

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.47.4.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.013)

## Математическое обеспечение выбора направлений программы развития организационной системы на основе комбинации алгоритма рандомизированного поиска и генетического алгоритма с адаптацией

Д.В. Иванов✉, Я.Е. Львович

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,  
Российская Федерация*

**Резюме.** Статья посвящена разработке оптимизационного подхода к выбору направлений программы развития оптимизационной системы. Показано, что формализация процесса оптимального выбора управленческого решения при формировании программы развития приводит к модели многоальтернативной оптимизации. Решение оптимизационной задачи целесообразно осуществлять с применением направленного рандомизированного поиска. Однако в этом случае удастся только сформировать множество доминирующих вариантов, что требует для выбора окончательного варианта распределения объектов организационной системы между направлениями программы развития использования экспертного оценивания. Предполагается другой подход, основанный на комбинации алгоритма рандомизированного поиска и генетического алгоритма с адаптацией. С целью интеграции указанных алгоритмов в единую итерационную схему поиска оптимального решения, в первую очередь, обосновано условие перехода от первого итерационного процесса рандомизированного поиска к формированию популяции генетического алгоритма с элементами, соответствующими случайным значениям альтернативных переменных. Из этой популяции выбираются родители и осуществляется переход ко второму итерационному процессу вероятностного выбора наилучшего варианта сочетания схем скрещивания и размножения. Показано, что для коррекции вероятностных характеристик от одного итерационного процесса приемлем двухуровневый адаптивный алгоритм, использующий значения функции приспособленности, соответствующей структуре исходной оптимизационной задачи. Третий итерационный процесс направлен на включение в выбор элементов генетического алгоритма семи вариантов мутации. Показано, по какому условию осуществляется останов перечисленных процессов поиска для последующего выбора оптимального управленческого решения.

**Ключевые слова:** организационная система, программа развития, многоальтернативная оптимизация, рандомизированный поиск, генетический алгоритм, адаптация.

**Для цитирования:** Иванов Д.В., Львович Я.Е. Математическое обеспечение выбора направлений программы развития организационной системы на основе комбинации алгоритма рандомизированного поиска и генетического алгоритма с адаптацией. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1668> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.013

## Mathematical support for selecting directions for the development program of an organizational system based on a combination of a randomized search algorithm and a genetic algorithm with adaptation

D.V. Ivanov✉, Ya.E. Lvovich

*Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation*

**Abstract.** The article is devoted to the development of an optimization approach to the selection of directions for the optimization system development program. It is shown that the formalization of the process of optimal selection of a management decision when forming a development program leads to a model of multi-alternative optimization. It is advisable to implement the solution of the optimization problem using a directed randomized search. However, in this case it is only possible to form a set of dominant options, which requires the use of expert assessment to select the final option for distributing organizational system objects between the directions of the development program. Another approach is proposed based on a combination of a randomized search algorithm and a genetic algorithm with adaptation. In order to integrate these algorithms into a single iterative scheme for searching for an optimal solution, first of all, the condition for the transition from the first iterative process of a randomized search to the formation of a genetic algorithm population with elements corresponding to random values of alternative variables is substantiated. Parents are selected from this population and a transition to the second iterative process of probabilistic selection of the best option for combining crossbreeding and reproduction schemes is carried out. It is shown that a two-level adaptive algorithm using the values of the fitness function corresponding to the structure of the original optimization problem is acceptable for correcting the probability characteristics from one iteration process. The third iteration process is aimed at including seven mutation options in the selection of genetic algorithm elements. It is shown by what condition the listed search processes are stopped for the subsequent selection of the optimal management solution.

**Keywords:** organizational system, development program, multi-alternative optimization, randomized search, genetic algorithm, adaptation.

**For citation:** Ivanov D.V., Lvovich Ya.E. Mathematical support for selecting directions for the development program of an organizational system based on a combination of a randomized search algorithm and a genetic algorithm with adaptation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1668> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.013 (In Russ.).

## Введение

Базовым инструментом формирования программы развития организационной системы является программно-целевой подход, включающий в себя ряд этапов [1].

Один из этапов определяет взаимодействие управляющего центра организации и управленческих структур однородных по своей деятельности объектов с целью установления направлений программы развития объектов с учетом потребностей последних [2].

В работе [3] показано, что целесообразной является формализация задачи выбора инвестиций в соответствии с направлениями программы развития организационной системы как задачи многоальтернативной оптимизации [4] в следующей постановке:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I a_{in} z_{in} &\rightarrow \max_{z_{in}}, \\ \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I x_{in}^0 z_{in} &\leq X, \\ z_{in} &= \begin{cases} 1, & i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}, \\ 0, & \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, I}$  – нумерационное множество объектов организационной системы;  $n = \overline{1, N}$  – нумерационное множество направлений программы развития, установленное управляющим центром;  $a_{in}$  – коэффициенты значимости для развития  $i$ -го объекта инвестирования по  $n$ -му направлению;  $x_{in}^0$  – потребность в инвестиционном ресурсе  $i$ -го объекта по  $n$ -му направлению;  $X$  – интегральный объем инвестиционного ресурса, установленный управляющим центром;  $z_{in}$  – альтернативные переменные:

$$z_{in} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{й объект включен в программу развития для } n - \text{го направления,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Ряд других задач, связанных с оптимизацией инвестирования объектов организационной системы, так же формализуется как задачи многоальтернативной оптимизации [5, 6].

Для решения задач многоальтернативной оптимизации эффективным подходом является использование направленного рандомизированного поиска [7]. Итогом данного поиска является создание ряда наиболее подходящих решений, ориентируясь на экспертные данные. В [7] предлагается, прежде чем представить варианты экспертам, провести их предварительную агрегацию с помощью генетического алгоритма [8, 9].

В отличие от указанной процедуры агрегации предлагается погружение генетических преобразований в рандомизированную среду поискового алгоритма с адаптацией структурных компонентов [10].

В связи с возможностью построения адаптационного алгоритма целью статьи является разработка интегрированной алгоритмической процедуры, позволяющей в едином цикле итеративного процесса осуществлять поиск оптимального решения, совмещенный с выбором структуры генетического алгоритма.

Для реализации поставленной цели в данной работе решены две ключевые задачи:

1. Создание условий для интеграции рандомизированной схемы поиска с генетическим алгоритмом;
2. Адаптивный выбор структурных элементов для интегрированной алгоритмической процедуры.

### **Формирование условий интеграции рандомизированной схемы поиска и генетического алгоритма**

Задача оптимизации (1) основана на следующей рандомизированной схеме итерационной процедуры  $r_1$  адаптации вероятностных характеристик альтернативных переменных  $z_{in}$ :

$$P_{z_{in}}^{r_1+1} = P_{z_{in}}^{r_1} + \theta(\tilde{\Delta}[\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I a_{in} \tilde{z}_{in}^{r_1} + \lambda(x - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I x_{in}^0 \tilde{z}_{in}^{r_1})]), \quad (2)$$

где  $\tilde{\Delta}$  – случайная вариация оптимизированной функции, эквивалентной задаче оптимизации (1), вычисляемой как разность значений, определенных при фиксированных значениях  $\tilde{z}_{i_1 n_1}^{r_1} = 1$  и  $\tilde{z}_{i_1 n_1}^{r_1} = 0$  и случайных реализациях остальных переменных  $\tilde{z}_{in}^{r_1}$ ,  $i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}, i \neq i_1, n \neq n_1$ ;  $\theta$  – функция, зависящая от значения вариации  $\tilde{\Delta}$ , вычисляемая в соответствии с алгоритмом, который рассмотрен в [4, 7];  $P_{z_{in}}^{r_1+1}, P_{z_{in}}^{r_1}$  – вероятности принятия переменной  $z_{in}$  значения, равного 1 на  $(r_1+1)$ -й и  $r_1$ -й итерациях соответственно.

$$\tilde{z}_{in}^{r_1} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{z_{in}}^{r_1} \leq \xi, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\xi$  – последовательность случайных чисел, равномерно распределенных на интервалы  $[0,1]$ ;  $\lambda > 0$  – коэффициент, учитывающий влияние ограничения на достижение максимального значения целевой функции и задаваемый экспертом на первой итерации.

Начальные значения вероятностей события  $\tilde{z}_{in} = 1$  определяются на основе предположения о равномерном распределении (1):

$$P_{z_{in}}^1 = 0,5; p_n^1 = \frac{1}{N}, n = \overline{1, N}.$$

На основе N-релаксационного свойства сходимости [4] определим правило перехода от рандомизированной схемы поиска (2) к возможности использовать генетический алгоритм. Определим количество переменных  $M < I \times N$ , для которых вероятности удовлетворяют заданному условию:

$$\varepsilon \leq P_{Z_{i_n}^K} \leq 1 - \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon = 0,1 \div 0,2$  – устанавливается экспертным путем.

Вероятности (4) были получены в результате рандомизированного поиска на  $K$ -й итерации.

Определим следующее правило перехода, которое будет адекватно при достижении значительного числа переменных  $M$  из условия (4):

$$\frac{M}{I \times N} > 0,7 \div 0,8. \quad (5)$$

При выполнении правила (5) осуществляется переход к использованию генетического алгоритма. Для создания первого поколения потомков  $k_1 = 1$  на основании значений  $\tilde{Z}_{i_n}^K$ , определяемых по формуле (3), из популяции  $\Pi$  формируется репродуктивное множество мощностью  $|R| = 2$ . В это множество входят элементы  $s', s'' \in R$ , которые являются родителями. В отличие от стандартных схем генетических алгоритмов, случайный отбор элементов  $s', s''$  производится на основании случайных реализаций хромосомного набора согласно правилу (3) и вероятностям  $P_{Z_{i_n}^K}$ . В классических алгоритмах случайный выбор осуществляется с вероятностями, которые пропорциональны значениям функции приспособленности [8].

Следующее отличие заключается в адаптивном выборе схем скрещивания и размножения из множества доступных комбинаций вместо предварительного определения конкретных схем. При применении генетического алгоритма значение оптимизируемой функции, соответствующей задаче оптимизации (1), используется в качестве функции приспособленности для элементов  $s$ , содержащихся в популяции  $\Pi$ :

$$\mu(s(Z_{i_n}^K)) = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N c_{i_n} Z_{i_n} + \lambda(X - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I x_{i_n}^o Z_{i_n}). \quad (6)$$

Элемент  $s^*$   $k_1$ -го поколения потомков и соответствующие ему  $Z_{i_n}^*$ ,  $i_n = \overline{1, I_n}$ ,  $n = \overline{1, N}$  являются оптимальными и, соответственно, обеспечивают максимальное значение функции (6). При этом переход к формированию  $(k_1 + 1)$ -го поколения реализуется при выполнении следующего условия:

$$\max\{\mu(s''')\} \leq \max\{\mu(s'), \mu(s'')\}. \quad (7)$$

В случае невыполнения указанного условия в качестве оптимального решения принимается потомок  $s'''$ , принимающий наибольшее значение функции принадлежности.

### Адаптивный выбор структурных компонентов интегрированной алгоритмической процедуры

Выбор структурных компонентов будем осуществлять на множестве вариантов сочетания схем скрещивания и размножения генетического алгоритма [8].

Рассматриваются следующие схемы скрещивания: инбридинг, аутбридинг, положительное ассортативное скрещивание, отрицательное ассортативное скрещивание, селективное скрещивание; схемы размножения с тремя правилами, различающимися по характеру выбора и обмена элементами, являющимися потомками родительской пары [9].

С целью адаптивного выбора одного из возможных вариантов схем скрещивания и размножения, разнообразие которых позволяет создать 15 возможных сочетаний  $v = \overline{1,15}$ , заменим дискретное значение  $v = \overline{1,15}$  на случайную дискретную величину  $\tilde{v} = \overline{1,15}$  со следующим распределением вероятности:

$$P_v = P(\tilde{v} = v), v = \overline{1,15}. \quad (8)$$

Данный адаптивный выбор обеспечит формирование потомков  $s'''$  с максимальной функцией приспособленности  $\mu(s''')$ . Далее следует организовать итерационный цикл  $k_2 = 1, 2, 3, \dots$

Зададим начальные значения вероятностей (8):

$$P_v^1 = \frac{1}{15}, v = \overline{1,15}.$$

В соответствии с распределением (8) на  $k_2$ -й итерации следует выбрать случайное число  $\tilde{v} = v_1$  и определить максимальное значение функции приспособленности  $\max_{l_1=1, L_1} \{\mu_{l_1}(s'''(v_1))\}$ , которое соответствует наилучшему результату для потомков  $l_1 = \overline{1, L_1}$  при заданной схеме скрещивания и размножения, отраженной в номере  $v_1$ .

Аналогично адаптивному алгоритму, описанному в [11], установим значения вероятностей (8) на итерации  $(k_2 + 1)$ :

$$\begin{aligned} P_{v_1}^{k_2+1} &= \frac{P_{v_1}^{k_2} + \varepsilon^{k_2+1} \mu_{v_1}^{k_2}}{1 + \varepsilon^{k_2+1} \mu_{v_1}^{k_2}}, \\ P_v^{k_2+1} &= \frac{P_v^{k_2}}{1 + \varepsilon^{k_2+1} \mu_{v_1}^{k_2}}, \\ v &= \overline{1,15}, v \neq v_1, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_1^{k_2} &= \frac{\max_{l_1=1, L_1} \{\mu_{l_1}(s'''(v_1))\}}{\bar{\mu}}, \\ \bar{\mu} &= \frac{\sum_{l=1}^L \mu_l(Z_{in}^K)}{L}, \end{aligned}$$

$\varepsilon^{k_2+1}$  – величина шага изменения вероятностей (9),  $\varepsilon^1$  – задается экспертом при  $k_2 = 1$ ,

$$\varepsilon^{k_2+1} = \varepsilon^{k_2} \exp \left\{ \frac{1}{k_2} \text{sign}(\mu_1^{k_2} - \mu_1^{k_2-1}) \right\}. \quad (10)$$

Величина (10) увеличивается при условии  $(\mu_{v_1}^{k_2} - \mu_{v_1}^{k_2-1}) > 0$ , и уменьшается, когда  $(\mu_{v_1}^{k_2} - \mu_{v_1}^{k_2-1}) < 0$ . Таким образом, в первом случае вероятность  $P_{v_1}^{k_2+1}$  возрастает, что повышает приоритет варианта сочетания  $v_1$ .

Интегрируем подход, рассмотренный в исследовании [10], в схему адаптивного выбора сочетаний схем скрещивания и размножения (9), (10). Благодаря постоянной и адаптивной мутации, а также оценке сочетаний с вариантами скрещивания, появляется возможность изменения аллелей  $Z_{in}$  в одном или нескольких генах  $z_n$  элементов  $s'''$  в результате появления новых аллелей, которые ранее отсутствовали в соответствующих генах.

Зададим необходимое количество итераций  $K_2$  для настройки величин (9). Далее при  $k_2 = K_2$  определим значения:

$$P_{v_1}^{K_2}, \quad v_1 = \overline{1, 15}.$$

Отберем три значимых варианта с наибольшими значениями  $P_v^K$ , которые применимы для целенаправленного перебора сочетаний с вариантами мутации. По аналогии с работой [10] остановимся на семи вариантах: очень слабая постоянная мутация, слабая, средняя, сильная, очень сильная, а также два типа адаптивной мутации.

В результате имеем  $v_2 = \overline{1, 21}$  вариантов сочетаний схем скрещивания, размножения и мутации. Далее снова заменяем дискретную величину  $v_2 = \overline{1, 21}$  на случайную дискретную величину  $\tilde{v}_2 = \overline{1, 21}$  с распределением на первой итерации:

$$P_{v_2}^1 = \frac{1}{21}, \quad v_2 = \overline{1, 21}.$$

Организовав итеративный процесс  $k_3 = 1, 2, 3, \dots$  и осуществив изменение вероятностей на  $(k_3 + 1)$ -й итерации в соответствии с (9), (10) при выбранном значении случайного числа  $\tilde{v}_2 = v_3 \in \overline{1, 21}$ , получим:

$$\begin{aligned} P_{v_3}^{k_3+1} &= \frac{P_{v_3}^{k_3} + \varepsilon_1^{k_3+1} \mu_2^{k_3}}{1 + \varepsilon_1^{k_3+1} \mu_2^{k_3}}, \\ P_{v_2}^{k_3+1} &= \frac{P_{v_2}^{k_3}}{1 + \varepsilon_1^{k_3+1} \mu_2^{k_3}}, \\ v_2 &= \overline{1, 21}, v_2 \neq v_3, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\mu_2^{k_3} = \frac{\max_{l_2=\overline{1, L_2}} \{\mu_{l_2}(s'''(v_2))\}}{\bar{\mu}}$  – нормализованная максимальная приспособленность при  $l_2 = \overline{1, L_2}$  потомков при сочетании одного из вариантов схем скрещивания, размножений и одного из вариантов мутации:

$$\varepsilon_1^{k_3+1} = \varepsilon_1^{k_3} \exp \left\{ \frac{1}{k_3} \text{sign}(\mu_2^{k_3} - \mu_2^{k_3-1}) \right\}.$$

Останов итерационного процесса  $k_3$  осуществляется при  $k_3 = K_3$ . Далее выбирается вариант сочетания  $v_2^*$  с наибольшим значением вероятности из следующего набора:

$$P_1^K, \dots, P_{v_2}^K, \dots, P_{21}^K.$$

Из  $l_r = \overline{1, L_r}$  потомков в этом случае выбирается потомок  $l_r$  по условию

$$\max_{l_z=\overline{1, L_z}} \{\mu_{l_z}^K(s'''(v_2^*))\}. \quad (12)$$

Управленческим решением оптимизационной задачи (1) являются значения  $z_{l_n}^*$ , соответствующие условию (13) и потомку  $l_z^*$ .

### Заключение

Формализованное описание экстремальных и граничных требований к выбору направлений программы развития организационной системы определяет постановку задачи оптимизации в виде оптимизационной модели многоальтернативной оптимизации. Рассмотренным подходом к решению такого рода задач оптимизации



является направленный рандомизированный поиск с последующим экспертным оцениванием доминирующих вариантов.

С целью снижения влияния экспертных решений на принятие управленческого решения при формировании программы развития организационной системы целесообразна комбинация рандомизированного поиска и поиска с применением генетического алгоритма с адаптацией.

Переход между двумя процессами поиска осуществляется в соответствии с условиями, определяющими возможность формирования популяции особей, среди которых выбирается родительская пара.

Дальнейший поиск решения определяется дополнением к основному итерационному процессу рандомизированного поиска двух итерационных процессов; связанных с выбором компонентов генетического алгоритма. Эти процессы позволяют находить сочетание схем скрещивания и размножения, характеризующееся наилучшими значениями функции приспособленности потомков с последующим включением в полученные сочетания вариантов мутации. Останов перечисленных итерационных процессов осуществляется путем выбора потомка с максимальным значением функции приспособленности.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Плотников В.А., Федотова Г.В. Программно-целевой метод в управлении экономикой региона. *Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2013;(7):2–9.
2. Руткаускас Т.К. *Инвестиции и инвестиционная деятельность организаций*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2019. 316 с.
3. Борзова А.С., Иванов Д.В. Оптимизационное моделирование инвестиционного процесса развития отраслевой организационной системы гражданской авиации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.030>  
Borzova A.S., Ivanov D.V. Optimization modeling of the investment process for the development of the civil aviation sectoral organizational system. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.030>
4. Львович Я.Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения. Воронеж: Издательство «Квартет»; 2006. 415 с.
5. Львович Я.Е., Львович И.Я., Чопоров О.Н. и др. *Оптимизация цифрового управления в организационных системах*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2021. 191 с.
6. Анисимов Ю.П., Куксова И.В., Губертов Е.А., Жильников А.Ю., Иголкин И.С. Оптимизация потоков и инвестиционных ресурсов для развития инновационной деятельности на предприятии. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022;84(2):400–406. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-400-406>  
Anisimov Y.P., Kuksova I.V., Gubertov E.A., Zhilnikov A.Y., Igolkin I.S. Optimization of investment resource flows for the development of innovative activities at the enterprise. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022;84(2):400–406. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2022-2-400-406>
7. Львович И.Я. *Принятие решений на основе оптимизационных моделей и экспертной информации*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2023. 232 с.

8. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Генетические алгоритмы*. Москва: Физматлит; 2006. 320 с.
9. Батищев Д.И., Костюков В.Е., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. *Решение дискретных задач с помощью эволюционно-генетических алгоритмов*. Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; 2011. 199 с.
10. Волкова С.С., Семенкин Е.С. Исследование эффективности адаптивной мутации в генетических алгоритмах. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2012;1(8):291–293.
11. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. *Информационные технологии моделирования и оптимизации. Краткая теория и приложения*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2016. 444 с.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Иванов Денис Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Российская Федерация.

*e-mail:* [ivanov.sapris@mail.ru](mailto:ivanov.sapris@mail.ru)  
ORCID: [0009-0000-6690-8335](https://orcid.org/0009-0000-6690-8335)

**Denis V. Ivanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Львович Яков Евсеевич**, доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [d-lvovich@mail.ru](mailto:d-lvovich@mail.ru)  
ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

**Yakov E. Lvovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 16.10.2024; одобрена после рецензирования 30.10.2024; принята к публикации 05.11.2024.*

*The article was submitted 16.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 05.11.2024.*