

## ОЦІНЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНОГО РИЗИКУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОЛЕКТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

© 2017 Скіцько В. І.

УДК 004.8:519.8:658.8

Скіцько В. І.

### Оцінювання логістичного ризику з використанням колективного штучного інтелекту

В обґрунтуванні управлінських рішень у логістиці можуть використовуватися різні економіко-математичні методи та моделі кількісного оцінювання ступеня ризику, що будуються за допомогою різноманітного інструментарію. Завдяки підвищенню обчислювальних потужностей комп'ютерної техніки економіко-математичні моделі стають складнішими, більш точнішими, а інструментарій моделювання розширюється. Сучасним перспективним напрямком у математичному моделюванні є колективний штучний інтелект, за допомогою якого можна ефективно вирішувати слабоструктуровані, багатокритеріальні, багатогольові, складні економічні задачі. У роботі наведено математичну модель алгоритму кажанів, основні правила та кроки його функціонування, показано застосування алгоритму кажанів щодо вирішення багатоіндексної транспортної задачі, у формулюванні якої враховано логістичний ризик, та показано спосіб оцінки логістичного ризику за результатами функціонування алгоритму кажанів.

**Ключові слова:** логістичний ризик, колективний штучний інтелект, алгоритм кажанів, багатоіндексна розподільча задача.

**Формул:** 10. **Бібл.:** 20.

**Скіцько Володимир Іванович** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економіко-математичного моделювання, Київський національний економічний університет ім. В. Гетьмана (пр. Перемоги, 54/1, Київ, 03057, Україна)

**E-mail:** skitsko.kneu@gmail.com

УДК 004.8:519.8:658.8

UDC 004.8:519.8:658.8

### Скицко В. И. Оценивание логистического риска с использованием коллективного искусственного интеллекта

В обосновании управленческих решений в логистике могут использоваться различные экономико-математические методы и модели количественной оценки степени риска, строящиеся с помощью разнообразного инструментария. Благодаря повышению вычислительных мощностей компьютерной техники экономико-математические модели становятся более сложными, более точными, а инструментарий моделирования расширяется. Современным перспективным направлением в математическом моделировании является коллективный искусственный интелект, с помощью которого можно эффективно решать слабоструктурированные, многокритериальные, многоцелевые, сложные экономические задачи. В работе приведена математическая модель алгоритма летучих мышей, основные правила и шаги его функционирования, показано применение алгоритма летучих мышей для решения многоиндексной транспортной задачи, в формулировке которой учтен логистический риск, и показан способ оценки логистического риска по результатам функционирования алгоритма летучих мышей.

**Ключевые слова:** логистический риск, коллективный искусственный интелект, алгоритм летучих мышей, многоиндексная распределительная задача.

**Формул:** 10. **Библ.:** 20.

**Скицко Владимир Иванович** – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономико-математического моделирования, Киевский национальный экономический университет им. В. Гетьмана (пр. Победы, 54/1, Киев, 03057, Украина)

**E-mail:** skitsko.kneu@gmail.com

Skitsko V. I.

### Assessment of Logistics Risk using Collective Artificial Intelligence

In substantiating management decisions in logistics, there can be used various economic and mathematical methods and models for quantitative risk assessment constructed with the help of a variety of instruments. Due to the increase in the processing power of computer equipment, economic and mathematical models become more complex, more precise, and the range of modeling tools expands. The current promising area in mathematical modeling is collective artificial intelligence, with the help of which it is possible to effectively solve weakly structured, multi-criteria, multi-purpose, complex economic problems. The mathematical model of the bat algorithm, the basic rules and steps of its functioning are presented, the application of the bat algorithm to solve the multi-index transport problem in the formulation of which the logistics risk is taken into account is shown, and the way to assess the logistics risk using the results of the functioning of the bat algorithm is shown.

**Keywords:** logistics risk, collective artificial intelligence, bat algorithm, multi-index distribution problem.

**Formulae:** 10. **Bibl.:** 20.

**Skitsko Volodymyr I.** – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economic and Mathematical Modeling, Kyiv National Economic University named after V. Hetman (54/1 Peremohy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

**E-mail:** skitsko.kneu@gmail.com

**Постановка проблеми.** Економіку можна вважати динамічною слабоструктурованою системою великої складності, в якій функціонують і неперервно взаємодіють між собою різні підприємства [1]. Менеджмент таких підприємств зазвичай приймає виважені управлінські рішення

в умовах невизначеності, конфліктності та зумовленими ними ризиком. Наприклад, згідно з щорічником Allianz Risk Barometer страхової компанії «Allianz Global Corporate & Specialty» (AGCS) [2] кілька років поспіль перше місце серед глобальних ділових ризиків займає ризик порушення

функціонування бізнес-процесів, зокрема, ланцюгів постачання, інакше кажучи, логістичний ризик.

Окрім того, логістика як складова діяльності будь-якого великого підприємства займає дедалі більш значуще місце у забезпеченні життєздатності такого підприємства та потребує суттєвих капіталовкладень (інвестицій) для її (логістики) ефективного функціонування. Це зумовлено, наприклад, таким. Наразі ціни на одну й ту ж саму продукцію в різних інтернет-магазинах можуть бути майже однаковими, а тому споживач свій вибір здійснює зазвичай на користь того магазину, який може доставити цю продукцію якомога швидше, в узгоджений час та місце. А це не можливо без добре продуманої системи логістики як самого магазину, так і ланцюга постачання від виробника продукції до споживача в цілому.

В обґрунтуванні управлінських рішень у логістиці можуть використовуватися різні економіко-математичні методи та моделі кількісного оцінювання ступеня ризику, що будуються за допомогою різноманітного інструментарію. Завдяки підвищенню обчислювальних потужностей комп'ютерної техніки економіко-математичні моделі стають складнішими, більш точнішими, а інструментарій моделювання розширюється.

Сучасним перспективним напрямком у математичному моделюванні є колективний штучний інтелект, за допомогою якого можна ефективно вирішувати слабоструктуровані, багатокритеріальні, багатоцільові, складні економічні задачі, зокрема, пов'язані з управлінням ризиком, в тому числі й логістичним ризиком. Проте наукових робіт, які були б присвячені вирішенню таких задач з використанням засобів колективного штучного інтелекту, обмаль. Тому є потреба у системних дослідженнях використання моделей колективного штучного інтелекту, зокрема, в оцінюванні ступеня логістичного ризику.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різним аспектам оцінювання логістичного ризику присвячено низку робіт, зокрема [3–9]. Зазвичай авторами при оцінюванні логістичного ризику використовується загальноприйнятий підхід, згідно з яким ризик може бути розглянуто: як імовірність настання несприятливої ситуації (що зумовлює збитки); як сподівана величина збитків, які можуть мати місце при несприятливих ситуаціях; як міра розсіювання значень деякого досліджуваного показника, що характеризує функціонування складових логістичної системи в цілому та окремо відносно центру групування цих значень; як лінійна комбінація кількох показників ризику [1]. В межах управління логістичним ризиком низка авторів [4; 5] наголошують на потребі вирішення задач класифікації та ранжування, зокрема, причин і наслідків ситуацій, які пов'язані з проявом логістичного ризику.

Зазвичай авторами використовується «класичний» інструментарій моделювання, проте існують роботи, в яких використовується інструментарій природних обчислень. Наприклад, авторами роботи [7] використано інструментарій мереж Петрі у моделюванні логістичної системи з метою визначення несприятливих ситуацій, що пов'язані з проявом операційного логістичного ризику, та подальшим їх ранжуванням. У роботі [9] авторами використовується мурашиний алгоритм у дослідженнях задачі пошуку найкоротшого шляху з урахуванням ризику, що пов'язаний

із виникненням небажаних ситуацій під час руху, що можуть збільшити час проходження маршруту (дорожні затори, поломки транспорту тощо).

Аналіз зазначених та інших робіт дозволяє зробити висновок щодо перспективності використання інноваційних засобів моделювання (в тому числі й колективного штучного інтелекту). Проте робіт, які б були присвячені використанню різних алгоритмів колективного штучного інтелекту (окрім мурашиного алгоритму) в оцінюванні ризику, зокрема логістичного, обмаль. Тому цією роботою ми б хотіли деякою мірою заповнити цю прогалину.

**Мета роботи** полягає у дослідженні різних аспектів використання моделей колективного штучного інтелекту в оцінюванні логістичного ризику.

**Основні результати дослідження.** Мінливі умови ведення сучасного бізнесу вимагають, зокрема, зростання оперативності управлінських рішень в умовах невизначеності та конфліктності, що зумовлюють відповідні ризики, без зниження їх (рішень) якості, обґрунтованості, адекватності тощо. Основою будь-якого ефективного рішення є інформація, якою володіє особа, що приймає рішення. Можна припустити, що із зростанням обсягу даних, на основі яких приймається рішення, зростає й обґрунтованість та адекватність таких рішень, проте зменшується оперативність їх прийняття. І це може зумовити проблему своєчасності прийняття таких управлінських рішень.

Розвиток сучасних інформаційних засобів і технологій дозволяє генерувати, зберігати, обробляти й аналізувати великі обсяги даних на кожному підприємстві. Швидко обробляти й аналізувати дані можна, зокрема, з використанням інформаційних технологій і засобів, які забезпечують паралельні обчислення, до яких можна віднести колективний штучний інтелект.

Колективний штучний інтелект – це формалізація природної поведінки живих істот з метою вирішення складних оптимізаційних задач, задачі комівояжера тощо. У природі живі істоти здатні колективно ефективно вирішувати складні задачі, тому можна припустити, що й математичні моделі, які побудовані з урахуванням способів поведінки таких істот, також будуть ефективними й адекватними, зокрема, для розв'язання різних оптимізаційних задач [10]. Наразі до засобів колективного штучного інтелекту, які здобули широку популярність у вирішенні різних задач, можна віднести метод рою часток, мурашиний алгоритм, бджолиний алгоритм, штучну імунну систему, алгоритм кажанів тощо. Для зазначених та інших засобів колективного штучного інтелекту з'являються різні нові модифікації, які дозволяють підвищити ефективність розв'язку відповідних задач, а також з'являються нові засоби колективного штучного інтелекту, які потребують широких досліджень, зокрема, в 2013 році було розроблено алгоритм сірого вовка.

Хоча засоби колективного штучного інтелекту моделюють поведінку різних живих істот за допомогою відповідних алгоритмів, проте в них можна виділити такі спільні кроки [11]:

- 1) ініціалізація популяції. В області допустимих рішень деяким чином (випадково, використовуючи деяку процедуру або взагалі навмання) обирається деяка кількість початкових рішень (агентів), які утворюють початкову популяцію алгоритму;

- 2) міграція агентів популяції. В області допустимих рішень відбувається «рух» агентів певним чином (з використанням міграційних операторів, які є специфічні для кожного окремого алгоритму) з метою якомога ближче та швидше наблизитися до екстремуму цільової функції;
- 3) закінчення пошуку. Здійснюється перевірка щодо виконання критерію зупинки функціонування алгоритму. Критерієм може бути максимальна кількість ітерацій роботи алгоритму, загальний час функціонування алгоритму тощо. Якщо критерій виконується, то робота алгоритму зупиняється і серед агентів популяції, що утворилась на останній ітерації роботи алгоритму, шукається найкраще рішення. Якщо критерій не виконано, то здійснюється міграція агентів популяції згідно з другим кроком.

Одне із важливих місць в алгоритмах колективного штучного інтелекту посідає фітнес-функція (функція пристосованості, корисності, придатності тощо), за допомогою якої оцінюється «якість» агентів популяції [11]. Чим «якість» агента є вищою, тим ближче знаходиться агент до рішення, що шукається.

Окрім того, в алгоритмах колективного штучного інтелекту потрібно використовувати механізми адаптації та самоадаптації для підтримки балансу між різноманіттям агентів популяції (що дозволяє охопити якомога ширше коло потенційних розв'язків задачі) та швидкістю збіжності алгоритму (що зумовлює швидке зменшення різноманітності агентів популяції) [11].

Доцільність використання засобів колективного штучного інтелекту в оцінюванні логістичного ризику зумовлена, зокрема, тим, що вони, на наш погляд, здатні більшою мірою, ніж «класичний» інструментарій, враховувати діалектичну суб'єктивно-об'єктивну структуру ризику. Кількісну оцінку ступеня логістичного ризику можна розглядати як вектор, частина компонент якого мають об'єктивну природу (дисперсія, семіваріація, коефіцієнт варіації тощо), решта компонент – суб'єктивні оцінки ризику, які залежать від ставлення суб'єкта ризику до невизначеності та конфліктності, що зумовлюють появу відповідного ризику [1, с. 49]. Такий вектор, що відповідає кількісній оцінці ступеня логістичного ризику, в контексті алгоритмів колективного штучного інтелекту може бути представлений агентом, а вектор з «ідеальними» значеннями його компонент (показників) може відповідати меті функціонування алгоритму (значенню цільової функції, до якого потрібно наблизитися якомога ближче).

Розглянемо далі алгоритм кажанів.

Алгоритм кажанів (англ. Bat Algorithm) було запропоновано в 2010 році Хін-Ши Янгом (Xin-She Yang) [12], в якому він формалізував здатність кажанів за допомогою засобів ехолокації знаходити їжу й оминати перешкоди під час польоту в темноті. Це відбувається таким чином: кажани у польоті генерують частотно-модульовані звукові сигнали та вловлюють відлуння, що відбиваються від навколишніх об'єктів і предметів, за якими і здійснюють подальший свій вибір щодо місцезнаходження їжі (здобичі), перешкод тощо [13].

В цілому алгоритм кажанів є достатньо ефективним у вирішенні різних оптимізаційних задач, проте для розширення кола його застосування та покращення його роботи наразі існує низка його модифікацій, за допомогою яких можна вирішувати майже будь-які задачі оптимізації, задачі класифікації та кластеризації, здійснювати аналіз даних, проводити обробку зображень, використовувати у нечіткій логіці тощо [13; 14]. Перевагами алгоритму кажанів, зокрема, є: здатність враховувати недопустимі ділянки області рішень; регулювання швидкості руху кожного кажана та інтенсивності пульсації його звукового сигналу дозволяє знаходити локально-оптимальне рішення за досить малу кількість ітерацій (тобто невеликий проміжок часу) [15].

#### Математична модель алгоритму кажанів.

На основі [11–17], опишемо далі основні положення щодо функціонування алгоритму кажанів.

*Здійснимо таке позначення:*

$v_i^t$  – швидкість руху  $i$ -го кажана у момент часу  $t$ , який відповідає номеру ітерації  $t$  цього алгоритму;

$x_i^t$  – позиція  $i$ -го кажана у момент часу  $t$ ;

$\lambda_i$  – довжина хвилі звукового сигналу  $i$ -го кажана,

$0 \leq \lambda_{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max}$ , де  $\lambda_{\min}$  та  $\lambda_{\max}$  – мінімальна та максимальна довжина хвилі звукового сигналу  $i$ -го кажана;

$f_i$  – частота хвилі звукового сигналу  $i$ -го кажана,

$0 \leq f_{\min} \leq f_i \leq f_{\max}$ , де  $f_{\min}$  та  $f_{\max}$  – мінімальна та максимальна частота хвилі звукового сигналу  $i$ -го кажана,

$$f_i = \frac{1}{\lambda_i};$$

$r_i$  – інтенсивність пульсації звукового сигналу  $i$ -го кажана,  $0 \leq r_i \leq r_{\max} \leq 1$ , де  $r_{\max}$  – максимальна інтенсивність пульсації звукового сигналу  $i$ -го кажана;

$a_i$  – гучність звукового сигналу  $i$ -го кажана,

$0 \leq a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max} \leq 1$ , де  $a_{\min}$  та  $a_{\max}$  – мінімальна та максимальна гучність звукового сигналу  $i$ -го кажана,  $a_{\min} < a_{\max}$ ;

$x^*$  – позиція деякого кажана, в якій рішення є найкращим до поточного моменту.

*Основні правила функціонування алгоритму кажанів:*

- 1) усі кажани використовують ехолокацію з метою визначення відстані до об'єкта та розпізнають їжу (здобич) та фонові бар'єри (перешкоди);
- 2)  $i$ -й кажан здійснює політ випадковим чином зі швидкістю  $v_i$  із положення  $x_i$ , генеруючи звуковий сигнал з частотою хвилі  $f_i$  (або довжиною хвилі  $\lambda_i$ ) та гучністю  $a_i$  для пошуку їжі (здобичі). Кажани здатні автоматично регулювати довжину (або частоту) хвилі звукового сигналу й інтенсивність пульсації звукового сигналу  $r_i$ , залежно від їх близькості до цілі (тобто їжі);

3) незважаючи на те, що гучність звукового сигналу може змінюватися різним чином, роблять припущення, що гучність змінюється від деякого більшого початкового значення  $a_0$  до меншого постійного значення  $a_{\min}$ , які є невід'ємними.

*Формалізація руху кажанів у функціонуванні алгоритму.*

Кожен кажан характеризується на певній ітерації  $t$  швидкістю руху  $v_i^t$  та розташуванням  $x_i^t$  у деякому просторі пошуку рішення. Існує кажан, розташування якого є найкращим  $x^*$  серед інших до поточної ітерації  $t$ . Враховуючи зазначені вище три правила, розрахунок характеристик кажанів здійснюється таким чином:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \beta, \quad (1)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x^*) \cdot f_i, \quad (2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t, \quad (3)$$

де  $\beta$  – рівномірно розподілена випадкова величина на інтервалі  $[0,1]$ .

Гучність та інтенсивність пульсації звукового сигналу кажана буде розраховуватися таким чином:

$$a_i^{t+1} = \alpha \cdot a_i^t, \quad (4)$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0 \cdot (1 - e^{-\gamma t}), \quad (5)$$

де  $\alpha \in [0,1]$  – коефіцієнт затухання гучності,  $\gamma \in [0,1]$  – коефіцієнт підсилення гучності,  $\alpha$  та  $\gamma$  є константами. Зазвичай приймають, що  $\alpha = \gamma$  і дорівнюють від 0,9 до 0,98.

Із збільшенням номеру ітерацій в алгоритмі гучність звукового сигналу буде зменшуватися, натомість інтенсивність пульсації збільшуватиметься, що буде свідчити про наближення кажана до деякої цілі. Формалізовано це можна записати так:  $a_i^t \rightarrow 0$  та  $r_i^t \rightarrow r_i^0$ , за умови, що  $t \rightarrow \infty$ .

*Кроки алгоритму кажанів у загальному випадку.*

*Крок 1.* Ініціалізація початкової популяції кажанів і характеристик звукового сигналу. На цьому кроці визначається загальна кількість кажанів  $N$ , для яких випадковим чином задаються їх початкові позиції ( $x_i^0, i = \overline{1, N}$ ) та швидкості ( $v_i^0, i = \overline{1, N}$ ), а також характеристики звукового сигналу: частота ( $f_i, i = \overline{1, N}$ ), інтенсивність ( $r_i^0, i = \overline{1, N}$ ), гучність ( $a_i^0, i = \overline{1, N}$ ). Визначається кажан (агент), для якого рішення є найкращим на початковому кроці.

*Крок 2.* Рух кожного  $i$ -го кажана ( $i = \overline{1, N}$ ) передбачає визначення позиції та швидкості кожного з них формулами (2) – (3), тобто відбувається процедура міграції агентів популяції.

*Крок 3.* Генерується випадкове число з інтервалу  $[0,1]$ . Якщо для деякого кажана це число є більшим за інтенсивність пульсації його звукового сигналу, то для такого кажана здійснюється локальний пошук в околі поточної позиції шляхом випадкових блукань за формулою:

$$x_i^t = x_i^t + \varepsilon \cdot a^t, \quad (6)$$

де  $x_i^t$  – нова позиція  $i$ -го кажана на ітерації  $t$ ,  
 $\varepsilon$  – випадкова величина, що рівномірно розподілена на інтервалі  $[-1,1]$ ,

$\overline{a^t}$  – середнє значення гучності звукових сигналів усіх кажанів на ітерації  $t$ .

Якщо значення фітнес-функції у новій позиції є кращим за значення фітнес-функції у розрахованій позиції на кроці 2, то нова позиція приймається за поточну для цього кажана.

*Крок 4.* Генерується нове випадкове число з інтервалу  $(0,1)$ . Якщо для деякого кажана нове випадкове число є меншим за гучність його звукового сигналу та значення фітнес-функції є кращим за найкраще значення фітнес-функції по усій популяції кажанів, то нова позиція приймається за нову для цього кажана для подальших ітерацій, та відбувається оновлення значень характеристик звукового сигналу згідно з формулами (4)–(5).

*Крок 5.* Визначається кажан (агент), для якого рішення є найкращим на цій ітерації роботи алгоритму, тобто знаходиться глобальне краще рішення.

Кроки 2, 3, 4, 5 повторюються доти, поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму, наприклад, вичерпано задану загальну кількість ітерацій.

Незалежно від виду логістичного ризику використання алгоритму кажанів потребує, зокрема, щоби була сформульована оптимізаційна задача (якщо існує потреба у дослідженні впливу прояву логістичного ризику на результат діяльності логістичної системи та логістичного ланцюга поставок у цілому чи їх складових), задача класифікації чи кластеризації (якщо існує потреба у класифікації чи кластеризації наслідків прояву або чинників логістичних ризиків) тощо.

Наразі дедалі більшого застосування дістає багатоіндексна транспортна задача, яка, на відміну від класичної транспортної задачі, здатна враховувати різноманітність продукції, яку потрібно перемістити, різноманітність транспортних засобів, потреби множин виробників, логістичних центрів, споживачів тощо. Наприклад, формалізована транспортна задача, яка враховує переміщення різної (неоднорідної) продукції різними транспортними засобами від виробників до споживачів через різні логістичні центри, може мати такий вигляд [18–20]:

Необхідно знайти багатоіндексну матрицю  $X = \{x_{ijklm}\}$ , яка мінімізує загальні витрати щодо переміщення продукції:

$$F(X) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M c_{ijklm} x_{ijklm} \rightarrow \min, \quad (7)$$

за умови виконання таких обмежень:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{ijklm} &= a_{im}; & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{ijklm} &= b_{jm}; \\ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L x_{ijklm} &\leq d_{km}; & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijklm} &\leq q_{lm}; \\ \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{ijklm} &= w_{ij}; & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L x_{ijklm} &\leq v_{im}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{ijklm} \geq 0; \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \\ k = \overline{1, K}; \quad l = \overline{1, L}; \quad m = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $F(X)$  – цільова функція, яка визначає сумарні витрати на всі переміщення усієї продукції від усіх виробників усіма транспортними засобами через усі логістичні центри;

$C_{ijklm}$  – вартість переміщення одиниці продукції  $m$ -го виду від  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача через  $k$ -й логістичний центр за допомогою  $l$ -го транспортного засобу;

$x_{ijklm}$  – обсяг продукції  $m$ -го виду, що переміщується від  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача через  $k$ -й логістичний центр за допомогою  $l$ -го транспортного засобу;

$a_{im}$  – загальний обсяг  $m$ -ї продукції, що може бути переміщено від  $i$ -го джерела (виробника);

$w_{ij}$  – загальний обсяг усієї продукції, що може бути переміщено від  $i$ -го джерела (виробника) до  $j$ -го споживача;

$b_{jm}$  – загальний обсяг  $m$ -ї продукції, що може бути спожито  $j$ -м споживачем;

$d_{km}$  – потужність  $k$ -го логістичного центру щодо  $m$ -ї продукції (тобто максимальний обсяг  $m$ -ї продукції, що може бути переміщено та розміщено на  $k$ -му логістичному центрі);

$q_{lm}$  – обсяг  $m$ -ї продукції, що може буде перевезено (переміщено)  $l$ -м транспортним засобом, тобто його вантажопідйомність щодо цього виду продукції;

$v_{im}$  – загальний обсяг  $m$ -ї продукції, що може бути випущено  $i$ -м джерелом (виробником).

Існують різні методи розв'язку такої задачі, що ґрунтуються на класичних підходах розв'язку класичної транспортної задачі та мають досить трудомісткі обчислення [20]. Тому вбачаємо за доцільне для розв'язку цієї задачі використати алгоритми колективного штучного інтелекту для отримання оптимального рішення за прийнятний час, зокрема, алгоритм кажанів.

Будемо вважати, що будь-яке переміщення продукції обтяжене можливим проявом логістичного ризику, а величину логістичного ризику будемо визначити як імовірність настання небажаних ситуацій. Позначимо як  $R_{ijklm}$  рівень логістичного ризику при перевезенні продукції  $m$ -го виду від  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача через  $k$ -й логістичний центр за допомогою  $l$ -го транспортного засобу,  $R_{ijklm} \in [0, 1]$ ,  $R_{\max}$  – максимальний рівень допустимого логістичного ризику для будь-яких перевезень. Припустимо, що значення  $R_{ijklm}$  генеруються випадковим чином на кожній ітерації алгоритму кажанів (відповідаючи тим самим динаміці появи несприятливих ситуацій) та збільшують вартість відповідних перевезень таким чином:

$$C_{ijklm}^* = \begin{cases} (1 + R_{ijklm}) \cdot C_{ijklm}, & R_{ijklm} < R_{\max}, \\ 2 \cdot C_{ijklm}, & R_{ijklm} \geq R_{\max}, \end{cases}$$

де  $C_{ijklm}^*$  – вартість перевезення продукції  $m$ -го виду від  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача через  $k$ -й логістичний центр за допомогою  $l$ -го транспортного засобу з урахуванням логістичного ризику.

Тоді вираз (6) можна переписати так:

$$F^*(X) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M C_{ijklm}^* x_{ijklm} \rightarrow \min. \quad (10)$$

В контексті алгоритму кажанів багатомірний простір  $X = \{x_{ijklm}\}$  буде відповідати одному кажану у багатовимірному просторі; кількість кажанів у початковій популяції визначається дослідником;  $a_{im}$ ,  $w_{ij}$ ,  $b_{jm}$ ,  $d_{km}$ ,  $q_{lm}$ ,  $v_{im}$ ,  $C_{ijklm}$  є константи, що задаються відповідним чином дослідником; фітнес-функція агента (кажана) може бути розрахована за формулою (10) з урахуванням обмежень (8)–(9).

Кроки алгоритму кажанів для нашої задачі можуть бути аналогічні тим, які описано вище у статті, з урахуванням багатовимірності простору пошуку рішення. Зокрема, на кроці 2 алгоритму зміна позиції кажана може відповідати одночасній зміні усіх складових матриці  $X = \{x_{ijklm}\}$  на значення швидкості руху кажана на поточній ітерації подібно до виразу (3), а на кроці 3 алгоритму може досліджуватися вплив зміни кожної окремої складової матриці  $X$  подібно до виразу (6) на значення фітнес-функції. Перебравши випадкові блукання для усіх складових матриці  $X$ , буде отримано нову позицію кажана, в якій значення фітнес-функції буде кращим за попереднє.

У результаті роботи алгоритму кажанів отримаємо значення цільової функції, яке буде кращим для заданої кількості ітерацій роботи алгоритму.

Маючи значення  $R_{ijklm}$  для усіх перевезень на усіх ітераціях функціонування алгоритму кажанів, можна, наприклад, визначити середній рівень ризику для відповідного перевезення:

$$\bar{R}_{ijklm} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T R_{ijklm}^t,$$

де  $\bar{R}_{ijklm}$  – середній рівень логістичного ризику перевезення продукції  $m$ -го виду від  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача через  $k$ -й логістичний центр за допомогою  $l$ -го транспортного засобу;

$R_{ijklm}^t$  – рівень логістичного ризику, яким обтяжене перевезення продукції  $m$ -го виду від  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача через  $k$ -й логістичний центр за допомогою  $l$ -го транспортного засобу, що було згенеровано на ітерації  $t$  алгоритму кажана;

$t = \overline{0, T}$  – номер ітерації алгоритму;

$T$  – задана загальна кількість ітерацій алгоритму кажанів.

**Висновки.** Складність сучасних економічних задач та утрудненість класичних засобів їх вирішення надати адекватні рішення за прийнятний час зумовлює пошук нових засобів їх вирішення. Наразі одним із таких засобів можуть бути методи й алгоритми колективного штучного інтелекту. У цій роботі досліджено роботу алгоритму кажанів і показано його застосування щодо вирішення багатомірної транспортної задачі, у формулюванні якої враховано логістичний ризик, та показано спосіб оцінки

логістичного ризику за результатами функціонування алгоритму кажанів.

Алгоритм кажанів разом із його модифікаціями й іншими алгоритмами та методами колективного штучного інтелекту є потужним засобом вирішення різних задач. Тому вбачаємо за доцільне у подальших дослідженнях зосередитися на використанні широкого кола алгоритмів і методів колективного штучного інтелекту щодо вирішення актуальних задач логістики – багатоіндексних розподільчих задач в умовах невизначеності, конфліктності та зумовленого ними ризику.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Верченко П. І. Багатокритеріальність і динаміка економічного ризику (моделі та методи): монографія. Київ: КНЕУ, 2006. 272 с.
2. Allianz Risk Barometer 2017. URL: [http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/Reports/Allianz\\_Risk\\_Barometer\\_2017\\_EN.pdf](http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/Reports/Allianz_Risk_Barometer_2017_EN.pdf)
3. Бажан Л. І. Оцінювання ризиків при управлінні логістичним центром. *Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем*. 2009. Вип. 14. С. 129–143.
4. Кондратенко Н. О., Лобашов О. О. Інструменти управління та методи оцінки ризиків у логістичних системах. *Коммунальное хозяйство городов*. 2012. № 102. С. 343–350
5. Карпова Н. П. Оценка логистических рисков в процессе стратегического планирования снабжения организаций. *Аудит и финансовый анализ*. 2014. № 2. С. 321–325.
6. Oklander M., Yashkin D. Methodological approaches to logistic risk assessment // *Innovativeness and entrepreneurship: clusters management: good practices in the World: monograph* edited by Ewa Bojar and Korneliusz Pylak. Lublin: Politechnika Lubelska, 2014. P. 125–134.
7. Rossi T., Noe C., Dallari F. A Formal Method for Analyzing and Assessing Operational Risk in Supply Chains // *The 23rd International Conference of the System Dynamics Society: Conference Proceedings*. Boston, 2005, July 17–21. URL: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/ROSSI436.pdf>
8. Klimov R., Merkurjev Y. Simulation-based Risk Measurement in Supply Chains // *20th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2006: Proceedings*. Bonn, May 28th–31st, 2006. URL: <http://www.scs-europe.net/services/ecms2006/ecms2006%20pdf/138-lt.pdf>
9. Кузмин О., Даюб Я. Муравьиный алгоритм и учет риска в транспортной задаче. *Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал*. 2010. № 3 (74). С. 144–148.
10. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечітко логічних і нейромережних моделей: монографія. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. 375 с.
11. Карпенко А. П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. *Информационные технологии*. 2012. № 7. Приложение. С. 1–32.
12. Yang X. S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*. 2010. Vol. 284. P. 65–74.
13. Красношлык Н. А. Решение задачи глобальной оптимизации модифицированным алгоритмом летучих мышей. *Радиоэлектроника, информатика, управління*. 2015. № 4. С. 96–103.

DOI: 10.15588/1607-3274-2015-4-14

14. Yang X., Kingshi H. Bat algorithm: literature review and applications. *International Journal of Bio-Inspired Computation*. 2013. Vol. 5. № 3. P. 141–149. DOI:10.1504/IJBIC.2013.055093

15. Кулиев Э. В., Лежебоков А. А., Кравченко Ю. А. Роевой алгоритм поисковой оптимизации на основе моделирования поведения летучих мышей. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 7 (180). С. 53–62. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-7-5362

16. Гамзалиев Р. Ш., Дроздова А. А. Реализация и исследование эффективности алгоритма «летучих мышей» // Молодой исследователь Дона. 2016. № 3. URL: <http://mid-journal.ru/upload/iblock/05d/1-gamzaliyev-drozdova-42-.pdf>

17. Дивеев А. И., Константинов С. В. Эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления. *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18, № 2. С. 254–265. DOI: 10.22363/2312-8143-2017-18-2-254-265

18. Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г. Задачи линейного программирования транспортного типа. М.: Наука, 1969. 535 с.

19. Раскин Л. Г., Кириченко И. О. Многоиндексные задачи линейного программирования. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.

20. Косенко О. В. Разработка методов и алгоритмов решения многоиндексных распределительных задач в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Таганрог, 2017. 172 с.

## REFERENCES

- “Allianz Risk Barometer 2017” [http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/Reports/Allianz\\_Risk\\_Barometer\\_2017\\_EN.pdf](http://www.agcs.allianz.com/assets/PDFs/Reports/Allianz_Risk_Barometer_2017_EN.pdf)
- Bazhan, L. I. “Otsiniuvannia ryzykiv pry upravlinni lohystychnym tsentrom” [Risk assessment at logistics center management]. *Ekonomiko-matematychne modeliuвання sotsialno-ekonomichnykh system*, no. 14 (2009): 129–143.
- Diveyev, A. I., and Konstantinov, S. V. “Evolutsionnyye algoritmy dlya resheniya zadachi optimalnogo upravleniya” [Evolutionary algorithms for solving the problem of optimal control]. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya* vol. 18, no. 2 (2017): 254–265.
- Gamzaliyev, R. Sh., and Drozdova, A. A. “Realizatsiya i issledovaniye effektivnosti algoritma «letuchikh myshey»” [Realization and investigation of the effectiveness of the «bats» algorithm]. *Molodoy issledovatel Dona*. 2016. <http://mid-journal.ru/upload/iblock/05d/1-gamzaliyev-drozdova-42-.pdf>
- Karpenko, A. P. “Populyatsionnyye algoritmy globalnoy poiskovoy optimizatsii. Obzor novykh i maloizvestnykh algoritmov” [Population algorithms of global search engine optimization. Review of new and little-known algorithms]. *Informatsionnyye tekhnologii*, no. 7 (Annex) (2012): 1–32.
- Karpova, N. P. “Otsenka logisticheskikh riskov v protsesse strategicheskogo planirovaniya snabzheniya organizatsiy” [Assessment of logistics risks in the process of strategic planning of supply of organizations]. *Audit i finansovyy analiz*, no. 2 (2014): 321–325.
- Klimov, R., and Merkurjev, Y. “Simulation-based Risk Measurement in Supply Chains” *20th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2006*. <http://www.scs-europe.net/services/ecms2006/ecms2006%20pdf/138-lt.pdf>
- Kondratenko, N. O., and Lobashov, O. O. “Instrumenty upravlinnia ta metody otsinky ryzykiv u lohystychnykh systemakh” [Management tools and risk assessment methods in logistics systems]. *Kommunalnoye khozyaystvo gorodov*, no. 102 (2012): 343–350.

Kosenko, O. V. "Razrabotka metodov i algoritmov resheniya mnogoindeksnykh raspredelitelnykh zadach v usloviyakh neopredelennosti" [Development of a method and algorithms for solving multi-index distribution tasks under conditions of uncertainty]: *dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.01*, 2017.

Krasnoshlyk, N. A. "Resheniye zadachi globalnoy optimizatsii modifitsirovannym algoritmom letuchikh myshey" [The solution of the problem of global optimization by a modified algorithm of bats]. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, no. 4 (2015): 96-103.

Kuliyev, E. V., Lezhebokov, A. A., and Kravchenko, Yu. A. "Royevoy algoritm poiskovoy optimizatsii na osnove modelirovaniya povedeniya letuchikh myshey" [Root algorithm of search optimization on the basis of modeling behavior of bats]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki*, no. 7 (180) (2016): 53-62.

Kuzemin, O., and Dayub, Ya. "Muravinyy algoritm i uchet riska v transportnoy zadache" [Ant algorithm and risk accounting in transport problem]. *Bionika intellekta*, no. 3 (74) (2010): 144-148.

Oklander, M., and Yashkin, D. "Methodological approaches to logistic risk assessment" In *Innovativeness and entrepreneurship: clusters management: good practices in the World*, 125-134. Lublin: Politechnika Lubelska, 2014.

Raskin, L. G., and Kirichenko, I. O. *Mnogoindeksnyye zadachi lineynogo programmirovaniya* [Multi-index problems of linear programming]. Moscow: Radio i svyaz, 1982.

Rossi, T., Noe, C., and Dallari, F. "A Formal Method for Analyzing and Assessing Operational Risk in Supply Chains" The 23rd International Conference of the System Dynamics Society. 2005. <http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/ROSSI436.pdf>

Subbotin, S. O., Oliinyk, A. O., and Oliinyk, O. O. *Neiteratyvni, evoliutsiini ta multyahentni metody syntezu nechitko lohichnykh i neiromereznykh modelei* [Non-iterative, evolutionary and multi-agent methods of synthesis of fuzzy logic and neural network models]. Zaporizhzhia: ZNTU, 2009.

Verchenko, P. I. *Bahatokryterialnist i dynamika ekonomichnoho ryzyku (modeli ta metody)* [Multicriteria and the dynamics of economic risk (models and methods)]. Kyiv: KNEU, 2006.

Yang, X. S. "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm" *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)* vol. 284 (2010): 65-74.

Yang, X., and Xingshi, H. "Bat algorithm: literature review and applications" *International Journal of Bio-Inspired Computation* vol. 5, no. 3 (2013): 141-149.

Yudin, D. B., and Golshteyn, Ye. G. *Zadachi lineynogo programmirovaniya transportnogo tipa* [Problems of linear programming of transport type]. Moscow: Nauka, 1969.