

УДК 519.854.4

## РОЗРОБКА АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ РОЄВОГО ІНТЕЛЕКТУ У ПРОЕКТУВАННІ ТА УПРАВЛІННІ ІНЖЕНЕРНИМИ СИСТЕМАМИ

Кирилов С. О.<sup>1</sup>, Сікора Я. Б.<sup>2</sup>, Рябчун Ю. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Одеський національний економічний університет

<sup>2</sup>Житомирський державний університет імені Івана Франка

<sup>3</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури

**Анотація:** У статті розглядаються питання проектування та управління інженерними системами в умовах зростання обсягів даних у локальних обчислювальних мережах. З розвитком роєвого інтелекту ймовірність існування необхідної інформації для управління інженерними системами збільшується, але можливість її знаходження зменшується. Це створює необхідність у розробці нових методів та інструментальних засобів для використання адаптивних алгоритмів роєвого інтелекту. Метою таких алгоритмів є забезпечення можливості обробки інформації та пошуку запитів з максимальною релевантністю, генеруючи якнайбільшу кількість результатів пошуку (SERP), що містять технічну інформацію. Розвиток алгоритмів роєвого інтелекту неможливий без їхньої інтелектуалізації, яка включає семантико-синтаксичний аналіз текстів, природно-мовні засоби та інтелектуальні алгоритми визначення значущості інформаційних ресурсів. У системах цифрового пошуку інформації (DIRS) запит формується у вигляді ключових слів або їх комбінацій, пов'язаних логічними операціями. Для пошуку однієї і тієї ж інформації використовуються різні ключові слова, вибір яких є суб'єктивним. Перший етап алгоритму полягає у визначенні множини змістовних відповідностей і формуванні вихідної множини запитів в межах інженерної системи. Для забезпечення повноти вибору розглядається сумарна релевантність SERP по відношенню до групи критеріїв значущості. Виникає необхідність у розробці ефективного нейромережевого алгоритму для розв'язання задачі призначення кожній групі критеріїв запиту однієї SERP. Це дозволить розподілити SERP за групами критеріїв так, щоб кожна сторінка оцінювалася переважно однією групою критеріїв, і сумарна релевантність за всіма групами була максимальною. Таким чином, стаття підкреслює важливість розробки нових методів та інструментальних засобів для впровадження адаптивних алгоритмів роєвого інтелекту в інженерних системах. Особливу увагу приділено розробці ефективних нейромережевих алгоритмів, які забезпечать оптимальний розподіл релевантності пошукових сторінок, що підвищить точність та ефективність пошуку інформації в складних інженерних системах.

**Ключові слова:** роєвий інтелект, інженерна система, обчислювальна мережа, адаптивні алгоритми, матриця продуктивностей, нейроподібні моделі.

## DEVELOPMENT OF ADAPTIVE ALGORITHMS OF SWARM INTELLIGENCE IN DESIGN AND MANAGEMENT OF ENGINEERING SYSTEMS

S. Kyrylov<sup>1</sup>, Ya. Sikora<sup>2</sup>, Yu. Riabchun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Odesa National Economic University*

<sup>2</sup>*Zhytomyr State Ivan Franko University*

<sup>3</sup>*Kyiv National University of Construction and Architecture*

**Abstract:** The article examines the design and management of engineering systems in the context of growing data volumes in local computer networks. With the development of swarm intelligence, the probability of the existence of the necessary information for managing engineering systems increases, but the possibility of finding it decreases. This creates the need to develop new methods and tools for using adaptive algorithms of swarm intelligence. The purpose of such algorithms is to ensure the ability to process information and find queries with maximum relevance, generating the largest number of search results (SERPs) containing technical information. The development of swarm intelligence algorithms is impossible without their intellectualization, which includes semantic and syntactic analysis of texts, natural language tools, and intelligent algorithms for determining the significance of information resources. In digital information retrieval systems (DIRS), a query is formed in the form of keywords or their combinations, connected by logical operations. To search for the same information, different keywords are used, the choice of which is subjective. The first stage of the algorithm consists in determining the set of meaningful correspondences and forming the initial set of requests within the engineering system. To ensure the completeness of the selection, the total relevance of the SERP in relation to the group of significance criteria is considered. There is a need to develop an efficient neural network algorithm to solve the problem of assigning one SERP to each group of query criteria. This will make it possible to distribute SERPs by criteria groups so that each page is evaluated mainly by one criteria group, and the total relevance of all groups is maximized. Thus, the article emphasizes the importance of developing new methods and tools for implementing adaptive swarm intelligence algorithms in engineering systems. Special attention is paid to the development of effective neural network algorithms that will ensure optimal distribution of the relevance of search pages, which will increase the accuracy and efficiency of information search in complex engineering systems.

**Keywords:** swarm intelligence, engineering system, computing network, adaptive algorithms, performance matrix, neuro-like models.

## 1 ВСТУП

Сучасні інженерні системи стають все більш складними та динамічними. Вимоги до їх продуктивності, надійності та ефективності зростають, що формує потребу у нових підходах до проектування та управління цими системами. Традиційні алгоритми не завжди можуть ефективно справлятися зі змінами в середовищі або вимогами до систем і саме тому адаптивні алгоритми, які можуть змінювати свою поведінку в залежності від умов, дозволяють більш ефективно вирішувати завдання в динамічних середовищах.

Концепція роевого інтелекту, яка базується на поведінці колективів біологічних організмів (наприклад, мурах або птахів), є перспективним підходом для розробки адаптивних алгоритмів. Використання роевого інтелекту дозволяє створювати розподілені, гнучкі та стійкі системи управління. У багатьох сферах, таких як робототехніка, енергетика, транспорт та інші, інженерні системи потребують ефективних методів управління для підвищення продуктивності та зниження витрат і розробка нових алгоритмів на основі роевого інтелекту може значно покращити ці процеси. Впровадження адаптивних алгоритмів роевого інтелекту у проектування та управління інженерними системами має великий потенціал для підвищення їх ефективності, надійності та стійкості, що призводить до покращення роботи існуючих систем та створення нових, більш досконалих рішень. Таким чином, дослідження з розробки адаптивних алгоритмів роевого інтелекту є надзвичайно актуальним та важливим для розвитку сучасних інженерних систем і має значний потенціал для практичного застосування у різних галузях.

## 2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасних наукових дослідженнях роевий інтелект займає важливе місце як перспективний підхід для розв'язання складних задач у різних галузях. Адаптивні алгоритми мають здатність змінювати свою поведінку відповідно до змін у навколишньому середовищі. У контексті роевого інтелекту, адаптивні алгоритми дозволяють системам ефективніше реагувати на динамічні зміни [1, 5]. Наприклад, у дослідженні [15] було показано, що адаптивні варіанти АСО можуть значно підвищити продуктивність у задачах з динамічними обмеженнями.

Роевий інтелект знаходить широке застосування в різних інженерних системах. У робототехніці, алгоритми роевого інтелекту використовуються для координації руху автономних роботів. У дослідженні [12] було показано, що використання PSO дозволяє ефективно планувати маршрути для групи роботів у складних середовищах. В енергетичній галузі, зокрема в управлінні розподіленими енергетичними ресурсами, алгоритми роевого інтелекту застосовуються для оптимізації розподілу навантажень та мінімізації втрат енергії [10]. Незважаючи на значні досягнення, застосування роевого інтелекту в інженерних системах стикається з низкою викликів. Одним з головних є питання масштабованості, оскільки збільшення кількості агентів може призвести до зростання обчислювальної складності. Також важливою проблемою є забезпечення стійкості системи до збоїв окремих агентів. У дослідженні [2] було запропоновано декілька підходів для підвищення стійкості роевих систем, включаючи використання резервних агентів та адаптивних стратегій відновлення.

Таким чином, літературний огляд показує, що розробка адаптивних алгоритмів роевого інтелекту є актуальним та перспективним напрямком досліджень, який має великий потенціал для покращення ефективності та надійності інженерних систем. Подальші дослідження в цій галузі можуть привести до створення нових, більш досконалих алгоритмів та їх успішного застосування у різних галузях техніки та промисловості.

### 3 ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є розробка адаптивних алгоритмів розумного інтелекту, які можуть бути ефективно застосовані у проектуванні та управлінні інженерними системами.

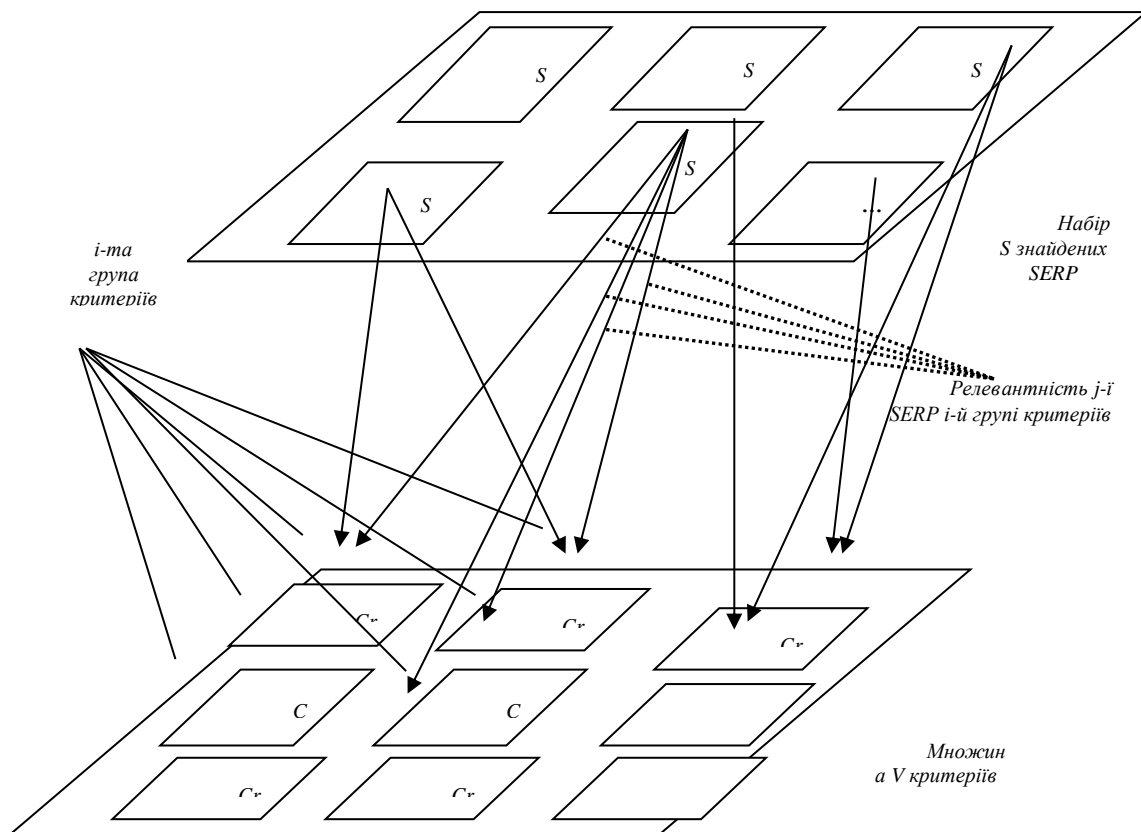
Завдання дослідження: доповнити алгоритми елементи семантико-синтаксичного аналізу текстів та природно-мовні засоби для покращення обробки інформації; розробити моделі інженерних систем, які будуть використовувати адаптивні алгоритми розумного інтелекту для оптимізації роботи систем; визначити критерії значущості та релевантності для оцінки ефективності алгоритмів.

### 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В процесі розвитку розумного інтелекту і зростання обсягів даних локальних обчислювальних мереж ймовірність існування потрібної інформації для управління інженерними системами зростає, а можливість її знаходження зменшується. Належний алгоритм проектування та управлінні інженерними системами стає спільною проблемою. Потрібні нові методи та інструментальні засоби, які вирішують проблеми розробки і використання адаптивних алгоритмів розумного інтелекту. Метою розумного інтелекту є розгортання алгоритму розумного інтелекту (digital information retrieval systems (DIRS) і надання проектувальнику інженерних систем можливості обробки інформації та пошуку запитів (search engine results page (SERP), в максимальному ступені відповідні змісту особистого запиту (забезпечити релевантність – точність проектування), при цьому, генерувати якомога більшу кількість SERP, що містять технічну інформацію.

Розвиток алгоритму розумного інтелекту неможливий без їхньої інтелектуалізації, що включає застосування семантико-синтаксичного аналізу текстів, природно-мовних засобів, інтелектуальних алгоритмів визначення значущості та інформаційних ресурсів для проектувальника, отримання додаткової інформації про документи шляхом аналізу структури адаптивного алгоритму розумного інтелекту у проектуванні та управлінні інженерними системами. У DIRS запит формується у вигляді ключового слова або комбінації ключових слів, пов'язаних логічними операціями. Для пошуку однієї і тієї ж текстової інформації використовуються різні ключові слова, вибір яких суб'єктивний [3].

Перший етап полягає у визначенні множини 'AI' змістовних відповідностей і формування вихідної множини запитів в межах інженерної системи – тривіальний і в основному, залежить від особливостей тих або інших DIRS. Сформовану множину змістовних відповідностей позначимо як множина 'V' критеріїв значущості (важливості пошукових запитів) DIRS при генерації SERP,  $V = \{v_u\}$ ,  $u = 1, \dots, U$ ;  $U$  – загальна кількість критеріїв значущості запиту в DIRS. Нехай в результаті запиту знайдено множину  $D$  розумних елементів пошуку  $\{d_j\}$ ,  $j = 1, \dots, M$ , де  $M$  – загальна кількість станиць знайдених DIRS на один пошуковий запит. Кожен документ  $d_j$ ,  $j = 1, \dots, M$  відповідно до кожного критерію  $v_u$ ,  $u = 1, \dots, U$ , володіє певною релевантністю  $r_{uj}$ ,  $u = 1, \dots, U$ ,  $j = 1, \dots, M$ . Із заданої множини  $M$  розумних елементів пошуку необхідно сформуувати набір з  $S$  розумних елементів, при якому сумарна  $S$  є 
$$\sum_{u=1}^U \sum_{j=1}^S r_{uj}$$
 релевантною: за всіма критеріями значущості буде максимальною [7]. Для забезпечення повноти вибору з множини альтернатив будемо розглядати сумарну релевантність  $r_{ij}$  у будь-якій SERP  $d_j$  по відношенню до групи всіляких поєднань критеріїв  $v_u$  (рисунок 1).



**Рис. 1.** Група критеріїв роєвого алгоритму в DIRS

Нехай  $i$ -у групу критеріїв запиту DIRS складають  $k$  критеріїв з  $U$ , де  $U$  – загальна кількість критеріїв значущості запиту в DIRS. Кількість варіантів почергового вибору  $k$  критеріїв з  $U$  становить  $\frac{U!}{(U-k)!}$ . У сформованих підмножинах з  $k$  критеріїв, кожна

група має свою певну позицію. Однак, від перестановок критеріїв в просторі, що покривається підмножині, номер відповідного документа не змінюється.

Кількість підмножин з різними потужностями становить  $U$ . Тому максимальна кількість груп критеріїв значущості запиту (або робіт в термінах задачі про призначення) буде становити [4]

$$N = \frac{\sum_{k=1}^U U!}{k!(U-k)!}, \quad (1)$$

де  $U$  – загальна кількість критеріїв значущості запиту в DIRS.

У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці ефективного і швидкого нейромережевого алгоритму розв'язання задачі про призначення кожній групі критеріїв запиту однієї SERP з набору  $S$ , до якої зводиться задача ранжованого представлення знайдених DIRS елементів. На другому етапі реалізації методу ранжування необхідно так розподілити SERP за групами критеріїв, щоб кожна сторінка оцінювалася, переважно, однією групою критеріїв, кожна група критеріїв оцінювала, переважно, одну сторінку, і сумарна релевантність SERP за всіма комбінаторними групами критеріїв значущості DIRS була максимальною [14].

Позначимо через  $R = \|r_{ji}\| - N \times M$  матрицю продуктивностей (табл. 1), елементи якої  $r_{ji}$  формують релевантність документа з номером  $j$  відносно групи критеріїв з номером  $i$ , причому,  $M$  – загальна кількість SERP знайдених DIRS,  $N$  – загальна кількість комбінаторних груп критеріїв значущості запиту.

**Таблиця 1**

Вихідні параметри задачі про призначення в DIRS

	Група критеріїв 1	...	Група критеріїв $i$	...	Група критеріїв $N$
SERP 1	$r_{11}$	...	$r_{1i}$	...	$r_{1N}$
SERP ...	...	...	...	...	...
SERP $j$	$r_{j1}$	...	$r_{ji}$	...	...
SERP ...	...	...	...	...	...
SERP $M$	$r_{M1}$	...	$r_{Mj}$	...	$r_{MN}$

Позначимо через  $X = \|x_{ji}\| - N \times M$  матрицю невідомих, елемент якої  $x_{ji}$  приймає значення 1, якщо SERP з номером  $j$  буде оцінюватися з максимальною релевантністю за групою критеріїв з номером  $i$ , і значення 0, в іншому випадку. Обмеження математичної моделі представимо системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^M x_{ji} \leq 1, i = \overline{1, N} \\ \sum_{i=1}^N x_{ji} \leq 1, j = \overline{1, M} \\ x_{ji} \in \{0, 1\}, j = \overline{1, M}, i = \overline{1, N} \end{array} \right. \quad (2)$$

В наведеній системі перше рівняння означає, що кожна SERP оцінюється однією групою критеріїв. Відповідно до другого рівняння кожна група критеріїв оцінює одну сторінку пошуку. Умови третього рівняння є природними обмеженнями на введені змінні. Враховуючі це, визначаємо матрицю призначень  $X$ , при якій формується критерій оптимальності

$$F(X) = \sum_{i=1}^M \sum_{i=1}^N r_{ji} x_{ji} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Задача (2)-(3) називається задачею про призначення з адитивним критерієм оптимальності. При розгляді задачі про призначення в стандартній формі передбачається, що кількість різних комбінаторних груп критеріїв дорівнює кількості SERP:  $M=N$ . Неважко показати, що введенням фіктивних груп критеріїв або фіктивних знайдених SERP, математична модель у відкритій формі (2) еквівалентна моделі (4) [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^M x_{ji} \leq 1, i = \overline{1, N}, \\ \sum_{i=1}^N x_{ji} \leq 1, j = \overline{1, M}, \\ 0 \leq x_{ji} \leq 1, j = \overline{1, M}, i = \overline{1, N}, \\ N = M. \end{array} \right. \quad (4)$$

Виходячи з того, що матриця обмежень умов (4) є абсолютно унімодулярною (цілочисельна матриця називається абсолютною або цілком унімодулярною, якщо будь-який її мінор дорівнює ("1", "-1" або "0"), то будь-який опорний план математичної моделі (4) є цілочисельним, звідси випливає еквівалентність математичних моделей (2) і (4) [6]. Крім того, так як з умов (4) і умов невід'ємності змінних автоматично випливає, що змінні не можуть бути більше "0", вихідна математична модель (2) еквівалентна (з точки зору пошуку оптимального рішення задачі про призначення) математичній моделі з обмеженнями (4), умовами  $M=N$  і обмеженнями  $x \geq 0, j=1,2,\dots,M$ . Нехай, наприклад, кількість знайдених елементів SERP перевищує кількість критеріїв (груп критеріїв)  $N$ . Введемо додаткові фіктивні критерії (групи критеріїв) з індексами:  $j=N+1, \dots, M$ . Коефіцієнти таблиці призначень, покладемо рівними нулю. В цьому випадку отримуємо задачу, сформульовану в стандартній формі. Якщо в оптимальному плані цієї задачі  $x_{ji}=1$ , тоді сторінка пошуку  $j$  оцінюється за фіктивним критерієм (групою критеріїв), тобто, залишається без роботи [9]. Метод з використанням нейромережевої моделі дозволяє ранжувати SERP як в разі множини  $V$  – критеріїв значимості, так і в граничному випадку  $V=1$ .

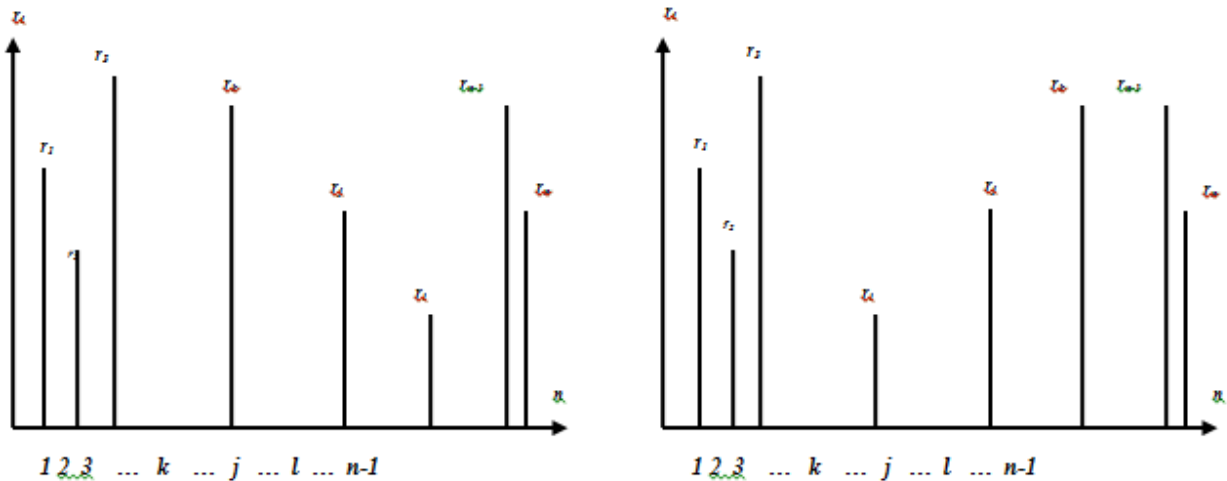
Переформулюємо завдання ранжирування наступним чином. Нехай є множина чисел – значень релевантності SERP, знайдених в результаті запиту в DIRS:  $\{r_i\}, i \in N=1\dots,n$ . Необхідно розставити числа в порядку зростання, тобто знайти таку перестановку індексів  $j = \pi(i)$ , тоді  $\forall j=1\dots(n-1) r_j \leq r_{j+1}$ . Побудуємо розв'язання цієї задачі на основі використання синтезованої вище нейроподібної моделі для вирішення задач комбінаторної оптимізації адаптивного алгоритму роєвого інтелекту у проектуванні та управлінні інженерними системами [11]. З цією метою зведемо сформульовану задачу сортування чисел до задачі роєвого інтелекту. Для цього доведемо таке твердження. Нехай існує довільна множина чисел  $\{r_i\}, i \in N=1\dots,n$  і монотонно зростаючий ряд додатних чисел  $\{a_j\}, j \in N=1\dots,n$ , таких, що  $\forall j \in 1\dots(n-1) a_j \leq a_{j+1}$ . На множині всіляких підстановок  $\{\pi(i)\} = \Pi, j = \pi(i)$  і задаємо лінійний функціонал виду

$$J[\pi(i)] = \sum_{j=1}^n a_j r_j. \quad (5)$$

Позначимо  $j^* = \pi^*(i)$  перестановку, яка сортує в порядку зростання задану довільну множину чисел  $\{r_i\}$ , тобто задовольняє умові

$$\pi^*(i) = \arg \max_{\pi(i) \in \Pi} \{J[\pi(i)]\} = \arg \max_{\pi(i) \in \Pi} \left\{ \sum_{j=1}^n a_j r_j \right\}. \quad (6)$$

Для доказу цього твердження візьмемо довільну підстановку  $\pi(i)$ , яка породжує наступну перестановку вихідної множини чисел  $(r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_j, \dots, r_i, \dots, r_n)$  (рис. 2а). Для визначеності вважатимемо, що  $k < l$  і  $r_k \geq r_i$ , тобто ця пара чисел  $(r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_j, \dots, r_i, \dots, r_n)$  в цій перестановці є не відсортованою у роцтмінні сформульованої вище задачі. Візьмемо другу підстановку  $\pi^*(i)$ , отриману з першої транспозиції  $k$ -го і  $i$ -го елементів. Цій підстановці буде відповідати перестановка вихідної множини чисел: , яка відрізняється від першої тим, що на  $k$ -му місці знаходиться число  $r_i$ , а на  $l$ -му – відповідно  $r_k$ . (рис. 2b) [13]. У такій перестановці ця пара чисел буде відсортована у форматі поставленої задачі.



**Рис. 2** (a,b) Перестановки вихідної множини чисел адаптивного алгоритму роевого інтелекту у проектуванні та управлінні інженерними системами

Визначимо значення функціоналу (5) на підстановках  $\pi(i)$ , і  $\pi^*(i)$ :

$$J[\pi(i)] = \sum_{j \in N} a_j r_j + a_k r_k + a_l r_l, \quad (7)$$

$$J[\pi^*(i)] = \sum_{\substack{j \in N \\ \{k,l\}}} a_j r_j + a_k r_l + a_l r_k. \quad (8)$$

і знайдемо їхню різницю

$$\Delta_{kl} = J[\pi^*(i)] - J[\pi(i)] = a_k r_l - a_l r_k - (a_k r_k + a_l r_l) = (a_k - a_l) \times (r_l + r_k).$$

В силу прийнятого припущення  $k < l$  і  $r_k \geq r_l$ , отже, по-перше:  $r_l - r_k \leq 0$ , по-друге:  $a_k - a_l < 0$ , так як ряд чисел  $\{a_j\}$  є монотонно зростаючим за визначенням. Звідки випливає

$$\Delta_{kl} = J[\pi^*(i)] - J[\pi(i)] \geq 0, \quad (9)$$

тобто значення введеного лінійного функціоналу (5) на перестановці, в якій деяка парачисел відсортована, більше або дорівнює значенню даного функціоналу на перестановці, що відрізняється тільки тим, що обрана пара чисел не відсортована. На третьому і четвертому етапах реалізації методу формується і використовується нейромережева модель розв'язання задачі формування адаптивного алгоритму роевого інтелекту у проектуванні та управлінні інженерними системами.

## 5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Було досліджено проблеми управління інженерними системами в умовах зростання обсягів даних та складності мереж. Було сформовано нові методи та інструментальні засоби для розробки й використання адаптивних алгоритмів роевого інтелекту. Було розроблено алгоритми для забезпечення релевантності пошукових запитів у системах цифрового пошуку інформації (DIRS) з урахуванням семантико-синтаксичного аналізу текстів та інтелектуальних алгоритмів визначення значущості інформаційних ресурсів. Запропоновані алгоритми сприяють підвищенню точності проектування та ефективності управління інженерними системами.



## 6 ВИСНОВКИ

Визначено, що в умовах постійного збільшення обсягу даних та складності інженерних систем стає очевидною необхідність впровадження адаптивних алгоритмів розумного інтелекту. Такі алгоритми здатні забезпечити більш ефективно управління та проектування інженерних систем завдяки своїй здатності адаптуватися до змінних умов та забезпечувати високу релевантність отриманих результатів. Обґрунтовано, що для реалізації адаптивних алгоритмів розумного інтелекту потрібно розробити нові методи та інструментальні засоби, що включає застосування семантико-синтаксичного аналізу текстів, природно-мовних засобів та інтелектуальних алгоритмів визначення значущості інформаційних ресурсів. Слід забезпечити, щоб ці методи могли обробляти великі обсяги даних та генерувати максимально релевантні результати для проектувальників інженерних систем.

Доведено, що одним з ключових аспектів є розробка ефективних нейромережевих алгоритмів для розв'язання задачі призначення та ранжування пошукових запитів. Такі алгоритми повинні забезпечити оптимальний розподіл релевантності пошукових сторінок відповідно до груп критеріїв, що дозволить підвищити точність та ефективність пошуку інформації. Використання нейромережевих моделей дозволяє розглядати задачі комбінаторної оптимізації та забезпечувати високу продуктивність навіть у випадку проектування складних інженерних систем на основі розумного інтелекту.

## 7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

## Література

1. Безклубенко І. С., Гетун Г. В., Баліна О. І., Буценко Ю. П. Дослідження властивостей множини ефективних значень критеріїв в задачі оптимізації інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 51, стр. 81-86.
2. Вербівська Л. В. Застосування інструментів штучного інтелекту при управлінні конкурентоспроможністю підприємства. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*. 2023. №(10). <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-06>
3. Македон В. В., Маковецька А. О. Інформаційне забезпечення економічної безпеки підприємств в умовах ринкової нестабільності. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки"*. 2023. №12. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477>.
4. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2 (59). С. 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
5. Adibfar A., Costin A., Issa R.R.A. Design Copyright in Architecture, Engineering, and Construction Industry: Review of History, Pitfalls, and Lessons Learned. *Journal of legal affairs and dispute resolution in engineering and construction*. 2020. 12. 04520032, doi:10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000421.
6. Alsabhan W. Human–Computer Interaction with a Real-Time Speech Emotion Recognition with Ensembling Techniques 1D Convolution Neural Network and Attention. *Sensors*. 2023. №23(3). p. 1386. <https://doi.org/10.3390/s23031386>.
7. Gan G., Ma Ch., Wu J. Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications. Philadelphia, Pennsylvania: SIAM, 2007. 455 p.
8. Korte В., Vygen J. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics), Springer. New York, 2018. 455 p.

9. Lai H., Deng X., Chang T.-Y. P. BIM-Based Platform for Collaborative Building Design and Project Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2019. 33. 05019001. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943- 5487.0000830.
10. Masoud R., Basahel S. The Effects of Digital Transformation on Firm Performance. *The Role of Customer Experience and IT Innovation*. 2023. №3. pp. 109–126. <https://doi.org/10.3390/digital3020008>
11. McAfee A., Brynjolfsson E. *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. New York: W.W. Norton & Company, 2017. 340 p.
12. Oraee M., Hosseini M.R., Edwards D.J., Li, H., Papadonikolaki E., Cao D. Collaboration Barriers in BIM-Based Construction Networks: A Conceptual Model. *International Journal of Project Management*. 2019. No 37. pp. 839– 854, doi:10.1016/j.ijproman.2019.05.004.
13. Pajak K., Omelyanenko V., Makedon V., Shevchenko V., Ovcharenko I. Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. No 10(1). pp. 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).
14. Scibilia A., Pedrocchi N., Fortuna L. Human Control Model Estimation in Physical Human–Machine Interaction: A Survey. *Sensors*. 2022. №22(5). P. 1732. <https://doi.org/10.3390/s22051732>.
15. Yashchenko V.A. Neural-like growing networks in the development of general intelligence. Neural-like element (P. I) *Mathematical machines and systems*. 2022. N4. P. 15-36.

## References

1. Bezklubenko, I. S., Getun, G. V., Balina, O. I., Butsenko, Yu. P. (2022). Doslidzhennya vlastyvostry mnozhyny efektyvnykh znachen' kryteriyiv v zadachi optymizatsiyi inzhenernoyi merezhi [Study of the properties of the set of effective criteria values in the engineering network optimization problem]. *Management of the development of complex systems*, No. 51, 81-86.
2. Verbiv's'ka, L. V. (2023). Zastosuvannya instrumentiv shtuchnoho intelektu pry upravlinni konkurentospromozhnisty pidpryyemstva [Application of artificial intelligence tools in managing the competitiveness of the enterprise]. *Problemy suchasnykh transformatsiy. Seriya: ekonomika ta upravlinnya*, (10). <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-06>.
3. Makedon, V. V., Makovets'ka, A. O. (2023). Informatsiyne zabezpechennya ekonomichnoyi bezpeky pidpryyemstv v umovakh rynkovoyi nestabil'nosti. [Information provision of economic security of enterprises in conditions of market instability]. *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal "Internauka"*. Seriya: "Ekonomichni nauky", 12. Available at: <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9477>. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477>.
4. Makedon, V. V., Kholod, O. H., Yarmolenko, L. I. (2023). Model' otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpryyemstv na zasadakh formuvannya klyuchovykh kompetentsiy [The model of assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competencies]. *Akademichnyy ohlyad*, 2(59), 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
5. Adibfar, A., Costin, A., Issa, R.R.A. (2020). Design Copyright in Architecture, Engineering, and Construction Industry: Review of History, Pitfalls, and Lessons Learned. *Journal of legal affairs and dispute resolution in engineering and construction*, 12, 04520032, doi:10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000421. (in English).
6. Alsabhan, W. (2023). Human–Computer Interaction with a Real-Time Speech Emotion Recognition with Ensembling Techniques 1D Convolution Neural Network and Attention. *Sensors*, 23(3), 1386. <https://doi.org/10.3390/s23031386>.
7. Gan, G., Ma, Ch., Wu, J. (2007). *Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications*. Philadelphia, Pennsylvania: SIAM.
8. Korte, B., Vygen, J. (2018). *Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics)*, Springer, New York.
9. Lai, H., Deng, X., Chang, T.-Y. P. (2019). BIM-Based Platform for Collaborative Building Design and Project Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33. 05019001. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943- 5487.0000830.

10. Masoud, R., Basahel, S. (2023). The Effects of Digital Transformation on Firm Performance. The Role of Customer Experience and IT Innovation, 3, 109–126. <https://doi.org/10.3390/digital3020008>. [in English].
11. McAfee, A., & Brynjolfsson, E. (2017). Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future. New York: W.W. Norton & Company.
12. Oraee, M., Hosseini, M.R., Edwards, D.J., Li, H., Papadonikolaki, E., Cao, D. (2019). Collaboration Barriers in BIM-Based Construction Networks: A Conceptual Model. International Journal of Project Management, 37, 839-854, doi:10.1016/j.ijproman.2019.05.004.
13. Pajak, K., Omelyanenko, V., Makedon, V., Shevchenko, V., Ovcharenko, I. (2020). Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. Journal of Security and Sustainability Issues, №10(1), 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).
14. Scibilia, A., Pedrocchi, N., Fortuna, L. (2022). Human Control Model Estimation in Physical Human–Machine Interaction: A Survey. Sensors, 22(5), 1732. <https://doi.org/10.3390/s22051732>.
15. Yashchenko, V.A. (2022). Neural-like growing networks in the development of general intelligence. Neural-like element (P. I) Mathematical machines and systems, N4, 15–36.

**Кирилов Сергій Олександрович**

Одеський національний економічний університет,  
к.ф.-м.н., доцент,  
вул. Преображенська, 8, м. Одеса, Україна, 65000  
[kyrylovserhi@gmail.com](mailto:kyrylovserhi@gmail.com)  
ORCID: 0000-0002-6328-9361

**Сікора Ярослава Богданівна**

Житомирський державний університет імені Івана Франка,  
к.педаг.н., доцент,  
вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, Україна, 10008  
[iaroslava.sikora@gmail.com](mailto:iaroslava.sikora@gmail.com)  
ORCID: 0000-0003-2621-6638

**Рябчун Юлія Володимирівна**

Київський національний університет будівництва та архітектури,  
Ph.D.  
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, Україна, 03037  
[super.etsy@ukr.net](mailto:super.etsy@ukr.net)  
ORCID: 0000-0002-8320-4038

*Для посилань:*

Кирилов С. О., Сікора Я. Б., Рябчун Ю. В. Розробка адаптивних алгоритмів роевого інтелекту у проєктуванні та управлінні інженерними системами. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. № 2. С. 136–146

*For references:*

S. Kyrylov, Ya. Sikora, Yu. Riabchun. (2024). Development of adaptive algorithms of swarm intelligence in design and management of engineering systems. Mechanics and Mathematical Methods. VI (1). 136–146.