

УДК 004.8

DOI [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.44\(1\).128-137](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.44(1).128-137)**С. О. Кирилов¹, Л. О. Кирилова², Р. Ф. Юрій³**

¹ Одеський національний морський університет,
доцент кафедри математики, фізики та астрономії,
кандидат фізико-математичних наук
kyrylovserhii@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9361>

² Одеський національний економічний університет,
старший викладач кафедри статистики та математичних методів в економіці,
кандидат фізико-математичних наук
kirillovaludmilaalex@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4577-242X>

³ Вінницький національний медичний університет імені М. І. Пирогова,
доцент кафедри біофізики, медичної апаратури та інформатики,
кандидат фізико-математичних наук
rayisakoval1@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5917-9370>

ЗАСТОСУВАННЯ РОЄВОГО ТА ЕВОЛЮЦІЙНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ДВОРІВНЕВИХ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ

В статті досліджується складність вирішення дворівневих задач оптимізації з використанням роевих систем. Розглядається об'єкт управління як комплексна роева система, яка описується функціями взаємодії між часовими моментами, станами, управлінськими впливами та виходами. Структурно система представлена як інтеграція обчислювальних систем і включає канали сприйняття (входи) і передачі (виходи) інформації. Основна увага приділяється аналізу впливу інформаційних сигналів на поведінку системи, а також розробці моделей для оптимального управління на основі абстрактних інформаційних процесів. Досліджено модель керованої системи забезпечує збір, генерацію, обробку та редуплікацію інформації в контексті специфічних умов експлуатації, такі процеси моделюються через семантичні гіперграфи та інтеграцію елементарних підсистем з відповідними функціями згортки інформації, які детально описуються у статті. Дослідження також розглядає розробку еволюційного алгоритму для системи, що включає аналіз внутрішніх та зовнішніх інформаційних потоків, а також механізми впливу на поведінку системи. Результати моделювання дозволяють відображати динаміку станів системи та оптимізувати управлінські рішення на основі множини можливих стратегій. Стаття звертає увагу на важливість тимчасової логіки та нечітких моделей для забезпечення гнучкості та адаптивності роевих систем, зосереджуючись на формалізації відносин у системі через нечіткі відносини еквівалентності та часткового порядку. Описано використання ґрат та алгебраїчних систем для розробки структурної організації управління, що дозволяє ефективно моделювати роеві системи як інтегровані комплекси. Розробка методів для перевірки та валідації ефективності роевих алгоритмів в різноманітних задачах оптимізації, забезпечуючи їх надійність і відповідність. Стаття висвітлює потенційні напрямки для подальших досліджень, зокрема розробку нових методів для покращення алгоритмічної складності та застосування роевих та еволюційних алгоритмів у нових областях. Подальше інтегрування з машинним навчанням та іншими технологіями може забезпечити більшу адаптивність та ефективність роевих систем.

Ключові слова: роевий алгоритм, еволюційний алгоритм, оптимізаційна проблема, цільова функція, квадратична залежність, оператор кросовера, батьківська популяція.

1. Вступ. У сучасному світі, зі зростанням складності технологічних, економічних та соціальних систем, виникає потреба у розробці все більш ефективних методів оптимізації для вирішення складних проблемних завдань. Дворівневі задачі оптимізації, які містять взаємодію між двома рівнями прийняття рішень, є одними з найбільш відомих, оскільки вони вимагають одночасного розв'язання задач умовної оптимізації на кожному з рівнів. Традиційні методи оптимізації часто виявляються неефективними для роботи з такими задачами через їх високу обчислювальну складність та специфіку. Використання роєвого та еволюційного алгоритмів відкриває нові можливості для вирішення дворівневих задач оптимізації завдяки їх здатності ефективно працювати зі складними пошуковими просторами та адаптуватися до змінних умов задачі. Такі алгоритми засновані на моделюванні поведінки природних систем і демонструють високу ефективність у розв'язанні оптимізаційних задач, які важко піддаються традиційним методам і їхнє застосування може включати широкий спектр галузей, від інженерних розрахунків та проектування до економіки та управління.

Враховуючи актуальність питань оптимізації в сучасних дослідженнях та розвитку технологій, застосування роєвого та еволюційного алгоритмів для вирішення дворівневих задач оптимізації відкриває нові напрями у дослідженнях та практичному застосуванні, пропонуючи вдосконалені та ефективні рішення для складних системних завдань. Таким чином, розглядане дослідження є надзвичайно актуальним для подальшого розвитку наукових знань та їх практичної реалізації у різних галузях.

Метою дослідження є порівняльний аналіз ефективності роєвих та еволюційних алгоритмів у вирішенні прикладних завдань дворівневої оптимізації.

2. Постановка задачі. В роботі [9] зазначається, що в основі детермінованих евристичних методів оптимізації лежить принцип знаходження локально кращого рішення на кожному кроці. Пошук глобально кращого рішення забезпечується через вибір рішення, яке є найкращим на всіх ітераціях [16]. Рух простором пошуку здійснюється на підставі раніше зроблених виборів, а дії на наступних кроках не впливають на поточні, що відрізняє даних клас алгоритмів від динамічного програмування.

Розглянуті у роботі [13] алгоритми роєвого інтелекту та еволюційні алгоритми є алгоритмами дискретної оптимізації, оскільки здійснюють пошук кращого рішення інтерактивно. При цьому область використання цих методів включає як безперервні завдання, так і дискретні та гібридні. В основі цих алгоритмів лежать принципи та закономірності, що спостерігаються в природі. Вони належать до популяційних методів, оскільки використовують системи, які з агентів. У статті [11] запропоновано спосіб віднесення алгоритмів до роєвих: у формулах, що описують міграцію агентів рою, необхідна наявність об'єкта, який дає можливість непрямого обміну інформацією між ними.

У роботах [2], [8] описано основні етапи процесу оптимізації всіма популяційними алгоритмами. На першому етапі відбувається ініціалізація популяції. Вона полягає у створенні на просторі пошуку заданої кількості наближень до шуканого рішення. На другому етапі здійснюється міграція агентів популяції шляхом їх переміщення за допомогою набору специфічних міграційних операторів за простором рішень для наближення до екстремуму функції, що оптимізується. На етапі перевіряються умови припинення роботи алгоритму.

3. Основний результат. Складність вирішення дворівневих задач оптимізації може вимагати об'єднання безлічі обслуговуючих інформаційних підсистем, що забезпечують єдиний процес обробки. Будемо розглядати об'єкт управління як роєву систему, яка описується функцією виду:

$$\Theta = \langle S, A, B, C \rangle, \quad (1)$$

де S — безліч моментів часу, A — безліч станів роєвої системи, B — безліч миттєвих вхідних управлінь, C — безліч виходів роєвої системи. З метою побудови моделі керованої системи будемо розглядати вхідні впливи як канали сприйняття, а вихідні — в якості каналів передачі інформації про стан керованої системи. Крім того, дослідження раціонального впливу вимагає наявності певної моделі об'єкта управління, що дозволяє приймати рішення про вибір оптимального шляху, здатного наблизити об'єкт управління до поставленої мети (або повернути на задану траєкторію) [15]. Ця модель може бути описана різними відносинами у множинах S, A, B, C . Як показано в [3], процес може бути представлений сукупністю абстрактних елементарних актів: процес генерації інформації; процес реценції інформації; процес кодування інформації; процес передачі інформації по каналу зв'язку; процес зчитування та реалізації інформації; процес редуплікації за допомогою оператора при розв'язанні дворівневих задач оптимізації. Для можливості моделювання об'єкта управління з використанням абстрактних примітивів, визначимо типову потокову структуру кожного з них (рис. 1.).

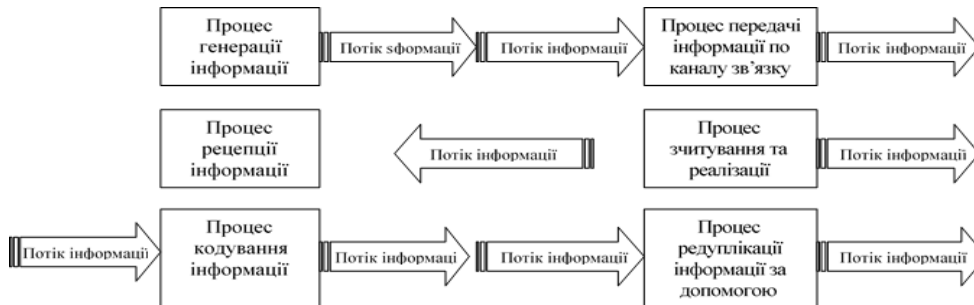


Рис. 1. Потокова структура типових інформаційних процесів в роєвих мережах при розв'язанні дворівневих задач оптимізації (сформовано на основі [3, 14]).

З огляду на специфіку об'єкта управління (частиною інформаційного процесу часто є система оперативного управління, необхідність побудови системи управління на верхньому рівні обумовлена вимогами інтеграції різнорідних обчислювальних систем і забезпечення структурного управління комплексом в цілому) і ієрархічність системи управління, крім функцій оперативного управління необхідна реалізація механізму комплексного оцінювання діяльності об'єкта управління, що формує і передає агрегований потік інформації [6]. Таким чином, система вирішення дворівневих задач оптимізації здатна генерувати два типи сигналів: управлінський вплив і інформаційний сигнал про стан об'єкта впливу. Будемо розглядати роєву мережу як сукупність спільно цілеспрямованих функціонуючих розподілених об'єктів, що можна описати видом:

$$\Omega = \langle X, Y, S \rangle, \quad (2)$$

де X, Y — безлічі вхідних і вихідних впливів, які є частиною універсуму; S — семантичний гіперграф, що інтерпретує структуру системи:

$$S = (S_N, R, p), \quad (3)$$

де $S_N = \{S_i\}^{i=\overline{1,N}}$ — безліч елементарних підсистем (N — потужність безлічі S_N), R — безліч типів з'єднання підсистем, p — предикат інцидентності, який визначається для пар (S_i, r) ($S_i \in S_N, r \in R$).

Елементарну підсистему визначимо у вигляді:

$$S_i = (X_i, Y_i, O_i, \sigma_i, f_i), \quad (4)$$

де X_i — безліч входів, Y_i — безліч виходів, O_i — інформаційний стан елементарної підсистеми, σ_i — вихідна функція; f_i — згортка інформації про стан об'єкта впливу.

Вихідна функція ($\sigma_i : O_i \times X_i \rightarrow Y_i$), що характеризує підсистему, визначається як композиція трьох відображень:

$$\varphi_1 : X_i \rightarrow O_i^B; \quad \varphi_2 : O_i^B \rightarrow O_i^U; \quad \varphi_3 : O_i^U \rightarrow Y_i. \quad (5)$$

Функція згортки інформації ($f_i : O_i \times X_i \rightarrow O_j$) задається подібним чином:

$$\psi_1 : O_i^B \rightarrow O_j^O; \quad \psi_2 : O_i^O \rightarrow Y_i. \quad (6)$$

Модель еволюційного алгоритму системи O_i включає три частини:

- 1) внутрішня інформація O^B — частина моделі предметної області, що відображає відомості системи про середовище, цілі, що характеризують можливості поведінки роєвої системи і її призначення. Кількість внутрішньої інформації визначає ступінь організованості роєвої системи, ступінь обмеження числа її незалежних станів;
- 2) відображає інформація O^O — відомості про систему і середовищі, що характеризують їх в кожен конкретний момент часу;
- 3) керуюча інформація O^U — сукупність відомостей, переданих від керуючої підсистеми до об'єкта управління і яка впливає на його поведінку.

Для відображення динаміки еволюційного алгоритму системи вирішення дворівневих задач оптимізації використовуємо тимчасову логіку з багатогілковим часом, яка дозволяє найбільш наочно відображати зміну станів роєвої системи та мотивований вибір варіантів реалізації керуючого впливу [7]. Тоді модель еволюційного алгоритму роєвої системи покажемо трійкою:

$$O = (W, R, P), \quad (7)$$

де W — безліч станів, R — відношення досяжності одного стану з іншого $R \subseteq W \times W$, P — функція призначення станів атомарних висловлювань (висловлювань пропозиціональної логіки).

Формалізм опису інтелектуальної багатоагентної роєвої системи при розв'язанні дворівневих задач оптимізації. При транспарентному відборі зі всієї безлічі роєвих систем перш за все відбираються ті, які відповідають одній і тій же сталій цілі або безлічі стратегічних цілей. Застосовуючи ці принципи до

етапу концептуального проектування роєвих систем, з урахуванням невизначеності як невід'ємної характеристики початкових етапів проектування, кожної з відібраних систем зіставляється нечітка характеристика ступеня відповідності поставленої мети.

Визначимо безліч X_Σ , елементами якого є всі можливі підсистеми розглянутої предметної області. Причому елементами безлічі X_Σ є не тільки окремі підсистеми, що представляють самостійну цінність, а й складові їх частини, що допускають розгляд в якості підсистем. Відзначимо, що наведене визначення безлічі X_Σ передбачає проектування на рівні систем і підсистем і одержувані результати мати узагальнений характер. Однак, сучасний рівень вирішення дворівневих задач оптимізації характеризується уніфікацією компонентів і інтерфейсів, модульною структурою створюваних систем (або компонентною структурою інформаційних систем), причому окремі модулі реалізують все більш складні функції [4].

Виділимо вихідне безліч систем $X \subseteq X_\Sigma$ з безлічі всіх можливих роєвих систем, якоюсь мірою відповідають поставленій меті. Визначимо на X безліч нечітких відносин еквівалентності \tilde{R} , Конкретні $\tilde{r}_i \subseteq \tilde{R}_i$ можуть характеризувати еквівалентність як по цілі підсистеми в цілому, так і відображати, наприклад, факт володіння підсистемами $x, y \subseteq X$ деяким загальним властивостям.

Під нечітким відношенням \tilde{r}_i на непорожню множину X будемо розуміти $\tilde{r}_i = (X, \tilde{R}_j)$, де \tilde{R}_j є нечіткою підмножиною декартова квадрата безлічі X . При цьому X називається областю завдання, \tilde{R}_i — нечітким графіком відносини. Носієм нечіткої відносини \tilde{r}_i , називається чітке ставлення $r_i = (X, r_r)$, у якого графік R_i є носієм графіка \tilde{R}_i . Для можливості зіставлення систем $x, y \subseteq X$ задамо безліч відносин часткового порядку P і нечіткого часткового порядку \tilde{P} . Нечітким відношенням часткового порядку називається нечітке відношення, носієм якого є чітке ставлення часткового порядку. При цьому нечітке відношення часткового порядку має такі властивості:

- 1) рефлексивність: $p_i(x, x) = 1$;
- 2) антисиметричність: $p_i(x_1, x_2) \succ 0 \rightarrow p_i(x_2, x_1) = 0$;
- 3) транзитивність: $p_i(x_1, x_3) \geq p_i(x_1, x_2) \wedge p_i(x_2, x_3)$.

Будемо використовувати термін «нечіткий простір систем» (Σ) для позначення підмножини X безлічі X_Σ всіх роєвих систем з заданими на ньому нечіткими відносинами еквівалентності та часткової впорядкованості, що мають поміж ознак систем загальну «головну мету системи»:

$$\Sigma = (X, \tilde{R}, \tilde{P}). \quad (8)$$

Відзначимо переконливі властивості відносин на Σ . Як було доведено, безліч чітких відносин еквівалентності R з заданим на ній частковим порядком $\leq (r_1 \leq r_2 \equiv x(r_1)y \rightarrow x(r_2)y)$ є повною структурою з одиницею, з чого можна зробити висновок, що \tilde{R} є нечіткою решіткою. Ця властивість нечітких відносин на нечіткому просторі систем дозволяє застосовувати до побудованих на його основі моделей роєвих систем, методи теорії алгебраїчних систем, однією з найбільш розвинених і опрацьованих з яких є теорія решіток. Представлення роєвої системи за допомогою нечіткої решітки дозволяє враховувати виникаючі процеси моделювання її невизначеності [10].

Процес проєктування тісно пов'язаний з аналізом і синтезом характеристик систем з X . Аналіз містить виявлення властивостей і параметрів систем для порівняння, тобто відображення безлічі елементів X на безліч характеристик або значень будь-якого функціоналу. Синтез — зворотне відображення безлічі бажаних властивостей системи в безліч X , при якому відбирається його підмножина, елементи якої володіють необхідними характеристиками. З метою формалізації даного факту розглянемо трійку:

$$(X, Y, \tilde{f}). \tag{9}$$

де $X \subseteq X_\Sigma, Y$ — безліч властивостей, якими можна характеризувати елементи X , \tilde{f} — двомісний нечіткий предикат інцидентності, властивий для всіх пар (x, y) ($x \in X, y \in Y$) і приймає значення в інтервалі $[0, 1]$, що характеризує ступінь володіння елемента властивістю y :

$$\tilde{f} : X \times Y \rightarrow [0; 1]. \tag{10}$$

До числа ознак можуть бути віднесені специфічні характеристики роєвих систем які виражають їх особливості:

- а) умови функціонування;
- б) рівень безпеки;
- с) вимоги щодо ресурсного забезпечення;
- д) інтелектуальне забезпечення;
- е) технологічна та комерційна досконалість [12].

З метою формалізації процесу синтезу структури роєвих систем з безлічі елементів X , припустимо, що всі типи вимог до проєктованої системи можуть бути виражені за допомогою єдиної ієрархії, утвореної символами — простими компонентами, з яких формуються складні організаційні зв'язки, тобто «Мова програмних висловлювань». Позначимо таку ієрархію:

$$\Xi = \{\xi_\alpha^0, \xi_\alpha^1, \dots, \xi_\alpha^k\}. \tag{11}$$

де ξ_α^i — її блок, кількість блоків k приймає кінцеве значення. Блок ξ в ієрархії це ланцюжок елементів ієрархії $\xi = \{\xi_\alpha^{k1}, \dots, \xi_\alpha^{ks}\}$. Передбачається, що всі блоки ієрархії не порівнюються відносно один одного, тобто один не впливає з іншого. Для підтвердження прийнятих припущень можна звернутися до формулювання мети на обмеженій природній мові, яка використовується в програмних середовищах, для якої характерним є обмежене використання таких лінгвістичних конструкцій, як референція та еліпсис, що робить її структуру близькою до лінійної [1]. Ієрархія Ξ являє собою універсальне безліч елементів, що виражають все властивості систем $x \in X$. На безлічі Ξ введемо операцію \oplus зчеплення елементів:

$$(\xi_{k1}, \xi_{k2}, \dots, \xi_{ks}) \oplus (\xi_{q1}, \xi_{q2}, \dots, \xi_{qr}) = (\xi_{k1}, \xi_{k2}, \dots, \xi_{ks}\xi_{q1}, \xi_{q2}, \dots, \xi_{qr}), \tag{12}$$

причому операція зчеплення має такі властивості:

1. Кожний елемент визначається зчепленням символів алфавіту.
2. Будь-які два символи або елементи можуть бути переставлені.
3. Символи та елементи мають властивість ідемпотентності.

4. Символ $\xi_\alpha = aim(x)$ — (головна мета системи) відіграє роль одиниці та володіння їм служить тут тривіальним висловлюванням, що не впливає на вигляд.

Безліч елементів, що виражають характеристики систем, разом з операцією зшивання перетворюють її на півгрупу:

$$\Omega = (\Xi, \oplus). \quad (13)$$

Його, ми пропонуємо називати простором образів систем, на якому можна ввести операцію часткового порядку:

$$(\xi_{k1}, \xi_{k2}, \dots, \xi_{ks}) \leq (\xi_{q1}, \xi_{q2}, \dots, \xi_{qr}), \quad (14)$$

якщо перший елемент є наслідком другого, тобто якщо існує елемент $\xi_{p1}, \dots, \xi_{pt}$ такий, що утворює $(\xi_{k1}, \xi_{k2}, \dots, \xi_{ks}) \leq (\xi_{q1}, \xi_{q2}, \dots, \xi_{qr})$, тобто більш вузький елемент покриває більший клас об'єктів, тоді як більш широкий елемент, шляхом введення додаткових ознак, звужує цей клас.

Пару (Σ, Ω) будемо називати реалізованою, якщо існує сюр'єктивне нечітке відображення:

$$X \xrightarrow{\tilde{\varphi}} \Xi. \quad (15)$$

Яке формує для в кожній роєвій системі $x \in X$ «елемент» $\xi \in \Xi$, що містить ознаки x і тільки їх. Під сюр'єктивним відображенням ρ безлічі A на B розуміється накладення безлічі A на безліч B , тобто таке відображення, для якого $\forall b \in B \exists a \in A \mid \rho(a)b$. Відображення $\tilde{\varphi}$ відповідає завданню аналізу властивостей системи. Властивість сюр'єктивності впливає зі змісту вирішення дворівневих задач оптимізації — не має сенсу вводити характеристики, якими не володіє аналізована роєва система.

Розглянемо зворотне відображення $\tilde{\varphi}^{-1} : \xi \rightarrow x$, яке здійснює зіставлення «елементу» $\xi \in \Xi$, системи $x \in X$, що реалізує ознаки, які укладені в «елементі» ξ . Назвемо дане відображення оператором проєктування. Нехай (Σ, Ω) — реалізована пара, тобто існує відображення φ . Відомо, що кожне сюр'єктивне відображення породжує еквівалентність — ядро відображення, при якому еквівалентні $x, y \in X$, для яких $\varphi(x) = \varphi(y)$. Розглянемо безліч X_ξ прообразів елементів $\xi \in \Xi$ при відображенні φ . В силу сюр'єктивності відображення φ безлічі $\xi \in \Xi$ не є пустими, не перетинаються і в сумі покривають весь простір X :

$$X = \bigcup_{\xi \in \Xi} X_\xi; \quad X_{\xi^1} \cap X_{\xi^2} = \emptyset \xi^1 \neq \xi^2. \quad (16)$$

Розбиття простору X на безлічі X_ξ відповідає еквівалентність, для якої безлічі X_ξ служать суміжними класами та назад. Оскільки Ξ є структурою, то часткова впорядкованість елементів $\xi \in \Xi \wedge$ може бути використана для визначення часткової впорядкованості суміжних класів на X щодо відносин еквівалентності:

$$\xi^1 \leq \xi^2 \rightarrow X_{\xi^1} \leq X_{\xi^2}. \quad (17)$$

Як доведено в [5], декомпозиція простору систем є ґратами щодо операцій перетину та об'єднання, де порядок заданий вкладенням множин. Представлений спосіб вирішення дворівневих задач оптимізації можна розглядати в якості

основи формалізації багатоагентного компонування при використанні роєвого та еволюційного алгоритму.

4. Висновки та перспективи подальших досліджень. Визначено, що рішення дворівневих оптимізаційних задач вимагає комплексної інтеграції різнорідних обчислювальних і інформаційних систем, що забезпечує ефективне управління і взаємодію всіх компонентів системи для досягнення загальної цілі. Подання об'єкта управління як роєвої системи дозволяє детально аналізувати його стани через визначення вхідних і вихідних впливів та їх взаємозв'язків, що сприяє побудові більш точних прогнозів поведінки системи.

Доведено, що використання еволюційних алгоритмів управління роєвими системами забезпечує адаптацію до змін у середовищі та здатність до самоорганізації, що є критичним для динамічних умов функціонування. Застосування концепції нечітких ієрархій та взаємозв'язків у системах управління дає можливість врахування невизначеності та складності у прийнятті рішень, що сприяє створенню гнучких і масштабованих роєвих систем. Обґрунтовано, що використання тимчасової логіки дозволяє аналізувати та прогнозувати зміни станів системи з часом, що покращує здатність системи адаптуватися і відповідати на змінні умови зовнішнього середовища. Визначення ключових підсистем і створення нечітких відносин в моделі дає змогу оптимізувати управління, вибираючи найбільш важливі елементи для досягнення загальної цілі системи.

Перспективи подальших досліджень можуть бути організовані навколо кількох основних напрямків:

- 1) Дослідження можуть бути спрямовані на розробку та впровадження нових, більш ефективних алгоритмічних стратегій для зниження обчислювальної складності роєвих алгоритмів;
- 2) Визначення нових областей, де роєві та еволюційні алгоритми можуть бути ефективно застосовані, такі як робототехніка, автоматизоване проектування, кібербезпека та інші комплексні системи, що вимагають високої адаптивності та швидкого реагування;
- 3) Інтеграція роєвих та еволюційних алгоритмів з іншими машинно-навчальними методами, як-от глибоке навчання, для створення гібридних інтелектуальних систем, що поєднують переваги різних підходів.

Список використаної літератури

1. Безклубенко І. С., Гегун 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, С. 81–86.
2. Горда О. В., Цюцюра С. В., Лященко Т. О. Cognitive elements of information environments. *Управління розвитком складних систем*. 2022. № 51. С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.49-57>
3. Гуляницький Л. Ф., Мулеса О. Ю. Прикладні методи комбінаторної оптимізації. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2016. 142 с.
4. Димова Г. О. Розробка моделі складання розкладу занять методом еволюційного пошуку. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 2. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.2.1>
5. Журавльов О., Лісковський Д. Методологія використання генетичного алгоритму для розв'язання містобудівних задач. *Містобудування та територіальне планування*. 2023. № 84. С. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.145-152>
6. Македон В. В., Михайленко О. Г. Управління внутрішніми інвестиційними проектами в регіональному промисловому кластері підприємств. *Підприємництво та інновації*. 2022. № 25. С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>

7. Олійник Д., Олійник Л. Про ефективність операторної модифікації генетичного алгоритму в задачах двовимірної оптимізації. *Грааль науки*. 2022. № 11. С. 221–229. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.24.12.2021.038>
8. Abu-Arquub O., Abo-Hammour Z., Momani Sh. Application of continuous genetic algorithm for nonlinear system of second-order boundary value problems. *Applied Mathematics and Information Sciences*. 2014. Vol. 8, No 1. P. 235–248.
9. Gan G., Ma Ch., Wu J. Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications. Philadelphia, Pennsylvania : SIAM, 2007. 455 p.
10. Korte B., Vygen J. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics). New York : Springer, 2018. 455 p.
11. La Torre D., Colapinto C., Durosini I., Triberti S. Team Formation for Human-Artificial Intelligence Collaboration in the Workplace: A Goal Programming Model to Foster Organizational Change. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2023. Vol. 70, No. 5. P. 1966–1976. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3077195>
12. Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. Vol. 29, No. 1. P. 73–91.
13. McAfee A., Brynjolfsson E. Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future. New York : W.W. Norton & Company, 2017. 340 p.
14. Molga M., Smutnicki C. Test functions for optimization need. 3 kwietnia, 2005. 43 p.
15. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 2021. Vol. 25, No. 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html> (дата звернення: 02.04.2024).
16. Yang X. S. Firefly algorithms for multimodal optimization. In *proceedings of the 5th Symposium on Stochastic Algorithms, Foundations and Applications*. 2009. P. 169–178.

Kyrylov S., Kyrylova L., Yuriy R. Application of the swarm and evolutionary algorithm for solving two-level optimization problems.

The article examines the complexity of solving two-level optimization problems using swarm systems. The object of management is considered as a complex swarm system, which is described by the functions of interaction between time points, states, management influences and outputs. Structurally, the system is presented as an integration of computer systems and includes channels for receiving (inputs) and transmitting (outputs) information. The main attention is paid to the analysis of the influence of information signals on the behavior of the system, as well as to the development of models for optimal control based on abstract information processes. The studied model of the controlled system provides collection, generation, processing and reduplication of information in the context of specific operating conditions, such processes are modeled through semantic hypergraphs and the integration of elementary subsystems with the corresponding functions of information convolution, which are described in detail in the article. The study also considers the development of an evolutionary algorithm for the system, which includes the analysis of internal and external information flows, as well as mechanisms of influence on the behavior of the system. The results of modeling allow to display the dynamics of system states and optimize management decisions based on a set of possible strategies. The paper draws attention to the importance of temporal logic and fuzzy models to ensure the flexibility and adaptability of swarm systems, focusing on the formalization of relations in the system through fuzzy relations of equivalence and partial order. The use of lattices and algebraic systems for the development of a structural management organization is described, which allows to effectively model swarm systems as integrated complexes. Development of methods for checking and validating the effectiveness of swarm algorithms in various optimization tasks, ensuring their reliability and compliance. The paper highlights potential directions for further research, including the development of new methods to improve algorithmic complexity and the application of swarm and evolutionary algorithms in new

domains. Further integration with machine learning and other technologies can provide greater adaptability and efficiency of control systems.

Keywords: swarm algorithm, evolutionary algorithm, optimization problem, objective function, quadratic dependence, crossover operator, parent population.

References

1. Bezklubenko, I. S., Getun, G. V., Balina, O. I., & Butsenko, Yu. P. (2022). Study of the properties of the set of effective criteria values in the engineering network optimization problem. *Management of the development of complex systems*, 51, 81–86 [in Ukrainian].
2. Gorda, O. V., Tsiucsyura, S. V., & Lyashchenko, T. O. (2022). Cognitive elements of information environments. *Management of the development of complex systems*, 51, 49–57. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.49-57> [in Ukrainian].
3. Hulianytskyi, L., & Mulesa, O. (2016). *Applied methods of combinatorial optimization*. Kyiv: VPTs “Kyivskyi universytet” [in Ukrainian].
4. Dymova, G. O. (2022). Development of a model for drawing up a class schedule by the evolutionary search method. *Taurian Scientific Bulletin. Series: Technical sciences*, 2, 3–9. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.2.1> [in Ukrainian].
5. Zhuravlov, O., & Liskovskyi, D. (2023). Methodology for using a genetic algorithm to solve urban planning problems. *Urban Development and Spatial Planning*, 84, 145–152. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.145-152> [in Ukrainian].
6. Makedon, V. V., & Mykhaylenko, O. H. (2022). Management of internal investment projects in the regional industrial cluster of enterprises. *Pidpryyemnytstvo ta innovatsiyi*, 25, 56–63. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9> [in Ukrainian].
7. Oliynyk, D., & Oliynyk, L. (2022). On the efficiency of operator modification of the genetic algorithm in two-dimensional optimization problems. *Grail of science*, 11, 221–229. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.24.12.2021.038> [in Ukrainian].
8. Abu-Arquab, O., Abo-Hammour, Z., & Momani, Sh. (2014). Application of continuous genetic algorithm for nonlinear system of second-order boundary value problems. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 8(1), 235–248.
9. Gan, G., Ma, Ch., & Wu, J. (2007). *Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications*. Philadelphia, Pennsylvania: SIAM.
10. Korte, B., & Vygen, J. (2018). *Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms (Algorithms and Combinatorics)*. New York: Springer.
11. La Torre, D., Colapinto, C., Durosini, I., & Triberti, S. (2023). Team Formation for Human-Artificial Intelligence Collaboration in the Workplace: A Goal Programming Model to Foster Organizational Change. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(5), 1966–1976. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3077195>
12. Makedon, V., Dzeveluk, A., Khaustova, Y., Bieliakova, O., & Nazarenko, I. (2021). Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 29(1), 73–91.
13. McAfee, A., & Brynjolfsson, E. (2017). *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. New York: W. W. Norton & Company.
14. Molga, M., & Smutnicki, C. (2005). *Test functions for optimization needs*. 3 kwietnia.
15. Shelukhin, M., Kupriichuk, V., Kyrylko, N., Makedon, V., & Chupryna, N. (2021). Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 25(6). Retrieved from <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html>
16. Yang, X. S., & Chen, J. (2007). Algorithm of Marriage in Honey Bees Optimization Based on the Wolf Pack Search. *In proceedings of the International Conference of Intelligent Pervasive Computing*, 462–467.

Одержано 18.04.2024