

УДК 519.854.2

МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ ВОВЧОЇ ЗГРАЇ ДЛЯ ЗАДАЧІ ДИНАМІЧНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ

Бабич С. О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, Київ

Проведено аналіз існуючі модифікації алгоритму вовчої зграї. Розроблено алгоритм вовчої зграї та модифікований алгоритм вовчої зграї для знаходження ефективного розв'язку задачі динамічного розподілу навантаження для замкнутої енергетичної системи, що складається із електростанцій та споживачів. Основною особливістю задачі є зміна попиту на електроенергію протягом дня. Описано перехід від задачі із обмеженнями, що характеризують фізичні та експлуатаційні характеристики електростанцій, до задачі без обмежень із використанням функцій штрафів. Проведено ряд експериментів із використанням розроблених алгоритмів та виконано аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: динамічний розподіл навантаження, алгоритм вовчої зграї, модифікація алгоритму вовчої зграї, ройовий інтелект, електроенергетика.

Бабич С. А. Модификации алгоритма волчьей стаи для задачи динамического распределения нагрузки / Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Проведен анализ существующих модификации алгоритма волчьей стаи. Разработан алгоритм волчьей стаи и модифицированный алгоритм волчьей стаи для нахождения

эффективного решения задачи динамического распределения нагрузки для замкнутой энергетической системы, состоящей из электростанций и потребителей. Основной особенностью задачи является изменение спроса на электроэнергию в течение дня. Описаны переход от задачи с ограничениями, характеризующие физические и эксплуатационные характеристики электростанций, в задачи без ограничений с использованием функций штрафов. Проведен ряд экспериментов с использованием разработанных алгоритмов и выполнен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: динамическое распределение нагрузки, алгоритм волчьей стаи, метод роя частиц, роевой интеллект, электроэнергетика.

S. Babych Improved Grey Wolf Optimization for Economic Load Dispatch Problem / National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The analysis of existing modifications of the grey wolf optimizer algorithms is carried out. The grey wolf optimizer and improved Grey Wolf Optimization is developed to solving the dynamic load dispatch problem for an isolated power system consisting of power stations and consumers are considered. The distinction of this task is moving during day power demand. The transition from a problem with constraints characterizing the physical and operational properties of power generators to a problem without ones but with the use of fines functions is described. A set of experiments are conducted on the use of developed algorithms and analysis of the obtained results is given.

Keywords: dynamic load dispatch, grey wolf optimizer, improved grey wolf optimizer, swarm intelligence, electric power industry.

Вступ. В процесі розробки сучасних інтелектуальних інформаційних систем особливу увагу приділяють використанню нових гібридних технологій, які дозволяють ефективно працювати над нечіткою або неповною інформацією в процесі прийняття рішення відносно задач оптимізації та управління. Це особливо актуально в високотехнологічних областях, наприклад, зв'язаних із впровадженням інформаційних, ядерних і нанотехнологій, нових систем автоматизації проектування та управління. У зв'язку із цим широкого застосування отримали стохастичні пошукові алгоритми оптимізації, які в різних публікаціях називаються поведінковими, інтелектуальними, мета евристичними, натхненними природою, ройовими, багатоагентними, популяційними і т.д. [1-3].

В 2014 році з'явився новий мета-евристичний алгоритм – алгоритм вовчої зграї (АВЗ), який ґрунтується на соціальній ієрархії та мисливській поведінці зграї сірих вовків [4]. Даний метод застосовують для розв'язання різноманітних задач таких як навчання нейронної мережі[5] та задачі економічного розподілу навантаження [6]. У роботі [7] запропоновано модифікацію АВЗ для задачі економічної відправки виходів. Автора статті зазначив, що метод оптимізації вовчою зграєю страждає від проблеми стагнації (застою) через менш ефективні глобальні оптимуми.

У даній статті запропонована нова модифікація алгоритму вовчої зграї для задачі динамічного розподілу навантаження.

Мета та завдання. Метою дослідження є розробка модифікації алгоритму вовчої зграї та порівняльний аналіз результатів відносно класичної реалізації при розв'язуванні задачі динамічного розподілу навантаження (ДРН).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- зробити аналіз задачі ДРН;
- розробити алгоритм АВЗ та модифікацію АВЗ для задачі ДРН;
- виконати аналіз результатів обчислювального експерименту.

Постановка задачі. Ціль задачі ДРН полягає у знаходженні мінімального значення робочої потужності для кожного генератора, враховуючи зміну попиту на електроенергію протягом дня [8]. Таким чином, задача з цільовою функцією, яка характеризуватиме вартість палива в у.о., виглядатиме наступним чином:

$$f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F_{ii}(P_{ii}) \rightarrow \min$$

(1)

де T – кількість запланованих періодів, N – кількість електростанцій, а $F_{ii}(P_{ii})$ – вартість палива, яке використовують для генерації робочої потужності P_i в момент часу t . Як правило, експлуатаційні втрати кожного генератора у (1) при генерації конкретної вихідної потужності моделюються як:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2,$$

де a_i, b_i, c_i – коефіцієнти витрат i -о генератора, P_i – це робоча потужність i -ї електростанції в МВт. Задача ДРН підпорядкована ряду обмежень. Ці обмеження поділяють на дві категорії:

1. Рівняння балансу:

$$\sum_{i=1}^N P_{ii} - P_{iD} - P_{iL} = 0,$$

де P_{iD} – загальний попит на електроенергію в момент часу t ; P_{iL} – втрати робочої потужності в момент часу t . Величина P_{iL} розраховується наступним чином:

$$P_{iL} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{ii} B_{ij} P_{jj} + \sum_{i=1}^n B_{i0} P_{ii} + B_{00},$$

де B_{ij} – i, j -й елемент квадратичної матриці коефіцієнтів втрат, що має розмірність $N \times N$, B_{i0} – i -й елемент вектора коефіцієнтів втрат, що має розмірність $1 \times N$, B_{00} – константа втрат.

2. Обмеження генерації робочої потужності:

$$P_i^{\min} \leq P_{ii} \leq P_i^{\max},$$

(2)

де P_i^{\min}, P_i^{\max} – це мінімальна та максимальна межі реальних робочих потужностей для i -ї електростанції.

3. Заборонені зони.

Через дію клапанів та вібрації в підшипниках розглядають діапазони значень робочої потужності, при яких робота генератора неможлива або завдає великих збитків. Ці діапазони називають забороненими зонами експлуатації. Практично найкраща економія досягається шляхом уникнення експлуатації в таких місцях протягом всієї операції. Робочі зони i -ї електростанції описуються так:

$$\begin{aligned} P_i^{\min} &\leq P_{ii} \leq P_{i,1}^u, \\ P_{i,j-1}^l &\leq P_{ii} \leq P_{i,j}^u, \\ P_{i,k}^l &\leq P_{ii} \leq P_i^{\max}, \\ j &= \overline{2, k} \end{aligned}$$

де l, u – нижня та верхня межі для j -ї робочої зони, а k – кількість робочих зон.

4. Обмеження швидкості зміни робочої потужності:

$$P_{ii} - P_{(t-1)i} \leq UR_i,$$

$$P_{(t-1)i} - P_{ii} \leq DR_i,$$

(3)

де UR_i та DR_i – це верхня та нижня межа різниці між потужностями в попередній та поточний періоди. Використовуючи обмеження генерації робочої потужності (2), обмеження (3) можна переписати наступним чином:

$$\max(P_i^{\min}, P_{(t-1)i} - DR_i) \leq P_{it} \leq \min(P_i^{\max}, P_{(t-1)i} + UR_i)$$

Класичний алгоритм вовчої зграї. Вовча зграя складається з пари ватажків, їх родичів, а також одиноких вовків [9]. В середині зграї спостерігається строго позначена ієрархія, на вершині якої знаходиться ватажок зграї, що направляє інших особин на пошук жертви. У популяції сірих вовків альфою вважають найкращий розв'язок задачі. Відповідно, другий найкращий розв'язок називають бетою, а третій – дельтою.

Метод оптимізації вовчою зграєю копіює процес полювання сірих вовків. Припустимо, що місцевість, на якій вовки полюють – це область допустимих значень, а зграя вовків – це набір розв'язків. Нехай згенеровано популяцію розмірністю M в евклідовому просторі розмірності N , тобто кожен розв'язок представлений у вигляді вектора $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN})$, що визначає його координати в просторі. Таким чином, зграя (популяція) являє собою безліч потенційних розв'язків, координати яких так само, як і для інших ройових алгоритмів [2], оновлюються на кожній ітерації, поки не буде знайдено ефективний розв'язок.

Поведінка навколишнього середовища моделюється наступним чином:

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} |\bar{C} \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t)|,$$

$$\bar{A} = 2\bar{a}r_1 - \bar{a},$$

$$\bar{C} = 2\bar{r}_2,$$

де \bar{X} – вектор координат розв’язку (омега вовк) на поточній ітерації t , \bar{X}_p – вектор координат одного із найкращих на поточній ітерації розв’язків $p \in \{\alpha, \beta, \delta\}$, \bar{A} – вектор соціальних коефіцієнтів, \bar{C} – вектор когнітивних коефіцієнтів, \bar{r}_1 та \bar{r}_2 – вектори випадкових величин рівномірно розподілений на проміжку $[0,1]$, \bar{a} – вектор, компоненти якого лінійно зменшуються від 2 до 0 протягом виконання алгоритму.

Наведемо схему роботи алгоритму вовчої зграї.

Крок 1. Генерація популяції. Для популяції розміру M компоненти розв’язку (робочі потужності) генеруються випадковим чином. Для N генераторів i -й розв’язок X_i для задачі ДРН – $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN^*})$, $N^* = 24N$ при умові, що генератор працює 24 години.

Крок 2. Для кожного розв’язку X_i^k скорегувати його положення :

$$X_{ij}^k = \begin{cases} X_{ij}^k, & \text{якщо } X_{ij}^k \in [P_i^{\min} \dots P_i^{\max}], \\ \text{rand}(P_i^{\min} \dots P_i^{\max}), & \text{якщо } X_{ij}^k \notin [P_i^{\min} \dots P_i^{\max}]. \end{cases}$$

Крок 3. Для кожного розв’язку X_i^k визначити значення цільової функції.

Крок 4. Відсортувати розв’язки у порядку зростання їх значень цільових функції. Присвоїти значення: $X_\alpha = X_1^k$, $X_\beta = X_2^k$, $X_\delta = X_3^k$.

Крок 5. Якщо досягнута максимальна кількість ітерацій – перейти до кроку 8.

Крок 6. Для кожного розв’язку (омега-вовки) $X_i^k, i = \overline{4, M}$, де M – кількість вовків. Визначити значення компонентів вектора розв’язку, використовуючи формулу:

$$\begin{aligned}\bar{X}_1 &= \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \left| \bar{C}_1 \bar{X}_\alpha - \bar{X}_i^k \right| \\ \bar{X}_2 &= \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \left| \bar{C}_2 \bar{X}_\beta - \bar{X}_i^k \right|, \\ \bar{X}_3 &= \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \left| \bar{C}_3 \bar{X}_\delta - \bar{X}_i^k \right| \\ \bar{X}_i^{k+1} &= \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3}.\end{aligned}$$

Крок 7. Перейти до кроку 2.

Крок 8. Повернути розв'язок альфа-вовка X_α як найкращий знайдений розв'язок.

Модифікація алгоритму вовчої зграї. Робота класичного АВЗ поділяється на дві стадії: пошуку та полювання (атаки здобичі) [4]. Перша стадія відповідає за глобальний пошук можливого оптимуму, другий же – за локальну оптимізацію. Після проведення дослідження особливостей роботи алгоритму вовчої при рішенні задачі ДРН, було виявлено важливу особливість – з огляду на велику кількість обмежень простір визначення цільової функції має велику кількість локальних оптимумів, через що алгоритм по завершенні першої стадії часто потрапляє в один із них і продовжує оптимізацію. Під час другого етапу отримати рішення, що істотно відрізнятиметься від домінуючих, неможливо, що значною мірою впливає на якість отриманого розв'язку. Для розв'язання даної проблеми у роботі [] запропоновано альтернативний спосіб визначення коефіцієнта соціальної складової, але цього не достатньо.

Як вже було описано, основною ідеєю вибору нових точок є поєднання впливу випадкової величини та існуючих трьох розв'язків, які із ростом кількості пройдених ітерацій збільшують свій вплив. Таким чином при переході до другого етапу усі згенеровані розв'язки будуть розміщені у околі домінуючих, і можлива область появи з кожною ітерацією звужуватиметься. У якості механізму виходу із локального оптимуму можна використати досить простий механізм –

частина зграї буде не наблизитись (атакувати) здобич а навпаки – віддаляться від неї (охороняти). Таким чином соціальна складова буде не звужувати область генерації нового розв'язку, а навпаки – віддаляти його від центру. Таким чином збільшується імовірність отримання нового локального оптимуму навіть під час другого етапу.

Підсумовуючи вищесказане, серед омега-вовків можна виділити дві групи – «мисливці» та «охоронці». Оскільки вони показують найгірші результати, вони будуть виконувати роль сторожі і досліджувати територію навколо зграї в пошуках нової здобичі.

Крок 1. Генерація популяції. Для популяції розміру M компоненти розв'язку (робочі потужності) генеруються випадковим чином. Для N генераторів i -й розв'язок X_i для задачі ДРН – $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN^*})$, $N^* = 24N$ при умові, що генератор працює 24 години.

Крок 2. Для кожного розв'язку X_i^k скорегувати його положення:

$$X_{ij}^k = \begin{cases} X_{ij}^k, & \text{якщо } X_{ij}^k \in [P_i^{\min} \dots P_i^{\max}] \\ \text{rand}(P_i^{\min} \dots P_i^{\max}), & \text{якщо } X_{ij}^k \notin [P_i^{\min} \dots P_i^{\max}] \end{cases}$$

Крок 3. Для кожного розв'язку X_i^k визначити цільову функцію.

Крок 4. Відсортувати розв'язки у порядку зростання їх значень фітнес-функції. Присвоїти значення:

$$X_\alpha = X_1^k, X_\beta = X_2^k, X_\delta = X_3^k.$$

Крок 5. Якщо досягнута максимальна кількість ітерацій – перейти до кроку 8.

Крок 6. Для кожного розв'язку вовка-мисливця $X_i^k, i = (\overline{4, Q})$, де $Q = 0,7(M - 3)$, потрібно:

6.1 Визначити значення компонентів вектора розв'язку, використовуючи формулу:

$$\begin{aligned}\bar{X}_1 &= \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \left| \bar{C}_1 \bar{X}_\alpha - \bar{X} \right| \\ \bar{X}_2 &= \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \left| \bar{C}_2 \bar{X}_\beta - \bar{X} \right| \\ \bar{X}_3 &= \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \left| \bar{C}_3 \bar{X}_\delta - \bar{X} \right| \\ \bar{X}(t+1) &= \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3}.\end{aligned}$$

Крок 7. Для кожного вівка-охоронця $X_i^k, i = (\overline{Q, M})$:

7.1 Визначити значення компонентів вектора розв'язку, використовуючи формулу:

$$\begin{aligned}\bar{X}_1 &= \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \left| \bar{C}_1 \bar{X}_\alpha - \frac{1}{2} \bar{X} \right| \\ \bar{X}_2 &= \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \left| \bar{C}_2 \bar{X}_\beta - \frac{1}{2} \bar{X} \right| \\ \bar{X}_3 &= \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \left| \bar{C}_3 \bar{X}_\delta - \frac{1}{2} \bar{X} \right| \\ \bar{X}(t+1) &= \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3}\end{aligned}$$

Крок 8. Перейти до кроку 2.

Крок 9. Повернути розв'язок альфа-вівка як найкращий знайдений розв'язок.

Результати експериментів. У якості вхідних даних було обрано задачу, наведену в [10]. Але оскільки там розглянуто ДРН, тому у якості значення загального попиту на електроенергію сформуємо такі модельні значення (таблиця 1), що відповідають попиту за кожну годину:

Таблиця 1.

Попит на електроенергію

Година	Попит	Година	Попит	Година	Попит	Година	Попит
1	1600	7	2700	13	1900	19	2630
2	1681	8	2690	14	2100	20	2930
3	1610	9	2000	15	2200	21	2830

4	1590	10	2100	16	2095	22	2730
5	1800	11	2010	17	2600	23	2230
6	2300	12	2100	18	2200	24	1890

Також у якості фітнес-функції, яка буде використана замість цільової функції при визначенні якості отриманого агентом розв'язку, використано таку:

$$f = \sum_{t=i}^T \sum_{i=1}^N F_{ii}(P_{ii}) + q_1 P_1 + q_2 P_2 + q_3 P_3 \rightarrow \min,$$

де $q_1 = 1$, $q_2 = 50$, $q_3 = 50$. Функція штрафу для рівняння балансу визначається наступним чином:

$$P_1 = \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{ii} - P_{UL} - P_{UD} \right)^2.$$

Визначимо функцію штрафу для обмеження заборонених зон:

$$P_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N V_{k,j},$$

де $V_{k,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P_{k,j} \text{ знаходиться в забороненій зоні,} \\ 0 & \text{в іншому разі.} \end{cases}$

Функція штрафу для обмеження швидкості зміни робочої потужності:

$$P_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N Q_{k,j},$$

де $Q_{k,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta P \text{ порушує задані обмеження} \\ 0 & \text{в іншому разі} \end{cases}$

Таке рішення дозволило перейти від розв'язування задачі із обмеженнями до задачі без обмежень визначеною цільовою функцією.

Проведено два обчислювальні експерименти: для дослідження тенденції зміни значення фітнес функції і цільової функції обох алгоритмів протягом процесу оптимізації та визначення

математичного сподівання значень цільової функції в точці розв'язку і їх дисперсії. Зауважимо, що для кожного тестового запуску було згенеровано нову популяцію.

Для проведення першого експерименту було виконано по 20 тестових запусків АВЗ та модифікації АВЗ. Значення фітнес-функції (рис.1) та цільової функції (рис. 2) на кожному кроці були усереднені. Необхідно відмітити, що значення цільової функції взяті за одну годину роботи генератора.



Рис. 1. Залежність значення фітнес-функції від обраної максимальної кількості ітерацій

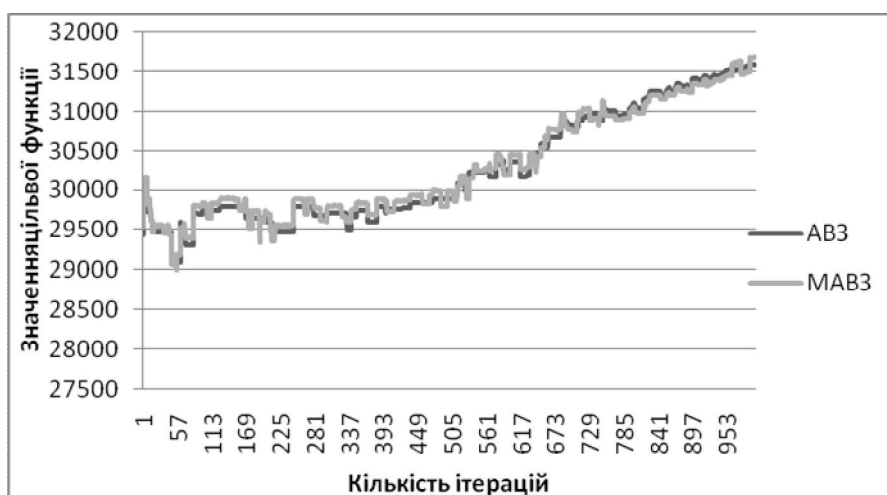


Рис. 2. Залежність значення цільової функції від обраної максимальної кількості ітерацій

Високі значення фітнес-функції демонструють присутність значного порушення обмежень задачі. Модифікації АВЗ вдається

швидше досягти ефективного розв'язку відносно класичного АВЗ, не затримуючись в локальних оптимумах.

Другий експеримент проводився із різними значеннями максимальної кількості ітерацій серед 100 тестових запусків. Результати наведені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Порівняння математичного сподівання та дисперсії

К-сть ітерацій	АВЗ		МАВЗ	
	Мат. сподівання значень ц.ф.	Дисперсія значень ц.ф.	Мат. сподівання значень ц.ф.	Дисперсія значень ц.ф.
100	31767,35	313,11	30570,71	202,5
250	30663,11	1172,15	30212,5	404,91
500	30061,90	1713,92	29987,81	639,38
1000	29757,96	2013,4	29654,34	654,9
2000	29607,20	2164,07	29598,12	714,35

Як можна побачити, математичне сподівання обох алгоритмів майже рівні. Модифікація АВЗ відрізняється своєю стійкістю, про що свідчить менше значення дисперсії.

Висновки. Провівши аналіз отриманих результатів, можна зробити висновок, що класичний АВЗ та модифікація АВЗ можуть бути застосовані для розв'язування практичних задач ДРН. При цьому, кожен із алгоритмів при завершенні своєї роботи має містити додатковий крок – «реанімація розв'язку». На цьому кроці потрібно перевірити чи отримані розв'язок задовольняє вхідним обмеженням і при необхідності доопрацювати його. Модифікований АВЗ продемонстрував знаходження більш точних значень як фітнес-функції, так і цільової функції.

Література:

1. Bonabeau E. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems* / E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz // OUP USA. – 1999. – P. 33-61.
2. Dorigo M. *Ant colony optimization* / M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle // *Computational Intelligence Magazine*. – 2006. – V. 1. – P. 28- 39.
3. Kennedy J. *Particle swarm optimization* / J. Kennedy, R. Eberhart // *IEEE International Conference*. – 1995. – P. 1942-1948.
4. Mirjalili S. *Grey Wolf Optimizer* / S. Mirjalili, M. Mirjalili, A. Lewis // *Advances in Engineering Software*. – 2014. –V. 69. – P. 46-61.
5. Mirjalili S. *How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons* / S. Mirjalili // *The International Journal of Artificial Intelligence, Neural Networks, and Complex Problem-Solving Technologies*. – 2015. – № 43. – P. 645.
6. Pradhan M. *Grey Wolf Optimization applied to economic load dispatch problems* / M. Pradhan, P. Kumar Roy, T. Paul // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2016. – V. 83. – P. 325-334.
7. Prashar S. *Formulation of improved grey wolf optimization methodology for EELD problem* / S. Prashar // *International Journal of Science Technology and Engineering* – 2016. – V.4. – № 5. – P. 23-31.
8. Balamurugan R. *An Improved Differential Evolution Based Dynamic Economic Dispatch with Nonsmooth Fuel Cost Function* / R. Balamurugan, S. Subramanian // *Electrical Systems*. – 2007. – № 3. – P. 151-161.
9. Muro C. *Wolf-pack (Canis lupus) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations* / C. Muro, R. Escobedo, L. Spector, R. Coppinger // *Behav Process*. – 2011. – № 88. – P. 192.

10. Kennedy J. *Particle Swarm Optimization* / J. Kennedy // *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. – 1995. – P. 1942-1948.