримуємо множини структур IPO другого ряду формування  $\Lambda^2_{mcn}$ . Структури IPO  $\lambda_s^2$  другого ряду формування на наступній ітерації застосування методу задають координати множини відомих джерел нектару  $\Lambda^2_{mcn}$ , за якими закріплені робочі бджоли популяції.

Лічильник  $Limit_s$  для кожної поточної структури IPO, зміна значень якого імітує процес зменшення кількості нектару відповідно до процедури виявлення вичерпаних джерел нектару. Його значення інкрементуємо кожного разу, якщо під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася», та обнуляємо в іншому випадку. Збільшення значення лічильника  $Limit_s$  імітує процес вичерпування джерела нектару. Водночас використаємо критерій, який дозволяє виявляти вичерпані джерела нектару. Для цього введено константу  $LIMIT$ , значення якої дослідник задає як один із параметрів методу структурної ідентифікації перед його застосуванням. Таким чином, кожне джерело нектару (структура IPO  $\lambda_s^2$ ), для якого виконується умова  $Limit_s \geq LIMIT$ , вважаємо вичерпаним. У такому випадку робоча бджола, закріплена за ним, стає бджолою-розвідником та здійснює випадковий пошук «нового» джерела нектару.

На рис. 1 оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  випадковим чином генерує «нову» структуру IPO з множини всіх структурних елементів відповідно до процедури випадкового пошуку нового джерела нектару. Оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  означає генерування випадковим чи-



ном структури  $\lambda_s^2$  із множини усіх структурних елементів  $F$ , де кількість структурних елементів  $m_s \in [I_{\min}, I_{\max}]$ . Варто зазначити, що при формуванні «нової» структури IPO оператором  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ , йому будуть доступні всі структурні елементи із множини  $F$ .

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо застосування вищеописаного методу на прикладі процесу сушіння гіпсокартону з урахуванням температурного поля у сушильній камері. Найважливішим етапом виробництва гіпсокартону є етап сушіння листа у сушильній камері. На цьому етапі формується остаточний розподіл вологості на листі, що є визначальним показником для відбракування готової продукції [11, 12]. Допустимий рівень вологості повинен бути в межах від 0,6–0,9% і бажано щоб цей розподіл був якомога рівномірнішим. Очевидно, що забезпечення рівномірного розподілу вологості можна досягнути керуючи температурним полем у сушильній камері. Експериментальне визначення оптимального розподілу температурного поля в сушильній камері для отримання кінцевої продукції високої якості на виробництві призведе до високих витрат. Тому доцільно побудувати математичну модель для дослідження впливу температурного поля у сушильній камері на кінцевий розподіл вологості на листі гіпсокартону.

Дослідження проводилось для листа гіпсокартону таких стандартних розмірів: товщина – 9,5 мм, довжина – 2500 мм, ширина – 1200 мм у точках рівномірно розподіленої вимірювальної сітки з кроком  $\Delta x=300$  мм по довжині листа та  $\Delta y=300$  мм по ширині листа. Першу точку було зафіксовано на відстані 200 мм від краю по ширині листа та 150 мм від краю по довжині листа відповідно.

Спочатку було отримано експериментальні дані для випадку, коли значення температури в кожній точці сушильної камери були близькими. Дискретні значення функції температури  $\eta_1(i, j, 1)$  в сушильній камері наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Дискретні значення функції температури  $\eta_1(i, j, 1)$ , ( $^{\circ}\text{C}$ ) у сушильній камері

$j \backslash i$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	125	125	125	125	125	125	125	125
1	125	125	125	125	125	125	125	125
2	125	125	125	125	125	125	125	125
3	125	125	125	125	125	125	125	125

Таблиця 3 – Значення виміряної відносної вологості, (%) у точках із заданими координатами  $i, j$

$j \backslash i$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,60	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	0,70	0,71	0,67	0,66	0,65

Для вимірювання вологості використано прилад GANN compact A, технічні характеристики якого наведено на сайті [13]. Відносна похибка зазначеного приладу знаходиться в межах 5%. Експериментальні дані вимірюваної вологості, без урахування похибки, представлені у табл. 3.

З урахуванням 5% похибки вимірювань їх доцільно представити в інтервальному вигляді. Наприклад, інтервальне значення вологості в точці з координатами  $i=0, j=0$  матиме такий вигляд:  $[z_{0,0}^-, z_{0,0}^+] = [0,57; 0,63]$ . Тепер задамо початкові умови для побудови IPO в межах похибок вимірювань експериментальних даних:

$$[\hat{v}_{0,0,1}^-, \hat{v}_{0,0,1}^+] = [0,594; 0,606];$$

$$[\hat{v}_{0,1,1}^-, \hat{v}_{0,1,1}^+] = [0,624; 0,636];$$

$$[\hat{v}_{0,2,1}^-, \hat{v}_{0,2,1}^+] = [0,653; 0,667];$$

$$[\hat{v}_{0,3,1}^-, \hat{v}_{0,3,1}^+] = [0,653; 0,667];$$

$$[\hat{v}_{0,4,1}^-, \hat{v}_{0,4,1}^+] = [0,673; 0,687];$$

$$[\hat{v}_{0,5,1}^-, \hat{v}_{0,5,1}^+] = [0,643; 0,657];$$

$$[\hat{v}_{0,6,1}^-, \hat{v}_{0,6,1}^+] = [0,614; 0,626];$$

$$[\hat{v}_{0,7,1}^-, \hat{v}_{0,7,1}^+] = [0,604; 0,616];$$

$$[\hat{v}_{1,0,1}^-, \hat{v}_{1,0,1}^+] = [0,673; 0,687];$$

$$[\hat{v}_{1,1,1}^-, \hat{v}_{1,1,1}^+] = [0,733; 0,747];$$

$$[\hat{v}_{2,0,1}^-, \hat{v}_{2,0,1}^+] = [0,713; 0,727];$$

$$[\hat{v}_{2,1,1}^-, \hat{v}_{2,1,1}^+] = [0,772; 0,778];$$

$$[\hat{v}_{3,0,1}^-, \hat{v}_{3,0,1}^+] = [0,614; 0,626];$$

$$[\hat{v}_{3,1,1}^-, \hat{v}_{3,1,1}^+] = [0,624; 0,636].$$

$$[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = \widehat{g}_1 + \widehat{g}_2 \cdot (\eta_p(i-1, j, k) / \eta_p(i-1, j-1, k)) [\widehat{v}_{i-1, j-1, k}^-; \widehat{v}_{i-1, j-1, k}^+] \times$$

$$\times [\widehat{v}_{i-1, j-1, k}^-; \widehat{v}_{i-1, j-1, k}^+] + \widehat{g}_3 \cdot (\eta_p(i, j, k) / \eta_p(i-1, j-2, k)) \times$$

$$\times [\widehat{v}_{i-1, j-2, k}^-; \widehat{v}_{i-1, j-2, k}^+] + \widehat{g}_4 \cdot (\eta_p(i, j, k) / \eta_p(i-1, j-1, k)) \times$$

$$\times [\widehat{v}_{i-1, j-1, k}^-; \widehat{v}_{i-1, j-1, k}^+] / [\widehat{v}_{i, j-1, k}^-; \widehat{v}_{i, j-1, k}^+] +$$

$$+ \widehat{g}_5 \cdot (\eta_p(i-1, j, k) / \eta_p(i, j, k)) \times$$

$$\times [\widehat{v}_{i-1, j, k}^-; \widehat{v}_{i-1, j, k}^+] + \widehat{g}_6 \cdot [\widehat{v}_{i, j-1, k}^-; \widehat{v}_{i, j-1, k}^+],$$

$$i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, j = 2, \dots, 7, k = 1, 2, p = 1, \quad (9)$$

де  $\widehat{g}_1 = 0,8993$ ;  $\widehat{g}_2 = 0,0365$ ;  $\widehat{g}_3 = 0,0345$ ;  $\widehat{g}_4 = -0,0307$ ;  $\widehat{g}_5 = -0,0015$ ;  $\widehat{g}_6 = -0,3074$  – оцінки параметрів IPO, отримані на основі застосування процедур випадкового пошуку.

Результати моделювання розподілу вологості для випадку температури в сушильній камері, представлений у табл. 2, наведено на рис. 2 та 3.

З рис. 2 та 3 видно, що при незмінному в координатах температурному полі в сушильній камері рівень вологості гіпсокартону вищий в центрі листа, ніж на його краях, що відповідає фізичним особливостям процесу.

Тепер, із застосуванням отриманої моделі (9) змодельовано ситуацію розподілу вологості на листі гіпсокартону для іншого температурного поля. Для цього функцію розподіленого керування, яка задає температурне поле в камері, підберемо, виходячи із фізичних міркувань, але у такий спосіб, щоб забезпечити якомога рівномірніший розподіл вологості на листі гіпсокартону.

Дискретні значення функції температури  $\eta(i, j, 2)$  в сушильній камері, наведено в табл. 4.

У табличному представленні функції  $\eta_1(i, j, 2)$  видно, що температура в сушильній камері зростає в напрямку до її центру. Початкові умови для цього випадку моделювання було задано у такий спосіб:

$$[\widehat{v}_{0,0,1}^-; \widehat{v}_{0,0,1}^+] = [0,693; 0,707];$$

$$[\widehat{v}_{0,1,1}^-; \widehat{v}_{0,1,1}^+] = [0,727; 0,7373];$$

$$[\widehat{v}_{0,2,1}^-; \widehat{v}_{0,2,1}^+] = [0,7128; 0,7272];$$

$$[\widehat{v}_{0,3,1}^-; \widehat{v}_{0,3,1}^+] = [0,7227; 0,7372];$$

$$[\widehat{v}_{0,4,1}^-; \widehat{v}_{0,4,1}^+] = [0,7127; 0,7272];$$

$$[\widehat{v}_{0,5,1}^-; \widehat{v}_{0,5,1}^+] = [0,7029; 0,7171];$$

$$[\widehat{v}_{0,6,1}^-; \widehat{v}_{0,6,1}^+] = [0,7029; 0,7171];$$

$$[\widehat{v}_{0,7,1}^-; \widehat{v}_{0,7,1}^+] = [0,7128; 0,7272];$$

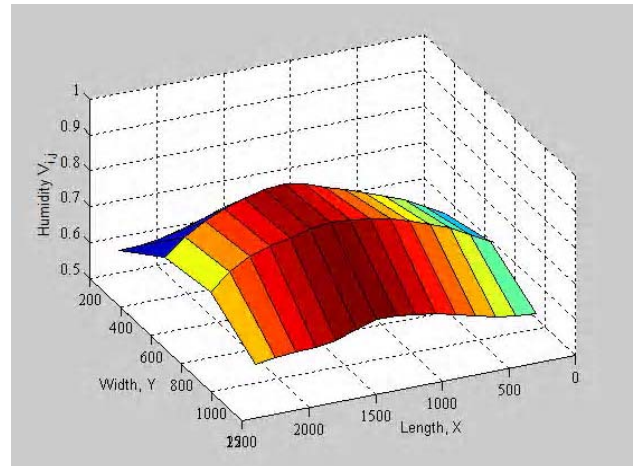


Рисунок 2 – Розподіл вологості на листі гіпсокартону при заданій температурі  $\eta_1(i, j, 1)$

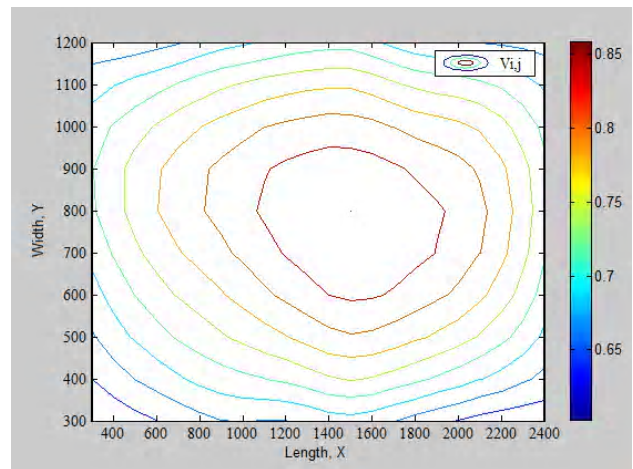


Рисунок 3 – Лінії рівня розподілу вологості на листі гіпсокартону при заданій температурі  $\eta_1(i, j, 1)$

Таблиця 4 – Дискретні значення функції температури  $\eta_1(i, j, 2)$ , (C°) у сушильній камері

$i \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	120	120	120	120	120	120	120	120
1	120	125	130	135	135	130	125	120
2	120	125	130	135	135	130	125	120
3	120	120	120	120	120	120	120	120

$$\begin{aligned} [\hat{v}_{1,0,1}^-, \hat{v}_{1,0,1}^+] &= [0, 7029; 0, 7171]; \\ [\hat{v}_{1,1,1}^-, \hat{v}_{1,1,1}^+] &= [0, 693; 0, 707]; \\ [\hat{v}_{2,0,1}^-, \hat{v}_{2,0,1}^+] &= [0, 7128; 0, 7272]; \\ [\hat{v}_{2,1,1}^-, \hat{v}_{2,1,1}^+] &= [0, 7029; 0, 7171]; \\ [\hat{v}_{3,0,1}^-, \hat{v}_{3,0,1}^+] &= [0, 7128; 0, 7272]; \\ [\hat{v}_{3,1,1}^-, \hat{v}_{3,1,1}^+] &= [0, 693; 0, 707]. \end{aligned}$$

Результати моделювання процесу сушіння гіпсокартону у випадку задання значень температури функцією  $\eta_1(i, j, 2)$  показані на рис. 4 та 5.

## 6 ОГОВОРЕННЯ

З рис. 4 та 5 видно, що математична модель (9) адекватно відображає розподіл вологості на листі гіпсокартону при реалізації процесу його сушіння. Так як підвищення температури в центрі сушильної камери призводить до зниження рівня вологості у центрі листа гіпсокартону, що повністю узгоджується з особливостями фізичного процесу.

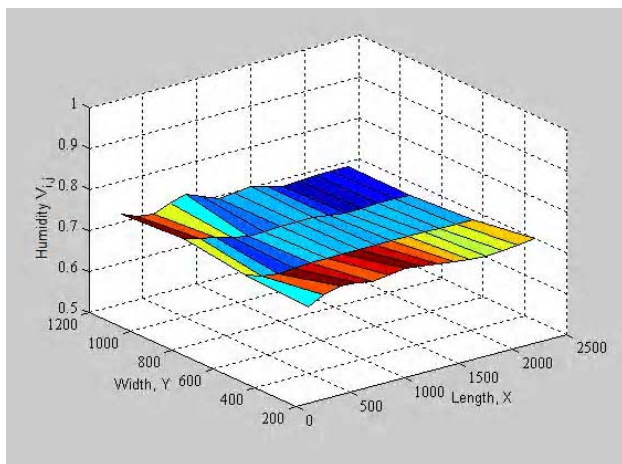


Рисунок 4 – Розподіл вологості на листі гіпсокартону при заданому температурному полі  $\eta_1(i, j, 2)$

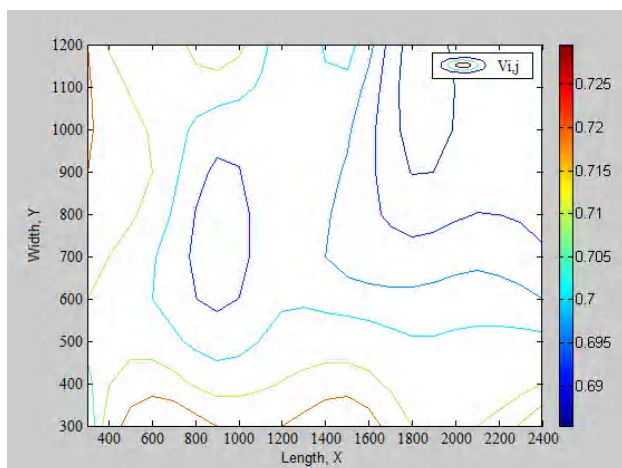


Рисунок 5 – Лінії рівня розподілу вологості на листі гіпсокартону при заданому температурному полі  $\eta_1(i, j, 2)$

Таким чином, із розглянутого прикладу бачимо, що запропонований метод ідентифікації моделей об'єктів із розподіленими параметрами дає можливість адекватно урахувати функцію керування об'єктом, яка є також просторово розподілена. Важливою особливістю запропонованого методу є його можливість достатньо ефективно обходити локальні мінімуми, тобто відкидати ті набори структурних елементів моделі, які не забезпечують її задані прогностичні властивості, чи призводять до переукладнення, про що в достатній мірі показано в праці [6].

## ВИСНОВКИ

Запропоновано метод ідентифікації інтервальних моделей об'єктів із розподіленими параметрами для випадку просторово розподіленого керування. В запропонованому методі оператори синтезу структури моделі, на відміну від існуючих методів, побудовано на застосуванні розумового інтелекту, зокрема – на основі алгоритму бджолоїної колонії.

Наведено приклад застосування методу для задачі моделювання процесу сушіння гіпсокартону на завершальній стадії його виробництва. Змодельовано два режими представлення просторово розподіленого керування у вигляді температурного поля сушильної камери. Результати моделювання підтверджують адекватність фізичним процесам.

## ПОДЯКИ

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом», що виконується за рахунок коштів загального фонду державного бюджету. Номер державної реєстрації НДР: 0116U005507.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 296 с.
2. Степашко В. С. Алгоритмы МГУА как основа автоматизации процесса моделирования сложных объектов на основе процесса моделирования по экспериментальным данным / В. С. Степашко // Автоматика. – 1988. – № 4. – С. 44–45.
3. Дивак М. П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різничевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. 2009. – Вип. 1. – С. 35–43.
4. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: technical report: TR-06 / D. Karaboga. – Kayseri : Erciyes University, 2005. – 10 p.
5. Karaboga D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm / D. Karaboga, B. Basturk // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39, Issue 3. – P. 459–471.
6. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony / [N. Porplytsya, M. Dyvak, I. Spivak et al.] // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM), 13th international conference, Polyana-Svalyava, 24–27 February 2015: proceedings. – Lviv : CAD Department of Lviv Polytechnic National University, 2015. – P. 196–199.



7. Дивак Т. М. Структурна та параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на основі алгоритму оцінювання розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь / Т. М. Дивак // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: I Всеукраїнська школа-семинар молодих вчених і студентів, Тернопіль, 20–21 травня 2011 р. : матеріали. – Тернопіль : ТНЕУ, 2011. – С. 13–14.
8. Застосування інтервального різницевого оператора для апроксимації полів концентрацій шкідливих викидів автотранспорту / І. Ф. Войтюк, Т. М. Дивак, М. П. Дивак та ін. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – Вип. 37, № 1. – С. 44–52.
9. Растрингін Л. А. Введение в идентификацию объектов управления / Л. А. Растрингін, Н. Е. Маджаров. – М. : Энергия, 1987. – 216 с.
10. Дивак Т. М. Метод параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді інтервального різницевого оператора із розділенням вибірки даних / Т. М. Дивак // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: II Всеукраїнська школа-семинар молодих вчених і студентів, Тернопіль, 4–5 травня 2012 р. : матеріали. – Тернопіль : ТНЕУ, 2012. – С. 22–23.
11. Лінія виробництва гіпсокартонних листів [Електронний ресурс] / Майстерня своєї справи. – Режим доступу: <http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/>.
12. Макромодель распределения влажности в листе гипсокартона в процессе его сушения на основе интервального разностного оператора / Н. П. Дывак, А. В. Пукас, Т. Н. Дывак и др. // Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2. – С. 72–78.
13. Влагомер бесконтактный GANN compact A [Электронный ресурс] / Интервесп Группа компаний. – Режим доступа: [http://www.intervesp-stanki.ru/item/gann\\_compact\\_a.htm/](http://www.intervesp-stanki.ru/item/gann_compact_a.htm/)

Стаття надійшла до редакції 10.01.2017.

Після доробки 12.02.2017.

Дывак Н. П.<sup>1</sup>, Порплица Н. П.<sup>2</sup>, Масляк Ю. Б.<sup>3</sup>, Пукас А. В.<sup>4</sup>, Мельник А. Н.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных информационных технологий Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

<sup>3</sup>Аспирант кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

<sup>5</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

#### МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**Актуальность.** В теории идентификации систем разработано ряд методов для построения моделей объектов с распределенными параметрами. Основой математических моделей таких объектов являются системы дифференциальных уравнений в частных производных или их разностные аналоги. Вместе с тем, для синтеза разностного аналога необходимо использовать методы структурно-параметрической идентификации. Преимущественно такие методы основываются на случайных данных эксперимента и погрешности измерений не учитываются. В случае учета погрешностей измерений получаем данные в интервальном виде. В последнее время для решения задач структурной идентификации математических моделей используют поведенческие модели медоносных пчел, которые в литературе называют алгоритмами пчелиной колонии (АБК). Вместе с тем, случаи структурной идентификации математических моделей на основе анализа интервальных данных, когда объект с распределенными параметрами содержит пространственно распределенные управляющие факторы, в литературе не рассмотрены, однако являются актуальными для задач моделирования пространственного распределения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, задач температурно-управляемой сушки и тому подобное.

**Цель работы** – адаптация известных методов АБК для решения задачи структурно-параметрической идентификации моделей объектов с распределенными параметрами с дополнительным учетом пространственно распределенного управления.

**Метод.** Структурную и параметрическую идентификацию осуществлено на основе метода анализа интервальных данных. В предложенном методе операторы синтеза структуры модели, в отличие от существующих методов, построено на применении роевого интеллекта, в частности, на основе алгоритма пчелиной колонии.

**Результаты.** Приведен пример применения метода для задачи моделирования процесса сушки гипсокартона на завершающей стадии его производства. Смоделировано два режима представления пространственно распределенного управления в виде температурного поля сушильной камеры. Построенная математическая модель адекватно отражает распределение влажности на листе гипсокартона при реализации процесса его сушки.

**Выводы.** Предложено метод идентификации интервальных моделей объектов с распределенными параметрами для случая пространственно распределенного управления, в котором операторы синтеза структуры модели, в отличие от существующих методов, построено на применении роевого интеллекта. Важной особенностью предложенного метода является его возможность достаточно эффективно «обходить» локальные минимумы, то есть отвергать те наборы структурных элементов модели, которые не обеспечивают ее заданные прогностические свойства, или приводят к переусложнению.

**Ключевые слова:** интервальный анализ данных, структурно-параметрическая идентификация, алгоритм пчелиной колонии.

Dyvak M. P.<sup>1</sup>, Porplytsya N. P.<sup>2</sup>, Maslyak Y. B.<sup>3</sup>, Pukas A. V.<sup>4</sup>, Melnyk A. M.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>D.Sc., Professor, Dean of the Faculty of Computer Information Technology, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Senior Lecturer at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

<sup>3</sup>Post-graduate student at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

<sup>4</sup>Ph.D., Associate Professor, Head of the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

<sup>5</sup>Ph.D., Associate Professor at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

#### METHOD OF IDENTIFICATION OF MODELS OF OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS WITH A SPATIALLY DISTRIBUTED CONTROL BASED ON INTERVAL DATA ANALYSIS

**Context.** There are developed a number of methods to build models of objects with distributed parameters in the system identification theory. The basis of mathematical models of such objects are the systems of partial differential equations or their difference analogs. Therewith, for the synthesis of difference analog the methods of structural and parametric identification must be used. Mainly, such methods

are based on random experimental data and measurement errors are not taken into account. When the measurement errors are taken into account we obtain data in interval form. Recently, for solving the tasks of structure identification of mathematical models the honey bee behavioral models are used, which are called the artificial bee colony algorithms (ABCA) in the literature. At the same time, the cases of structure identification of mathematical models based on interval data analysis when the object with distributed parameters includes spatially distributed control factors are not considered in the literature, but are relevant for the tasks of modeling of spatially distribution of pollutant concentrations in the atmosphere and temperature-controlled drying tasks etc.

**Objective** is adaptation of known ABCA methods for solving task of structure and parametric identification of models of objects with distributed parameters with spatially distributed control taken into account in addition.

**Method.** Structure and parametric identification has been implemented based on interval data analysis. In proposed method the operators of model structure synthesis, in contrast to existing methods, are built using the swarm intelligence, particularly based on artificial bee colony algorithm.

**Results.** An example of applying the method for task of modeling of drywall drying process in the final stage of its production is shown. Two modes of representation of spatially distributed control in kind of temperature field in drying oven were modeled. A mathematical model adequately reflects the humidity distribution in the drywall sheets when implementing its drying process.

**Conclusions.** The method for identification of interval models of objects with distributed parameters for the case of spatially distributed control was proposed. The operators of model structure synthesis, in contrast to existing methods, are built using the swarm intelligence. An important feature of the proposed method is its ability to efficiently “bypass” local minima, scilicet reject those sets of structural elements of the model that do not provide its prognostic properties, or lead to very high complexity.

**Keywords:** interval data analysis, structure-parametric identification, artificial bee colony algorithm.

## REFERENCES

1. Ivaxnenko A. G. Induktivnyj metod samoorganizacii modelej slozhnyx sistem. Kiev, Naukova dumka, 1981, 296 p.
2. Stepashko V. S. Algoritmy MGUA kak osnova avtomatizacii procesa modelirovaniya slozhnyx ob'ektov na osnove procesa modelirovaniya po e'ksperimental'nym dannym, *Avtomatika*, 1988, No. 4, pp. 44–45.
3. Dyvak M. P., Dyvak T. M. Osoblyvosti pobudovy intervalnoi systemy alhebrychnykh rivnian ta metodu ii rozv'jazku v zadachakh identyfikacii liniinoho intervalnogo riznytsevoho operatora, *Induktyvne modeliuвання складних систем*, 2009, Vyp. 1, pp. 35–43.
4. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: technical report: TR-06. Kayseri, Erciyes University, 2005, 10 p.
5. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 2007, Vol. 39, Issue 3, pp. 459–471.
6. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I. et al. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony, *The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM), 13th international conference, Polyana-Svalyava, 24–27 February 2015: proceedings*. Lviv, CAD Department of Lviv Polytechnic National University, 2015, pp. 196–199.
7. Dyvak T. M. Strukturna ta parametrychna identyfikatsiia intervalnogo riznytsevoho operatora na osnovi alhorytmu otsiniuvannya rozv'iazku intervalnoi systemy neliniinykh alhebrychnykh rivnian, *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnologii: I Vseukrainska shkola-seminar molodykh vchenykh i studentiv, Ternopil, 20–21 travnia 2011 r. : materialy*. Ternopil, TNEU, 2011, pp. 13–14.
8. Voitiuk I. F., Dyvak T. M., Dyvak M. P. ta in. Zastosuvannya intervalnogo riznytsevoho operatora dlia aproksymatsii poliv konsentratsii shkidlyvykh vykydiv avtotransportu, *Vymiriuvalna ta obchysluvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, 2011, Vyp. 37, No.1, pp. 44–52.
9. Rastrigin L. A., Madzharov N. E. Vvedenie v identyfikaciyu ob'ektov upravleniya. Moscow, E'nergiya, 1987, 216 p.
10. Dyvak T. M. Metod parametrychnoi identyfikatsii makromodeli u vyhliadi intervalnogo riznytsevoho operatora iz rozdilenniam vybirky danykh, *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnologii: II Vseukrainska shkola-seminar molodykh vchenykh i studentiv, Ternopil, 4–5 travnia 2012 r. : materialy*. Ternopil: TNEU, 2012, pp. 22–23.
11. Liniia vyrobnytstva hipsokartonnykh lystiv Maisternia svoiei spravy. Access mode: <http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/>.
12. Dyvak N. P., Pukas A. V., Dyvak T. N. i dr. Makromodel' raspredeleniya vlazhnosti v liste gipsokartona v processe ego susheniya na osnove interval'nogo raznostnogo operatora, *Upravlyayushhie sistemy i mashiny*, 2013, No. 2, pp. 72–78.
13. Vlagomer beskontaktnyj GANN compact A. Intervesp Gruppa kompanij. Access mode: [http://www.intervesp-stanki.ru/item/gann\\_compact\\_a.htm/](http://www.intervesp-stanki.ru/item/gann_compact_a.htm/)

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри інформатики, автоматики і систем управління ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

<sup>2</sup>Студентка ДВНЗ «Криворізький національний університет» Кривий Ріг, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ВІЗКІВ КОНВЕЄРНИХ МАШИН

**Актуальність.** Вирішено актуальну задачу розробки сучасних математичних моделей для дослідження регулювання швидкістю випалювальних візків конвеєрної машини, що дозволяє підтримувати заданий рівень висоти шару котунів та забезпечує оптимальний технологічний процес по випалу котунів і максимальну продуктивність.

**Мета роботи** – представлення результатів розробки математичної моделі для регулювання швидкості випалювальних візків конвеєрної машини із реалізацією сучасної SCADA-системи для управління продуктивністю конвеєрної машини шляхом регулювання швидкості переміщення її випалювальних візків, що приводить до зміни висоти шару котунів на цих візках.

**Метод.** Для оцінювання динамічних характеристик системи електроприводу і моделювання регулювання швидкості переміщення випалювальних візків конвеєрної машини використувано потужний і універсальний метод дослідження - графічне середовище імітаційного моделювання Simulink, що є додатком до пакету для числового аналізу MATLAB. При моделюванні з використанням Simulink використовується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки.

**Результати.** У запропонованій математичній моделі використовуються вихідні дані конвеєрних машин ОК-306 та LURGI-278. Для побудови математичної моделі автоматизованої системи регулювання швидкості переміщення випалювальних візків конвеєрної машини виконані розрахунки передавальних функцій елементів, що входять у цю систему. У математичній моделі асинхронний двигун представлений спрощеною механічною та електромагнітною ланками зі зворотнім зв'язком по швидкості, які визначені передавальними функціями. У результаті моделювання отримані перехідні процеси при регулюванні висоти шару котунів на випалювальних візках та визначено їх вплив на продуктивність конвеєрної машини.

Для доцільності удосконалення АСУТП фабрики огрудкування за рахунок використання математичної моделі для регулювання швидкості руху випалювальних візків розроблена сучасна модель інтерфейсу SCADA-системи, що працює в реальному часі, та дає можливість оперативного диспетчерського управління. Оскільки у системах автоматизованого управління провідні фабрики огрудкування використовують інструментальну систему SCADA TRACE MODE 6, то систему регулювання висоти шару котунів доцільно розробляти з використанням SCADA TRACE MODE 6.

**Висновки.** На основі використання вихідних даних технологічного процесу випалу котунів на конвеєрній випалювальній машині та виконаних розрахунків у графічному середовищі Simulink MATLAB побудовано математичну модель системи для регулювання швидкості випалювальних візків конвеєрної машини, що відповідно до технологічного процесу дозволяє досліджувати вплив на процес випалу котунів за рахунок керування висотою шару котунів і продуктивність конвеєрної машини.

Запропоновану сучасну модель інтерфейсу SCADA-системи, що працює в реальному часі та дає можливість оперативного диспетчерського управління, може бути використано в реальних промислових умовах.

**Ключові слова:** фабрика огрудкування, конвеєрна машина, випалювальні візки, котуни, швидкість, математична модель, SCADA-система, моделювання, результати моделювання.

### НОМЕКЛАТУРА

КМ – конвеєрна машина;  
АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом;  
SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition System;  
АД – асинхронний двигун;  
 $W_{em}(p)$  – передавальна функція електромагнітної ланки;  
 $\beta$  – електромагнітна жорсткість;  
 $M_{кр}$  – критичний момент асинхронного двигуна;  
 $s_{кр}$  – критичне ковзання;  
 $f$  – частота струму в мережі живлення;  
 $p_n$  – кількість пар обмоток двигуна;  
 $T_{em}$  – електромагнітна стала;  
 $W_{mx}(p)$  – передавальна функція механічної ланки;  
 $W_{пч}(p)$  – передавальна функція перетворювача частоти;  
 $K_{пч}$  – коефіцієнт перетворювача;  
 $U_{пчм}$  – максимальна напруга на виході ланки перетворювача частоти;

$T_{пч}$  – постійна часу перетворювача частоти;  
 $W_{орс}(p)$  – передавальна функція об'єкта регулювання;  
 $W_{рс}(p)$  – передавальна функція регулятора струму;  
 $W_{ос}(p)$  – бажана передавальна функція розімкнутого контуру регулювання струму;  
 $T_{\mu}$  – некомпенсована постійна часу;  
 $K_{зс}$  – коефіцієнт датчика струму;  
 $U_{рсм}$  – максимальна напруга на вході регулятора;  
 $I_{\phi}$  – базисне значення струму, при використанні перетворювача частоти;  
 $W_{рш}(p)$  – передавальна функція регулятора швидкості;  
 $K_{зш}$  – коефіцієнт датчика швидкості;  
 $U_{ршм}$  – максимальна напруга на вході регулятора швидкості;  
 $W_p(p)$  – передавальна функція редуктора;  
 $W_{рм}(p)$  – передавальна функція робочого механізму – привідної зірки конвеєра;  
 $h_3$  – загальна максимальна висота шару котунів;  
 $U_{звм}$  – максимальна напруга на виході передавальної функції зворотного зв'язку по висоті;  
 $U_{квм}$  – максимальна напруга на виході вагів;  
 $q_{квм}$  – максимальна продуктивність конвеєрних вагів.