

# УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

DOI: 10.25586/RNU.V9187.21.02.P.035

УДК 681.3

А.С. Борзова, Я.Е. Львович, В.В. Муха

---

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ГИБКОГО КЛАСТЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИФРОВЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ В ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

---

Предлагается оптимизационный подход к выбору структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе. Установлено, что многовариантность выбора является одной из характерных особенностей цифровизации логистического процесса. Разнообразие вариантов определяется структурой взаимодействия цифровых средств управления, используемых на уровне управляющего центра и объектов организационной системы. При этом возможны два фиксированных варианта структуры управления: централизованный и децентрализованный. Выявлено, что вариативность присуща кластерной структуре организации взаимодействия цифровых средств. Каждый вариант гибкого кластерного взаимодействия отличается значениями экономических, временных и надежностных показателей. Показано, что необходимость выбора наилучшего варианта приводит к бикритериальной оптимизационной модели с ограничениями на множестве альтернативных переменных. Сделан вывод, что для алгоритмизации принятия управленческого решения на основе построенных оптимизационных моделей целесообразно использовать трехуровневый итерационный процесс рандомизированного поиска, совмещенный с экспертным оцениванием на основе визуальных образов, по завершении которого осуществляется окончательный выбор структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе.

*Ключевые слова:* логистический процесс, организационная система, цифровое управление, оптимизация, рандомизированный поиск, визуальное экспертное оценивание.

A.S. Borzova, Ya.E. L'vovich, V.V. Mukha

---

## OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE CHOICE OF FLEXIBLE CLUSTER INTERACTION OF DIGITAL LOGISTIC PROCESS CONTROLS IN THE ORGANIZATIONAL SYSTEM

---

The article proposes an optimization approach to the choice of the structure of digital management of the logistics process in the organizational system. Multiple choice is one of the characteristic features of the digitalization of the logistics process. The variety of options is determined by the structure of the interaction of digital controls used at the level of the control center and objects of the organizational system. In this case, two fixed options for the management structure are possible. Centralized and decentralized. Variability is inherent in the cluster structure of organizing the interaction of digital means. Each version of flexible cluster interaction differs in the values of economic, time and reliability indicators. The need to choose the best option leads to a bicriteria optimization model with constraints on the set of alternative variables. For the algorithmization of management decision-making based on the constructed optimization models, it is advisable to use a three-level iterative process of randomized search, combined with expert assessment based on visual images. Upon completion of the iterative process, the final choice of the structure of digital management of the logistics process in the organizational system is carried out.

*Keywords:* logistic process, organizational system, digital control, optimization, randomized search, visual expert assessment.

**Борзова Анжела Сергеевна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры экономики и управления на воздушном транспорте Московского государственного технического университета гражданской авиации. Сфера научных интересов: технические науки, управление в социальных и экономических системах. Автор 33 опубликованных научных работ.

E-mail: a.borzova@mstuca.aero

**Львович Яков Евсеевич**

доктор технических наук, профессор, президент Воронежского института высоких технологий. Сфера научных интересов: математическое моделирование и многоальтернативная оптимизация сложных систем, управление в организационных, социальных и экономических системах. Автор 532 опубликованных научных работ.

E-mail: office@vivot.ru

**Муха Владимир Владимирович**

аспирант Воронежского государственного технического университета. Сфера научных интересов: системный анализ, управление и обработка информации. Автор 3 опубликованных научных работ.

E-mail: vladimirmyxa@gmail.com

*Вводные замечания*

Эффективность логистических процессов, связанных с управляемым перемещением результатов деятельности объектов организационной системы  $O_i, i = \overline{1, I}$ , существенным образом влияет на эффективность функционирования системы в целом [1]. В настоящее время повышение эффективности логистического процесса связывают с развитием цифровых средств, автоматически вырабатывающих управляющие воздействия на поток перемещаемых результатов деятельности, формирование и поддержку его движения [3, 8]. Благодаря цифровому управлению достигнут высокий уровень цифровой трансформации логистического процесса [2, 9].

В этом случае с использованием определенных цифровых средств синхронно осуществляется последовательная совокупность действий по перемещению материальных потоков и выполнению операций, отражающих это перемещение на уровне цифрового двойника. Поэтому эффективность управления логистическим процессом в организационной системе определяется структурой цифровой трансформации, обеспечивающей взаимодействие управляющего центра и объектов в рамках компонентов цифрового двойника.

В зависимости от структуры взаимодействия цифровых средств управляющего центра и объектов организационной системы меняются экономические, временные и надежные характеристики цифрового управления логистическим процессом. Разнообразие вариантов структуры приводит к необходимости оптимального выбора наилучшего решения на основе многовариантного моделирования влияния каждого варианта на указанные характеристики цифрового управления.

Оптимизация выбора структуры гибкого кластерного взаимодействия...

Целью работы является оптимальный выбор на множестве структурных решений путем многовариантного моделирования влияния этих решений на характеристики цифрового управления логистическим процессом в организационной системе.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) оптимизационное моделирование многовариантного выбора структуры цифрового управления логистическим процессом;
- 2) алгоритмизация принятия решения на основе оптимизационных моделей многовариантного выбора.

*Многовариантная оптимизационная модель выбора структуры цифрового управления логистическим процессом*

Многовариантность выбора определяется разнообразием структур взаимодействия цифровых средств управляющего центра и объектов организационной системы, влияющих на характеристики цифрового управления логистическим процессом. В [7] показано, что  $n = \overline{1, N}$  вариантов структуры образуются при разных типах такого взаимодействия: централизованное, децентрализованное, кластерное. Увеличению разнообразия способствует объединение цифровых средств управления перемещением результатов деятельности объектов организационной системы в некоторое число кластеров  $m$ ,  $m = \overline{1, M}$ , которым управляющий центр передает ряд функций управления.

Тогда общее количество вариантов  $N$  зависит от количества кластеров  $M$  и количества объектов  $O_m, i_m = \overline{1, I_m}$ ,  $\sum_{m=1}^M I_m = I$ , управление логическими процессами которых объединяется в кластер  $S_m$ . Фиксация определенного нумерационного множества вариантов  $n = \overline{1, N}$  позволяет поставить ему в соответствие нумерационное множество характеристик эффективности цифрового управления логистическим процессом  $j = \overline{1, J}$ , значения которых  $\Psi_j$  вычисляются для каждого  $n$ -го варианта:

$$\Psi_{jn} = \Psi_j(n), \quad j = \overline{1, J}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Среди  $n = \overline{1, N}$  два варианта –  $n_1$  и  $n_2$  – имеют фиксированную структуру взаимодействия цифровых средств управления логистическим процессом на уровне управляющего центра и объектов организационной системы:  $n_1$  – централизованная структура,  $n_2$  – децентрализованная структура. Остальные варианты –  $n = \overline{1, N}$ ,  $n \neq n_1$ ,  $n \neq n_2$  – предлагается формировать на основе гибкого кластерного взаимодействия цифровых средств, которое зависит, с одной стороны, от количества кластеров  $M$ , с другой – от распределения объектов, включаемых в  $m$ -й кластер множества  $i_m = \overline{1, I_m}$ .

Формализуем выбор структуры гибкого кластерного взаимодействия цифровых средств с использованием альтернативных переменных. В случае варьирования количеством кластеров запишем дискретное число  $M \leq 8$  в двоичной форме через альтернативные переменные [5] как

$$x_1 = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_2 = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_3 = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \\ M = x_1 + 2x_2 + 4x_3. \quad (2)$$

## Информационные технологии и оптимизация управления

Для определения объектов  $O_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ , управление логистическим процессом которых основано на объединении в  $m$ -й кластер, введем следующие переменные:

$$x_{im} = \begin{cases} 1, & \text{если цифровое средство управления} \\ & \text{логистическим процессом } i\text{-го объекта} \\ & \text{включается в } m\text{-й кластер,} \\ 0, & \text{в противном случае, } i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}. \end{cases} \quad (3)$$

Для формализованной постановки на множествах альтернативных переменных (1), (2) построим оптимизационную модель исходя из следующих предположений:

– для вариантов  $n = \overline{1, N}$ ,  $n \neq n_1$ ,  $n \neq n_2$  зависимости (1) преобразуются в зависимости

$$\Psi_j(x_1, x_2, x_3, x_{im}), \quad j = \overline{1, J}; \quad (4)$$

– на множестве  $j = \overline{1, J}$ , удастся выделить два основных противоречивых показателя –  $\Psi_{j_1}$  и  $\Psi_{j_2}$ , компромисс между которыми экспертам управляющего центра позволяет определить оптимальный вариант кластерной структуры;

– для остальных показателей –  $\Psi_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $j \neq j_1$ ,  $j \neq j_2$  – экспертами управляющего центра устанавливаются:

- либо фиксированные граничные требования

$$\Psi_j(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \leq \Psi_j^0, \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, j \neq j_2, \quad (5)$$

- либо вариативные

$$\Psi_j(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \leq \Psi_{l_j}^0, \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2, \quad l_j = \overline{1, L_j}, \quad (6)$$

где  $l_j = \overline{1, L_j}$  – нумерационное множество дискретных значений  $\Psi_j^0$  такое, что  $\Psi_j^0(l_j = 1) = \Psi_j^{\text{min}}$ , а  $\Psi_j^0(l_j = L_j) = \Psi_j^{\text{max}}$ .

В случае вариативных граничных требований (6) добавляются альтернативные переменные  $x_{1j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ ,  $x_{2j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ ,  $x_{3j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ , позволяющие представить значения  $l_j \leq 8$  в двоичной форме:

$$l_j = x_{1j} + 2x_{2j} + 4x_{3j}. \quad (7)$$

Разнообразие граничных требований приводит к двум видам оптимизационных моделей:

- при фиксированных граничных требованиях

$$\begin{aligned} & \Psi_{j_1}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \rightarrow \text{extr}, \Psi_{j_2}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \rightarrow \text{extr}, \\ & \Psi_j(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \leq \Psi_j^0, \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2, \\ & x_1 = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, x_2 = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, x_3 = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, x_{im} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \end{aligned} \quad (8)$$

Оптимизация выбора структуры гибкого кластерного взаимодействия...

– при вариативных граничных требованиях

$$\begin{aligned} & \Psi_{j_1}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \rightarrow extr, \quad \Psi_{j_2}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \rightarrow extr, \\ & \Psi_j(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \leq \Psi_j^0(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}), \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2, \\ & x_i = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_2 = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_3 = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_{im} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}, \\ & x_{1j} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_{2j} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad x_{3j} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2. \end{aligned} \tag{9}$$

Оптимизационные модели отражают многовариантный характер выбора гибкого кластерного взаимодействия цифровых средств при управлении логистическим процессом в организационной системе. При разработке алгоритма принятия управленческого решения на основе этих моделей следует учитывать многоальтернативность, бикритериальность и наличие ограничений. С этой целью предлагается совместить визуальные экспертные оценки и схемы рандомизированного поиска.

*Алгоритм принятия управленческого решения на основе оптимизационных моделей многовариантного выбора*

В качестве поискового механизма решения оптимизационных задач (8), (9), объединяющего учет многоальтернативности, бикритериальности и наличия ограничений, используем механизм рандомизации как оптимизируемых переменных (2), (3), так и нумерационных множеств критериев  $j_1, j_2$ , ограничений  $j = \overline{1, J}, j \neq j_1, j \neq j_2$  и в случае (9) – дополнительных оптимизируемых переменных (7).

Для формирования алгоритмического модуля первого итерационного процесса на множестве альтернативных переменных используем последовательности вычислений, приведенных в [6].

Отличие состоит в привлечении визуальной экспертной информации при определении начальных значений на первом шаге итерационного процесса  $k_1 = 1, 2, \dots$  оптимизируемых переменных (7). С этой целью предъявим эксперту графические образы изменения  $\Psi_j^0$  в виде отрезков  $[\Psi_j^{0min}, \Psi_j^{0max}]$ , на которых нанесены точки со значениями показателей  $\Psi_{lj}^0$  и номером точки  $l_j = \overline{2, L_j} = 1$ .

Свое мнение о желаемом уровне выполнения граничного условия (6) по показателю  $\Psi_j$  эксперт с предполагаемой им вероятностью  $P_j^0$  указывает точкой на отрезке с номером  $l_j^0$ .

Тогда начальные значения оптимизируемых переменных устанавливаются из соотношения

$$x_{1j}^1 + 2x_{2j}^1 + 4x_{3j}^1 = l_j^0, \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, j \neq j_2. \tag{10}$$

Но поскольку поиск осуществляется на множестве рандомизированных переменных  $\tilde{x}_{1j}, \tilde{x}_{2j}, \tilde{x}_{3j}$  с распределением

$$\begin{aligned} P(\tilde{x}_{1j} = 1) &= Px_{1j}, & P(\tilde{x}_{1j} = 0) &= qx_{1j} = 1 - Px_{1j}; \\ P(\tilde{x}_{2j} = 1) &= Px_{2j}, & P(\tilde{x}_{2j} = 0) &= qx_{2j} = 1 - Px_{2j}; \\ P(\tilde{x}_{3j} = 1) &= Px_{3j}, & P(\tilde{x}_{3j} = 0) &= qx_{3j} = 1 - Px_{3j}, \end{aligned} \quad ;$$

где  $P$  – обозначение вероятности альтернативного события, то

## Информационные технологии и оптимизация управления

$$\begin{aligned}
 Px_{1j}^1 &= \begin{cases} P_j^3, & \text{если в соответствии с (10) } x_{1j}^1 = 1, \\ 1 - P_j^3, & \text{если в соответствии с (10) } x_{1j}^1 = 0; \end{cases} \\
 Px_{2j}^1 &= \begin{cases} P_j^3, & \text{если в соответствии с (10) } x_{2j}^1 = 1, \\ 1 - P_j^3, & \text{если в соответствии с (10) } x_{2j}^1 = 0; \end{cases} \\
 Px_{3j}^1 &= \begin{cases} P_j^3, & \text{если в соответствии с (10) } x_{3j}^1 = 1, \\ 1 - P_j^3, & \text{если в соответствии с (10) } x_{3j}^1 = 0; \end{cases}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Условие останова также формируется на основе визуальных оценок эксперта, который указывает на отрезке изменения вероятностей оптимизируемых переменных  $[0,1]$  окрестность  $\varepsilon' > 0$  точки «1», достаточную для принятия альтернативной переменной значения 1, и окрестность  $\varepsilon'' > 0$  точки «0», достаточную для принятия альтернативной переменной значения 0. Останов первого итерационного процесса осуществляется при  $k_1 = K_1$ , если выполняется одно из условий для каждой альтернативной переменной  $x$ :

$$P_x^{K_1} \geq 1 - \varepsilon' \tag{12}$$

$$P_x^{K_1} \leq \varepsilon''. \tag{13}$$

В случае выполнения условия (12) оптимальное решение  $x^* = 1$ , а условия (13) –  $x^* = 0$ .

Модуль учета бикритериальности предлагается построить с использованием визуальной экспертной информации, основанной на графическом образе представления соотношения вероятностей привлечения к поиску критериев  $\Psi_{j_1}, \Psi_{j_2}$

$$P_{j_1} = P(\tilde{J} = j_1), P_{j_2} = P(\tilde{J} = j_2), P_{j_1} + P_{j_2} = 1$$

в виде отрезка на плоскости с координатами  $(P_{j_1}, P_{j_2})$ , соединяющего точки  $(P_{j_1} = 1, P_{j_2} = 0)$  и  $(P_{j_1} = 0, P_{j_2} = 1)$ , с определенным его разбиением на  $2B$  равных частей. Каждой из этих частей присваивается номер  $b = \overline{1, B}$ , причем все части, лежащие выше точки с координатами  $(0,5; 0,5)$ , пронумерованы положительными числами  $1, 2, \dots, B$ , а части, лежащие ниже этой точки, – отрицательными числами  $-1, -2, \dots, -B$ .

Организуется второй итерационный процесс  $k_2 = 1, 2, \dots$ .

На  $k_2$ -й итерации с использованием первого итерационного процесса решается одна из задач (8), (9), в которой критерий оптимизации вычисляется на основе

$$\Psi(x_1, x_2, x_3, x_{im}) = P_{j_1}^{k_1} \Psi_{j_1}^{k_1}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) + P_{j_2}^{k_1} \Psi_{j_2}^{k_1}(x_1, x_2, x_{im}) \rightarrow \text{extr.}$$

Определяются значения оптимизируемых переменных  $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*$  и вычисляются

$$\Psi_{j_1}^{k_2}(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*), \Psi_{j_2}^{k_2}(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*).$$

Эксперт дает визуальную оценку степени неравнозначности влияния критериев  $\Psi_{j_1}^{k_1}, \Psi_{j_2}^{k_1}$  на поиск оптимального управленческого решения (равнозначное влияние принимается на первой итерации  $(P_{j_1}^1 = 0,5, P_{j_2}^1 = 0,5)$ ). Если эксперт указывает точку с номером  $b_1^{k_2}$ , значения вероятностей корректируются для  $(k_1 + 1)$ -й итерации

Оптимизация выбора структуры гибкого кластерного взаимодействия...

$$P_{j_1}^{k_2+1} = \frac{P_{j_1}^{k_2} + \beta^{k_2+1} \frac{b_1^{k_2}}{B}}{1 + \beta^{k_2+1} \frac{b_1^{k_2}}{B}}, \quad P_{j_2}^{k_2+1} = 1 - P_{j_1}^{k_2+1},$$

где  $\beta$  – величина шага изменения значения вероятности

$$\beta^{k_2+1} = \beta^{k_2} \exp \left[ \frac{1}{k_2} \text{sign}(b_1^{k_2-1} b_1^{k_2}) \right].$$

В случае положительного значения  $b_1^{k_2} > 0$  вероятность значимости критерия  $\Psi_{j_1}$  увеличивается, а критерия  $\Psi_{j_2}$  – уменьшается; при  $b_1^{k_2} < 0$  вероятность значимости критерия  $\Psi_{j_1}$  уменьшается, а критерия  $\Psi_{j_2}$  – увеличивается. Для изменения величины шага учитываются визуальные оценки экспертов на двух соседних итерациях.

Если на  $K_2$ -й итерации выполняются условия

$$|P_{j_1}^{K_2} - P_{j_1}^{K_2-1}| < \delta, \quad |P_{j_2}^{K_2} - P_{j_2}^{K_2-1}| < \delta,$$

где  $\delta > 0$  – малое число, то окончательное управленческое решение определяется на основе решения одной из задач (8), (9), в которых критерии оптимизации

$$\Psi^{K_2}(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*) = P_{j_1}^{K_2} \Psi_{j_1}^{K_2} + P_{j_2}^{K_2} \Psi_{j_2}^{K_2}.$$

Для учета граничных требований в задачах (8), (9) организуем третий итерационный процесс  $k_3 = 1, 2, \dots$

После реализации второго итерационного процесса эквивалентную оптимизируемую функцию задачи (8) запишем в следующем виде [8]:

$$\begin{aligned} \Psi(x_1, x_2, x_3, x_{im}) &= P_{j_1}^{K_2} \Psi_{j_1}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) + \\ &+ P_{j_2}^{K_2} \Psi_{j_2}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1 \\ j \neq j_2}}^J y_j (\Psi_j^0 - \Psi_j(x_1, x_2, x_3)), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $y_j \geq 0$  – штрафные коэффициенты.

Введем дискретную случайную величину  $\tilde{j}$  с распределением

$$P_j = P(\tilde{j} = j), \quad j = \overline{J, 0}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2, \quad \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq j_1 \\ j \neq j_2}}^J P_j = 1.$$

Значение  $j = 0$  означает, что задача (8) решается без учета ограничений,  $j = 1$  – с учетом первого ограничения, и так далее. Начальные условия поиска при  $k_3 = 1$

$$P_j^1 = \frac{1}{J-1}, \quad j = \overline{J, 0}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2. \quad (15)$$

В знаменателе (14)  $J - 1$ , поскольку из всех  $J$  показателей два не участвуют в определении граничных требований, а при решении задачи (14) вводится новая ситуация, когда ограничения не учитываются.

## Информационные технологии и оптимизация управления

Пусть на  $k_3$ -й итерации при значениях  $P_j = P_j^{k_3}$  генерируется случайное число  $\tilde{f}_1$ , что соответствует виду оптимизируемой функции (14) при определенных значениях  $y_j^{k_3}$ . С использованием первого итерационного процесса решается (13) и определяются:

$$x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*;$$

$$\Psi_j^{k_3} = \Psi_j(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*), \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2.$$

Для  $(k_3 + 1)$ -й итерации корректируются значения

$$y_j^{k_3+1} = \begin{cases} \max\{\delta, y_j^k - \gamma(\Psi_j^0 - \Psi_j^{k_3})\}, & \text{если } j = j_1, \\ y_j^{k_3}, & \text{если } j \neq j_1, j = \overline{1, J}; \end{cases} \quad (16)$$

$$P_o^{k_3+1} = \frac{1}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1 \\ j \neq j_2}}^J y_j^{k_3}}, \quad P_j^{k_3+1} = \frac{y_j^{k_3}}{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1 \\ j \neq j_2}}^J y_j^{k_3}}, \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2, \quad (17)$$

где пороговое значение  $\delta > 0$ , близкое к 0, и величина шага  $\gamma$  выбираются экспертом на первом шаге.

В случае оптимизационной модели (9) эквивалентная оптимизируемая функция имеет вид [4]

$$\begin{aligned} \Psi(x_1, x_2, x_3, x_{im}, x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}) = & P_{j_1}^{K_2} \Psi_{j_1}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) + P_{j_2}^{K_2} \Psi_{j_2}(x_1, x_2, x_3, x_{im}) + \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1 \\ j \neq j_2}}^J y_j \left[ \left( \Psi_j^0(x_1, x_2, x_3) - \Psi_j(x_1, x_2, x_3, x_{im}) \right) \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда третий итерационный процесс необходимо совместить с первым итерационным процессом отдельно по группе переменных  $x_1, x_2, x_3, x_{im}$  и другой группе  $x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}$ .

После определения по  $K_1$ -й итерации, соответственно,  $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*$  и  $x_{1j}^*, x_{2j}^*, x_{3j}^*$  для оптимизируемой функции (18) вычисляем значения на  $k_3$ -й итерации:

$$\Psi_j^{k_3} = \Psi_j(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*), \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2;$$

$$\Psi_j^{0k_3} = \Psi_j^0(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*), \quad j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2.$$

Начальные условия рандомизированного поиска по переменным  $x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}$  соответствуют (11), а по дискретной случайной переменной  $\tilde{f}$  – (15). Коррекция значений штрафных коэффициентов осуществляется следующим образом:

$$y_j^{k_3+1} = \begin{cases} \max\{\delta, y_j^k - \gamma(\Psi_j^{0k_3} - \Psi_j^{k_3})\}, & \text{если } j = j_1, \\ y_j^{k_3}, & \text{если } j \neq j_1, j = \overline{1, J}; \end{cases} \quad j = j_1, j = j_2;$$

а распределение  $\tilde{f}$  аналогично (17).

Условие останова третьего итерационного процесса  $K_3$ -й итерации

$$\left| y_j^{K_3} - y_j^{K_3-1} \right| \leq \delta, \quad \forall j = \overline{1, J}, \quad j \neq j_1, \quad j \neq j_2. \quad (19)$$

---

 Оптимизация выбора структуры гибкого кластерного взаимодействия...

После выполнения (19) решается либо задача (14) при  $y_j = y_j^{K_3}$  с получением значений  $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*$ , либо задача (18) при  $y_j = y_j^{K_3}$  с получением значений  $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_{im}^*, x_{1j}^*, x_{2j}^*, x_{3j}^*$ .

Указанные значения оптимизируемых переменных принимаются в качестве окончательных управленческих решений для формирования структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе, если значения показателей этого варианта кластерной структуры  $\Psi_j^*$  устраивают экспертно больше, чем значения показателей  $\Psi_{jn1}^*, \Psi_{jn2}^*$ .

#### Заключение

В условиях цифровизации логистического процесса в организационных системах особую значимость приобретает формирование оптимальной структуры взаимодействия цифровых средств, которые, с одной стороны, использует управляющий центр, с другой – объекты логистического процесса. Поскольку вариативность структур существенно расширяется, в случае кластерной структуры требуется формализация принятия управленческих решений в рамках гибкого кластерного взаимодействия.

Управление гибкостью достигается за счет введения альтернативных переменных и формирования бикритериальных оптимизационных моделей с фиксированными и переменными граничными требованиями на множестве этих переменных. Специфика оптимизационных моделей учитывается за счет построения трехуровневого итерационного процесса поиска наилучшего решения с использованием рандомизированных схем и визуальных оценок экспертов. После останова итерационного процесса принимается окончательное управленческое решение на ограниченном множестве вариантов структур цифрового управления логистическим процессом в организационной системе.

#### Литература

1. Еловой И.А., Лебедева И.А. Интегрированные логистические системы доставки ресурсов: (теория, методология, организация). Минск: Право и экономика, 2011. 460 с.
2. Ильина Т.А., Кирина Д.Н. Цифровизация логистических процессов российских предприятий на основе внедрения технологии RFID // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2020. Т. 13, № 4. С. 36–45.
3. Логунова И.В., Троценко Д.В. Модель логистической системы предприятия в условиях цифровой экономики // Экономинфо. 2019. Т. 16, № 2-3. С. 81–86.
4. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения: монография. Воронеж: Научная книга, 2016. 444 с.
5. Львович Я.Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения. Воронеж: Кварта, 2006. 428 с.
6. Львович Я.Е., Львович И.Я. Принятие решений в экспертно-виртуальной среде: монография. Воронеж: Научная книга, 2010. 140 с.
7. Новосельцев В.И. Системный анализ: современные концепции. Воронеж: Кварта, 2003. 360 с.
8. Формирование цифровой экономики и промышленности: новые вызовы: монография / под ред. А.В. Бабкина. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2018. 660 с.

9. Serdyukova L.O., Bashirzadze R.R., Pakhomova A.V. Digital Platforms for Development of Innovative Transport Logistic Systems // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2020. Т. 13, № 2. С. 64–78.

### References

1. Elovoy I.A., Lebedeva I.A. (2011) *Integrirrovannyye logisticheskie sistemy dostavki resursov: (teoriya, metodologiya, organizatsiya)* [Integrated Logistics Systems of Delivery of Resources: (Theory, Methodology, Organization)]. Minsk, Law and Economics Publishing, 460 p. (in Russian).
2. Il'ina T.A., Kirina D.N. (2020) *Tsifrovizatsiya logisticheskikh protsessov rossijskikh predpriyatij na osnove vnedreniya tekhnologii RFID* [Logistic Processes Digitalization of Russian Companies Based on Implementation of RFID Technology]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, vol. 13, no. 4, pp. 36–45 (in Russian).
3. Logunova I.V., Troshchenko D.V. (2019) *Model' logisticheskoy sistemy predpriyatiya v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki* [Improving the Quality of the Organization of Business Processes Logistics Activities]. *Ekonominfo*, vol. 16, no 2-3, pp. 81–86 (in Russian).
4. L'vovich I.Ya., L'vovich Ya.E., Frolov V.N. (2016) *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i optimizatsii: kratkaya teoriya i prilozheniya: monografiya* [Information Technology Simulation and Optimization: A Brief Theory and Applications]. Voronezh, Publishing House Science Book, limited. 444 p. (in Russian).
5. L'vovich Ya.E. (2006) *Mnogoal'ternativnaya optimizatsiya: teoriya i prilozheniya* [Multi-Alternative Optimization: Theory and Applications]. Voronezh, Kvarta Publishing. 428 p. (in Russian).
6. L'vovich Ya.E., L'vovich I.Ya. (2010) *Prinyatie reshenij v ekspertno-virtual'noj srede: monografiya* [Decision Making in Expert-Virtual Environment]. Voronezh, Publishing House Science Book, limited. 140 p. (in Russian).
7. Novosel'tsev V.I. (2003) *Sistemnyj analiz: sovremennyye kontseptsii* [System Analysis: Modern Concepts]. Voronezh, Kvarta Publishing, 360 p. (in Russian).
8. Babkin A.A. (ed.) (2018) *Formirovanie tsifrovoy ekonomiki i promyshlennosti: novye vyzovy* [Formation of the Digital Economy and Industry: New Challenges]. Saint Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University. 660 p. (in Russian).
9. Serdyukova L.O., Bashirzadze R.R., Pakhomova A.V. (2020) Digital Platforms for Development of Innovative Transport Logistic Systems. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, vol. 13, no. 2, pp. 64–78.