

11. *Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Modelirovanie adaptivnogo povedeniya muravinoy kolonii pri poiske resheniy, interpretiruemykh derevyami [Simulation of adaptive behavior ant colony to find solutions, interpreted trees], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 27-35.
12. *Dorigo M. and Stützle T.* Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge, MA, 2004.
13. *Lebedev O.B.* Modeli adaptivnogo povedeniya muravinoy kolonii v zadachakh proektirovaniya [Models of adaptive behavior of ant colonies in the design tasks]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013.
14. *Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Razbienie na osnove modelirovaniya adaptivnogo povedeniya biologicheskikh sistem [Split based on the simulation of adaptive behavior of biological systems], *Neurokompyutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: design, application], 2010, No. 2, pp. 28-34.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Ванидовский Владислав Андреевич** – Южный федеральный университет; e-mail: vanidovskiy.v.a@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89508575638; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Лебедев Олег Борисович** – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; тел.: 88634371743; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Vanidovsky Vladislav Andreevich** – Southern Federal University; e-mail: vanidovskiy.v.a@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508575638; the department of computer aided design; postgraduate student.

**Lebedev Oleg Borisovich** – e-mail: lebedev.ob@mail.ru; phone: +78634371743; the department of computer aided design; associate professor.

УДК 681.325

**Б.К. Лебедев, В.Б. Лебедев**

### **ГЛОБАЛЬНАЯ ТРАССИРОВКА МЕТОДОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РОССЫПИ АЛЬТЕРНАТИВ\***

*Предлагается метод и алгоритм глобальной трассировки на основе новой, предложенной авторами, парадигмы коллективного интеллекта – кристаллизации россыпи альтернатив (КРА). Решение задачи глобальной трассировки осуществляется на основе комбинаторного подхода. Наряду с метаэвристиками, на которых построены роевые алгоритмы, используется метаэвристика, имеющая тенденцию к использованию альтернатив (вариантов компонентов) из наилучших найденных решений. Сущность комбинаторного алгоритма заключается в том, что для каждой связывающей сети формируется набор вариантов ее построения. Целью задачи является нахождение на заданном наборе таких вариантов, которые обеспечивают наилучшее решение. В процессе эволюционной коллективной адаптации методами дискриминантного анализа формируются оценки приспособленности альтернатив. Приспособленность альтернатив рассматривается как вероятность ее использования в формируемом решении. Совокупность данных об альтернативах и их оценках составляет россыпь альтернатив. Дискриминантный анализ альтернатив в процессе эволюционной коллективной адаптации назван по аналогии с процессами вычленения объектов (формирования кристаллов) кристаллизацией. Другими словами, в процессе эволюционной коллективной адаптации производится вычленение из множества вариантов наиболее приспособленных альтернатив. Отсюда название метода оптимизации – метод кристаллизации россыпи альтернатив (КРА), (Crystallization of alternatives field*

\* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 13-01-00596).

(CAF). Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность предложенной парадигмы. По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов на 2–3 %.

*Глобальная трассировка; роевой интеллект; метод кристаллизации россыпи альтернатив; адаптивное поведение; оптимизация.*

**B.K. Lebedev, V.B. Lebedev**

### **GLOBAL ROUTING BY CRYSTALLIZATION OF ALTERNATIVES FIELD (CAF) METHOD**

*We propose a method and algorithm for global routing based on a new, proposed by the authors, the paradigm of collective intelligence - crystallization of alternatives field (CAF). Solution of the problem of global routing is based on a combinatorial approach. Along with metaheuristics, which built swarms algorithms used metaheuristics, which tends to use alternatives (options components) of the best solutions found. The essence of the combinatorial algorithm is that for each connecting network formed set of options for its implementation aim is to find the problem on a given set of options that provide the best solution. In the process of evolutionary collective adaptation by methods of discriminant analysis are generated estimates of fitness alternatives. Suitability of alternatives considered as the probability of its use in the generated solution. Collection of data on alternatives and their assessments of placer alternatives. Discriminant analysis of alternatives in the process of evolutionary adaptation collective named by analogy with the process of isolating objects (crystal formation) crystallization. In other words, in the process of evolutionary adaptation produced collective isolation of many variants of the fittest alternatives. Hence the name of the optimization method – (Crystallization of alternatives field (CAF). Experimental studies have confirmed the effectiveness of the proposed paradigm. Compared with existing algorithms to improve the results achieved by 2–3.*

*Global routing; swarm intelligence; ant colony; adaptive behavior; optimization.*

**Введение.** В связи с последними успехами в области КМОП технологий наблюдается резкое уменьшение физических размеров элементов СБИС. При этом задача трассировки становится все более сложной. Традиционно эта проблема разбивается на две части – глобальную [1, 2] и детальную трассировку [1–3].

Задача глобальной трассировки в общем случае состоит из предварительного этапа, заключающегося в разбиении общей области коммутационного поля (КП) на множество областей  $V=\{v_i/i=1, 2, \dots\}$ , разделенных границами  $B=\{b_j/j=1, 2, \dots\}$ , и основного этапа, заключающегося в распределении соединений по областям и определении наборов цепей на границах каждой области [4]. Пропускная способность границы является ресурсом, характеризующим максимально возможную суммарную ширину цепей, пересекающих эту границу [5].

Алгоритмы глобальной трассировки можно разбить на два класса: последовательный и комбинаторный [1, 2].

При последовательном подходе соединения строятся последовательно. Анализ существующих методов упорядочения показывает, что не существует радикального метода, гарантирующего оптимальную трассировку.

Сущность комбинаторных алгоритмов заключается в том, что для каждого соединения формируется набор вариантов его построения [6–10]. Цель задачи заключается в нахождении на заданном наборе таких вариантов, которые обеспечивают наилучшее решение. В последние годы интенсивно разрабатывается научное направление с названием «Природные вычисления» (Natural Computing), объединяющее математические методы, в которых заложены принципы природных механизмов принятия решений [6–10]. Одним из новых направлений таких методов являются мультиагентные методы интеллектуальной оптимизации, базирующиеся на моделировании коллективного интеллекта [9, 10]. Наряду с метаэвристиками,

на которых построены роевые алгоритмы [10–11], используется метаэвристика, имеющая тенденцию к использованию альтернатив (вариантов компонентов) из наилучших найденных решений. В процессе эволюционной коллективной адаптации методами дискриминантного анализа формируются оценки приспособленности альтернатив. Приспособленность альтернатив рассматривается как вероятность ее использования в формируемом решении. Совокупность данных об альтернативах и их оценках составляет **россыпь альтернатив**. Дискриминантный анализ альтернатив в процессе эволюционной коллективной адаптации назван по аналогии с процессами вычленения объектов (формирования кристаллов) кристаллизацией. Другими словами, в процессе эволюционной коллективной адаптации производится вычленение из множества вариантов наиболее приспособленных альтернатив. Отсюда название метода оптимизации – **метод кристаллизации россыпи альтернатив (КРА), (Crystallization of alternatives field (CAF))** [12].

В работе излагается алгоритм глобальной трассировки на основе метода кристаллизации россыпи альтернатив.

**Постановка задачи.** Для решения задачи распределения соединений по областям в качестве модели коммутационной среды (КС) используется граф  $G = (X, U)$ . Вершины графа  $x_i \in X$  соответствуют областям  $v_i \in V$ . Если две области  $v_i$  и  $v_j$  имеют общую границу  $b_k$ , то вершины  $x_i$  и  $x_j$ , соответствующие этим областям, связываются ребром  $u_k \in U$ . Для каждого ребра  $u_k$ , связывающего вершины  $x_i$  и  $x_j$ , задается вес  $\alpha_k$ , равный пропускной способности общей границы между областями, соответствующими вершинам  $x_i$  и  $x_j$ . Координатам вершины присваивается значения координат центра соответствующей области. Пусть задано множество цепей  $T = \{t_s | s = 1, 2, \dots, n_t\}$ . Для каждой цепи определяется множество областей КС, в которых существуют контакты, связываемые этой цепью. На графе  $G$  множеству областей, связываемых цепью  $t_s \in T$ , соответствует множество вершин  $X_s \in X$ ,  $n_s = |X_s|$ . Распределить цепь  $t_s$  по областям – это значит построить в графе  $G$  на множестве вершин  $X_s$  связывающую сеть. Каждая цепь  $t_s$  после ее реализации, т.е. распределения по областям, потребляет определенную часть ресурсов пересекаемых ее границ [7].

Решение задачи распределения соединений по областям комбинаторным методом включает два этапа.

На первом этапе для каждой цепи  $t_s \in T$  на множество вершин  $X_s \in X$  алгоритмом Прима строится минимальное связывающее дерево (МСД)  $D_s = \{d_{sl} | l = 1, 2, \dots, n_s - 1\}$ ;  $d_{sl} = (x_i, x_j)$  – ребро МСД. Каждая сеть  $e_s$  представляет совокупностью двухтерминальных соединений (ДС), т.е. соединений, связывающих два контакта. Каждое двухтерминальное соединение соответствует ребру  $d_{sl} = (x_i, x_j)$ . Назовем цепь в графе  $G = (X, U)$ , связывающую две основные вершины, 2-маршрутом. Для каждого ребра  $d_{sl}$  на графе  $G = (X, U)$  формируется набор  $C_{sl} = \Gamma(d_{sl})$  вариантов 2-маршрутов  $C_{sl} = \{c_{slk} | k = 1, 2, \dots, m\}$ .  $C_s = \{C_{sl} | l = 1, 2, \dots, n_s - 1\}$  – множество наборов 2-маршрутов для цепи  $t_s$ .  $C = \{C_s | s = 1, 2, \dots, n_t - 1\}$  – множество наборов 2-маршрутов для всех цепей.

Формирование  $C_s$  осуществляется исходя из следующих посылок: длина  $c_{slk}$  должна быть минимальна; варианты различных 2-маршрутов должны обеспечивать максимально возможное совпадение друг с другом [11]. Например: 2-маршруты, связывающие основные вершины  $v_i$  и  $v_j$  имеют вид:  $(v_i, 2, 1, 4, 7, v_j)$ ,  $(v_i, 2, 5, 8, 11, v_j)$ ,  $(v_i, 6, 9, 12, 11, v_j)$ ,  $(v_i, 6, 9, 8, 7, v_j)$  (рис. 1).

Задача построения каждой связывающей сети  $e_s$  сводится к задаче выбора  $(n_s - 1)$ -го 2-маршрута, причем, каждый маршрут  $c_{slk}$  соответствует ребру

$$d_{sl} = (x_i, x_j).$$

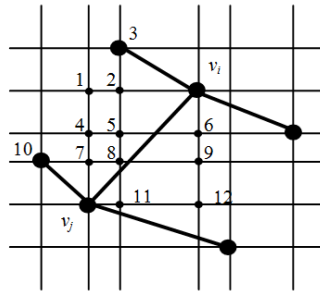


Рис. 1. Формирование маршрутов

Обозначим как  $D$  множество всех ребер все деревьев, построенных для множества цепей  $T$ . Тогда  $d_{sl} \in D$ ,  $D_s \subset D$ . Таким образом, при использовании комбинаторного подхода к глобальной трассировке изначально для каждого ребра  $d_{sl}$ , строится набор  $C_{sl} = \Gamma(d_{sl})$  альтернативных вариантов 2-маршрутов  $C_{sl} = \{c_{slk} / k = 1, 2, \dots, m\}$ .

На втором этапе глобальной трассировки для каждого ребра  $d_{sl} \in D$  осуществляется выбор 2-маршрута  $c_{slk} \in C_{sl}$ .

Выбор критерия оптимизации определяется следующими факторами.

Решение  $R$  должно удовлетворять ограничению на максимальную перегруженность. Пусть  $E_k \in E$  – множество связывающих сетей, построенных для множества цепей  $T_k \in T$ , в состав которых входит ребро  $u_k \in U$ . Обозначим через  $\beta_k$  сумму ресурсов, необходимых множеству связывающих сетей  $E_k$  для прохождения через ребро  $u_k$ . Другими словами, сумму ресурсов, необходимых цепям множества  $T_k$  для пересечения границы  $b_k$ :

$$\beta_k = \sum \varphi_s (s/t_s \in T_k), \text{ где } \varphi_s - \text{ ширина цепи } t_s.$$

Для каждого ребра  $u_k \in U$  графа  $G$  введен параметр  $w_k = \alpha_k - \beta_k$ , который назовем остатком ресурсов [7]. Введем функцию знака  $sign(w_k)$ :

$$sign(w_k) = +1, \text{ если } w_k > 0; sign(w_k) = 0, \text{ если } w_k = 0; sign(w_k) = -1, \text{ если } w_k < 0.$$

В качестве критерия оптимизации будем использовать величину:

$$F_1 = \sum_{k=1}^m sign(w_k) \cdot 1 \rightarrow \max. \quad (1)$$

Задача сводится к выбору такого допустимого распределения соединений по областям, при котором число границ  $b_j$ , чьих ресурсов недостаточно, минимально.

Найдем в графе  $G$  минимальное значение параметра  $w_k$  и обозначим его  $w_{min}$ , т.е.

$$w_{min} \rightarrow \forall_j [w_{min} \leq w_k].$$

Цель стандартного глобального трассировщика – максимизация параметра  $w_{min}$ . Действительно, чем больше остаток ресурсов, тем легче реализовать соединения при детальной трассировке, и неприемлемо отрицательное значение  $w_j$ .

В другой постановке задача представляется в виде:

$$F_2 = w_{min} \rightarrow \max. \quad (2)$$

**Механизмы глобальной трассировки на основе методе кристаллизации россыпи альтернатив.** В методе КРА [12] каждое решение формируется множеством агентов  $A = \{a_i / i = 1, 2, \dots, n_a\}$ . Каждому агенту  $a_i$  соответствует множество альтернативных состояний  $Q_i = \{q_{ij} / j = 1, 2, \dots, n_i\}$ . Каждый агент  $a_i$  может находиться в одном из альтернативных состояний. Решение  $R_k$  определяется совокупностью альтернативных состояний множества агентов. Обозначим как  $q_i^k$  альтернативное состояние агента  $a_i$  в решении  $R_k$ . Тогда  $R_k = \{q_i^k / i = 1, 2, \dots, n_a\}$ . Применение любой мета эвристики для решения комбинаторной задачи заключается в представлении исходной формулировки задачи в виде компонент мета эвристики. В рассмотренной задаче глобальной трассировки агентами являются ребра, а альтернативами – вари-

анты маршрутов. Другими словами множество агентов  $A=\{a_i|i=1, 2, \dots, n_a\}$ , соответствует множеству всех ребер всех деревьев, построенных для множества цепей  $T$ . Множество альтернативных состояний  $Q_i=\{q_{ij}|j=1,2,\dots,n_i\}$  агента  $a_i$  соответствует множеству альтернативных вариантов 2-маршрутов  $C_{sl}=\{c_{slk}|k=1, 2, \dots, m\}$  для ребра  $d_{sl}$ , соответствующего агенту  $a_i$ . Обозначим оценку решения  $R_k$ , как  $f_k$ .

Под *россыпью альтернатив* (РА) решения в работе называется структура данных, несущая информацию об альтернативах агентов в данном решении и об оценке этого решения. Алгоритм оперирует с множествами решений и реализует эволюционную стратегию случайного направленного поиска решения. В процессе поиска множество *оценки решений* трансформируется в *интегральные оценки альтернатив*. На каждом шаге в соответствии с интегральными оценками альтернатив производится генерация новых решений и пересчет интегральных оценок. При этом происходит рост оценок лучших альтернатив и снижение оценок худших альтернатив. Происходит процесс аналогичный кристаллизации. Лучшие альтернативы, обеспечивающие лучшие решения, как бы выкристаллизовываются (вычленяются) в процессе эволюционного поиска.

Представим решение  $R_k$  в виде совокупности векторов  $X_k=\{X_{ik}| i=1, 2, \dots, n_a\}$ , которую назовем россыпью альтернатив (РА). Каждый вектор  $X_{ik}=\{x_{ijk}| j=1,2,\dots,n_{si}\}$  соответствует агенту  $a_i$ . Размерность вектора  $X_{ik}$  определяется числом возможных состояний агента  $a_i$ . В векторе  $X_{ik}$  только один элемент  $x_{ijk}$ , соответствующий состоянию  $q_{ij}^k$ , в котором находится агент  $a_i$ , имеет значение, отличное от нуля, и это значение равно оценке  $f_k$  этого решения. Остальные элементы вектора  $X_{ik}$  имеют нулевые значения.

Таким образом, в векторе  $X_{ik}$  хранится информация о состоянии, реализованном агентом  $a_i$  в решении  $R_k$ , и об оценке  $f_k$  этого решения.

**Пример.** Решение  $R_k$  формируется четырьмя агентами. Агенты имеют 5 возможных состояний. В решении  $R_k$  агентами реализованы следующие состояния:  $a_1-2, a_2-5, a_3-4, a_4-1$ . Значение целевой функции  $f_k=7$ . Тогда россыпь альтернатив для решения  $R_k$  имеет вид, представленный на рис. 2.

$X_{1k}$	0	7	0	0	0
$X_{2k}$	0	0	0	0	7

$X_{3k}$	0	0	0	7	0
$X_{4k}$	7	0	0	0	0

Рис. 2. Россыпь альтернатив решения  $R_k$

#### **Алгоритм глобальной трассировки методом кристаллизации россыпи альтернатив.**

0. В соответствии со структурой КП строится его модель – граф  $G=(X, U)$ . Для каждого ребра  $u_k$  задается вес  $\alpha_k$ .

1. Для каждой цепи  $t_s \in T$ , на множестве связываемых ею вершин  $X_s \in X$  строится минимальное связывающее дерево  $D_s=\{d_{sl}|l=1, 2, \dots, n_s-1\}$ .

2. Для каждого ребра  $d_{sl}$  каждого дерева  $D_s$  строится набор  $C_{sl}$  альтернативных вариантов 2-маршрутов. Устанавливается соответствие между множеством агентов  $A$  и множеством всех ребер всех деревьев  $D$ , а также между состояниями агентов  $q_{ij}$  и альтернативными вариантами 2-маршрутов  $c_{slk}$ . Далее алгоритм оперирует с агентами и их состояниями.

3. Генерация начального множества решений  $|R|=n_0$  путем выбора агентами в каждом наборе  $Q_i$  случайным образом, альтернативы  $q_{ij}$ . Расчет оценок для всех решений множества  $R$ .

4. Сужение  $R$  до заданного размера  $RI$  путем отбрасывания худших решений. Определение у  $RI$  решения с лучшим значением оценки  $f^{\#}$  и с худшим значением  $f^0$ . Формирование россыпи альтернатив  $X_k$  для каждого решения множества  $RI$ .

5. Формирование интегральной россыпи альтернатив (ИРА)  $X^*I$  путем объединения всех россыпей альтернатив  $X_k$ .

5.1. Пусть агентом  $a_i$  альтернатива  $q_{ij}$  была выбрана в  $n_{ij}$  решениях множества  $RI$ . Если  $n_{ij} \neq 0$ , то элементы  $x^*_{ij}$  интегральной россыпи альтернатив  $X^* = \{X^*_{ij} | i=1, 2, \dots, n_a\}$ ,  $X^*_i = \{x^*_{ij} | j=1, 2, \dots, n_{si}\}$  принимают значения, вычисляемые по формуле

$$x^*_{ij} = \gamma \cdot (\sum_k x_{ijk}) / n_{ij}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – управляющий параметр, который подбирается экспериментально. Фактически  $x^*_{ij}$  является средним значением оценок решений, в которых агентом  $a_i$  была реализована альтернатива  $s_{ij}$ .

5.2. Если  $n_{ij} = 0$ , то производится коррекция (дополнение) ИРА. (Обоснование необходимости коррекции приведено ниже).

Выбирается параметр  $\pi$ , лежащий в границах  $f^0 \leq \pi \leq f^\#$ . Сущность коррекции заключается в том, что всем элементам  $x^*_{ij}$  ИРА, соответствующим альтернативам  $q_{ij}$  с нулевым значением  $n_{ij}$  присваивается значение  $\gamma \cdot \pi$ .

**Пример.** Построим ИРА множества решений  $RI = \{R_1, R_2, R_3\}$ . Агентами в каждом из решений реализованы следующие альтернативы.  $R_1: a_1 - 2, a_2 - 5, a_3 - 4, a_4 - 1$ .  $R_2: a_1 - 4, a_2 - 3, a_3 - 2, a_4 - 1$ .  $R_3: a_1 - 2, a_2 - 5, a_3 - 4, a_4 - 3$ .  $f_1 = 7, f_2 = 6, f_3 = 11$ . Россыпи альтернатив множества решений  $\{R_1, R_2, R_3\}$  представлены на рис. 3.

$X_{11}$	0	7	0	0	0	$X_{12}$	0	0	0	6	0	$X_{13}$	0	11	0	0	0
$X_{21}$	0	0	0	0	7	$X_{22}$	0	0	6	0	0	$X_{23}$	0	0	0	0	11
$X_{31}$	0	0	0	7	0	$X_{32}$	0	0	6	0	0	$X_{33}$	0	0	0	11	0
$X_{41}$	7	0	0	0	0	$X_{42}$	6	0	0	0	0	$X_{43}$	0	0	11	0	0

Рис. 3. Россыпи альтернатив решений  $\{R_1, R_2, R_3\}$

Производим коррекцию ИРА. Всем элементам с нулевым значением присваиваем значение  $\pi = 8$  (рис. 5). Первые пять пунктов составляют подготовительный этап работы алгоритма. Начиная с пункта 6, выполняется итерационная процедура эволюционного поиска решения.

6. Формирование распределения вероятностей выбора альтернатив агентами. Сущность этой операции заключается в том, что всем элементам  $x^*_{ij}$  интегральной россыпи альтернатив ставится в соответствие значение вероятности  $p_{ij}$  выбора агентом  $a_i$  состояния  $q_{ij}$ . Расчет вероятностей осуществляется по формуле:

$$p_{ij} = x^*_{ij} / (\sum_j x^*_{ij}). \quad (4)$$

Рассмотрим расчет вероятностей альтернатив для первого агента.

$$p_{11} = p_{13} = p_{15} = 8 / (8 + 9 + 8 + 6 + 8) = 8/39. \quad p_{12} = 9/39, \quad p_{14} = 6/39$$

$X^*_{1k}$	0	9	0	6	0	$X^*_{3k}$	0	6	0	9	0
$X^*_{2k}$	0	0	6	0	9	$X^*_{4k}$	6,5	0	11	0	0

Рис. 4. Интегральная россыпь альтернатив

$X^*_{1k}$	8	9	8	6	8	$X^*_{3k}$	8	6	8	9	8
$X^*_{2k}$	8	8	6	8	9	$X^*_{4k}$	6,5	8	11	8	8

Рис. 5. ИРА после коррекции

После расчета вероятностей альтернатив для остальных агентов нашего примера интегральная россыпь вероятностей альтернатив  $X^p$  примет вид, показанный на рис. 6.

Каждый вектор  $X^p_i$  является распределением вероятности выбора альтернативы агентом  $a_i$ .

$X^p_1$	8/39	9/39	8/39	6/39	8/39
$X^p_2$	<b>8/39</b>	8/39	6/39	8/39	9/39

$X^p_3$	8/39	6/39	839	9/39	8/39
$X^p_4$	6,5/41,5	8/41,5	11/41,5	8/41,5	8/41,5

Рис. 6. Интегральная россыпь вероятностей альтернатив

Вернемся к пояснению действий, производимых в пункте 5.2. После построения начальной ИРА отдельные элементы могут иметь нулевые значения. Это значит, что соответствующие им вероятности, рассчитываемые по формуле (4), будут иметь нулевые значения и соответствующие альтернативы будут исключены из рассмотрения в самом начале процесса поиска. Чтобы не допустить исключения альтернатив из рассмотрения, производится коррекция начальной ИРА, т.е. всем элементам с нулевым значением присваиваем значение  $\pi$ , лежащее в границах  $f^{\#} \leq \pi \leq f^{\#}$ .

7. На базе интегральной россыпи вероятностей альтернатив  $X^p$  формируется множество решений  $R2$ . Агентами выбираются альтернативы случайным образом, но в соответствии распределениями вероятностей, задаваемыми россыпью вероятностей альтернатив  $X^p$ .

8. Сужение  $R2$  до заданного размера, путем отбрасывания худших решений. Выбор лучшего решения среди множеств  $R1$  и  $R2$ . Если выполнено заданное число итераций, то переход к пункту 12, в противном случае переход к пункту 9.

9. Формирование россыпи альтернатив  $X_k$  для каждого решения множества  $R2$ . Формирование ИРА  $X^*2$ .

10. Объединение ИРА  $X^*1$  с ИРА  $X^*2$ .  $X^*1 = X^*1 \cup X^*2$ . Объединение производится по следующему правилу.

$$(x^*_{ij})I = ((x^*_{ij})I + (x^*_{ij})2)/2.$$

11. Производится уменьшение значений элементов ИРА по формуле

$$x^*_{ij} = \rho \cdot x^*_{ij},$$

где  $\rho$  – коэффициент обновления (0.93–0.99). Этот пункт (прием) приводит к ускоренному снижению оценок худших альтернатив, и, следовательно, к уменьшению вероятности выбора соответствующих им альтернатив. Переход к пункту 6.

12. Завершение работы алгоритма. Фиксация и вывод лучшего решения.

Экспериментальные исследования проводились на IBM PC Для анализа точности получаемых решений был синтезирован ряд примеров с априори известным оптимальным значением целевой функции. Исследованию подвергались примеры, содержащие до 1000 цепей. Вероятность получения оптимального решения составила 0.9.

Для испытания нашего алгоритма мы использовали бенчмарки, которые использовались на ISPD'07 для конкурсного тестирования. Полученные результаты сравнивались с результатами трассировщиков **MaizeRouter**, **BoxRouter** и **FGR**, показавших лучшие результаты на этих бенчмарках. На каждой из бенчмарок в среднем результаты были лучше на 2–5 %. Общая оценка временной сложности лежит в пределах  $O(n^2)$ – $O(n^3)$ .

**Заключение.** Использована новая парадигма мультиагентного метода интеллектуальной оптимизации, базирующаяся на моделировании коллективного интеллекта. Рассмотрены ключевые моменты анализа альтернатив в процессе эволюционной коллективной адаптации, названной по аналогии с процессами вычленения объектов (формирования кристаллов) кристаллизацией. Алгоритм на основе кристаллизации россыпи альтернатив был успешно применен для решения задачи глобальной трассировки.

Экспериментальные исследования показали, что алгоритмы на основе предлагаемого подхода могут давать лучшие результаты, чем при использовании методов пчелиной и муравьиной колоний по отдельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alpert C.J., Mehta D.P. and Sapatnekar S.S.* Handbook of Algorithms for Physical Design Automation. – Boston, MA: Auerbach, 2009.
2. *Ozidal M.M. and Wong M.D.F.* Archer: A history-driven global routing algorithm, in Proc. Int. Conf. Comput.-Aided Des, 2007. – P. 488-495.
3. *Курейчик В.М.* Особенности построения систем поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 92-290.
4. *Pan M. and Chu C.* FastRoute 2.0: A high-quality and efficient global router, in Proc. Asia South Pacific Des. Autom. Conf., 2007. – P. 250-255.
5. *Roy J.A. and Markov I.L.* High performance routing at the nanometer scale, in Proc. Int. Conf. Comput.-Aided Des., 2007. – P. 496-502.
6. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Моделирование адаптивного поведения муравьиной колонии при поиске решений, интерпретируемых деревьями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 27-34.
7. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Многослойная глобальная трассировка методом коллективной адаптации // V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2012». Сборник трудов. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 251-257.
8. *Курейчик В.М.* Исследования шаблонных решений в муравьиных алгоритмах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 17-22.
9. *Лебедев О.Б.* Трассировка в канале методом муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 46-52.
10. *Лебедев О.Б.* Модели адаптивного поведения муравьиной колонии в задачах проектирования. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 199 с.
11. *Лебедев Б.К., Лебедев В.Б.* Глобальная трассировка на основе роевого интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 32-39.
12. *Лебедев Б.К., Лебедев В.Б.* Оптимизация методом кристаллизации россыпи альтернатив // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 11-17.

REFERENCES

1. *Alpert C.J., Mehta D.P., and Sapatnekar S.S.*, Handbook of Algorithms for Physical Design Automation. Boston, MA: Auerbach, 2009.
2. *Ozidal M.M. and Wong M.D.F.* Archer: A history-driven global routing algorithm, in Proc. Int. Conf. Comput.-Aided Des, 2007, pp. 488-495.
3. *Kureychik V.M.* Osobennosti postroeniya sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Features of construction of systems of support of decision making], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 92-290.
4. *Pan M. and Chu C.* FastRoute 2.0: A high-quality and efficient global router, in Proc. Asia South Pacific Des. Autom. Conf., 2007, pp. 250-255.
5. *Roy J.A. and Markov I.L.* High performance routing at the nanometer scale, in Proc. Int. Conf. Comput.-Aided Des., 2007, pp. 496-502.
6. *Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Modelirovanie adaptivnogo povedeniya muravinoy kolonii pri poiske resheniy, interpretiruemykh derevyami [Simulation of adaptive behavior ant colony to find solutions, interpreted trees], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 7 (132), pp. 27-34.
7. *Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Mnogosloynaya globalnaya trassirovka metodom kolektivnoy adaptatsii [Multilayer global tracing method of collective adaptation], *V Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem - 2012». Sbornik trudov.* [V all-Russian scientific-technical conference "Problems of development of micro- and nanoelectronic systems - 2012". Proceedings]. Moscow: IPPM RAN, 2012, pp. 251-257.
8. *Kureychik V.M.* Issledovaniya shablonnykh resheniy v muravinykh algoritmax [Research template solutions in ant algorithms] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 17-22.
9. *Lebedev O.B.* Trassirovka v kanale metodom muravinoy kolonii [Tracing in the channel method ant colony], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 2 (91), pp. 46-52.



10. *Lebedev O.B.* Modeli adaptivnogo povedeniya muravinoy kolonii v zadachakh proektirovaniya [Models of adaptive behavior of ant colonies in the design tasks]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 199 p.
11. *Lebedev B.K., Lebedev V.B.* Globalnaya trassirovka na osnove roevogo intellekta [Global tracking based on swarm intelligence], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 32-39.
12. *Lebedev B.K., Lebedev V.B.* Optimizatsiya metodom kristallizatsii rossypi alternativ [Optimization method of crystallization placer alternatives], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 7 (144), pp. 11-17.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Лебедев Борис Константинович** – Южный федеральный университет; e-mail: lbk@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371743; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

**Лебедев Владимир Борисович** – e-mail: lebvlad@rambler.ru; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; доцент.

**Lebedev Boris Konstantinovich** – Southern Federal University; e-mail: lbk@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371743; the department of computer aided design; professor.

**Lebedev Vladimir Borisovich** – e-mail: lebvlad@rambler.ru; the department of system analysis and telecommunications; associate professor.