

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.031](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.031)

## Оптимизация взаимодействий компонентов человеко-машинной системы цифровизации

В.В. Ермолова<sup>✉</sup>, Я.Е. Львович, Ю.П. Преображенский

*Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация*  
*[vv-ermolova@vvt.ru](mailto:vv-ermolova@vvt.ru)*<sup>✉</sup>

**Резюме.** В статье рассматривается применение оптимизационного подхода к обеспечению эффективного взаимодействия компонентов человеко-машинной системы цифровизации. Структура такой системы рассматривается как объединение эргатических элементов к привязке неэргатических элементов при решении комплекса задач цифровой трансформации. Определено формализованное описание двух основных задач: определение оптимального числа эргатических элементов, связанных с обеспечением функционирования неэргатических элементов систем цифровизации; распределение решаемых задач между эргатическими элементами. Сформированы оптимизационные модели на множествах булевых переменных и предложены модификации алгоритмов направленного случайного поиска. В качестве критериев оптимизации рассматривается ряд показателей: производительность, надежность, стоимость. Оптимизационная модель первой задачи является бикритериальной. Для ее постановки на множестве булевых переменных осуществляется запись целочисленных значений количества эргатических компонентов, взаимодействующих с неэргатическими в двоичном исчислении. Решение задачи оптимизации осуществляется с использованием направленного случайного поиска, управляемого на каждой итерации изменением величины аддитивной свертки нормированных значений критериев на основе экспертных оценок их приоритетности при принятии решений. В едином цикле с формированием свертки осуществляется изменение вероятностных характеристик привлечения к поиску булевых переменных. Окончательный вариант решения выбирается путем группового экспертного оценивания. Оптимизационная модель второй задачи формируется на множестве булевых переменных, характеризующих привлечение эргатического компонента к решению определенной задачи цифровизации. При этом в качестве экстремального требования рассматривается среднее время выполнения всего комплекса задач, а граничные – обусловлены требованием выполнения каждой задачи в один период времени одним эргатическим элементом. Особенностью реализации алгоритма направленного случайного поиска является учет многоиндексного представления значений булевых переменных и способа исключения из допустимого множества решений тех, которые не соответствуют граничным требованиям.

**Ключевые слова:** цифровизация, человеко-машинная система, булева оптимизация, случайный поиск, экспертное оценивание.

**Для цитирования:** Ермолова В.В., Львович Я.Е., Преображенский Ю.П. Оптимизация взаимодействий компонентов человеко-машинной системы цифровизации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1374> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.031

## Optimizing interaction of the components in a human-machine system of digitalization

V.V. Yermolova<sup>✉</sup>, Ya.E. Lvovich, Yu.P. Preoprazhenskiy

*Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation*  
*[vv-ermolova@vvt.ru](mailto:vv-ermolova@vvt.ru)*<sup>✉</sup>

**Abstract.** The article considers the application of the optimization approach to ensuring efficient interaction of the components in a human-machine system of digitalization. The structure of such system is seen as a junction of ergatic elements with reference to nonergatic elements when performing a set of tasks of digital transformation. The formalized description of the two primary objectives is given, they include optimizing the number of ergatic elements involved in the support of the performance of digitalization system nonergatic elements and distributing the tasks among ergatic elements. The optimization models on a set of Boolean variables have been developed and the modifications to the algorithms of guided random search have been proposed. As the optimization criterion, a number of indicators are considered – performance, reliability and cost. The optimization model of the first objective is bicriterial. To define it, the integer values of the ergatic components that interact with the nonergatic elements in binary notation are recorded on a set of Boolean variables. The optimization problem is solved by means of guided random search managed for each iteration by changing the value of additive convolution of standard criteria values based on expert assessment of their priority ranking. Probabilistic characteristics of engagement in the search for Boolean variables are adjusted in concurrence with the development of convolution. The final solution is selected by group expert assessment. The optimization model of the second objective is created on a set of Boolean variables characterizing the engagement of the ergatic component in solving the specific problem of digitalization. At the same time, average operation time for the set of tasks in its entirety is regarded as an extreme requirement while boundary requirements are determined by the completion of each task within a single time frame using one ergatic element. Implementation of the guided random search algorithm is characterized by the awareness for multi-index representation of Boolean value variables and the means for excluding the solutions that do not comply with boundary constraints.

**Keywords:** digitalization, human-machine system, Boolean optimization, random search, expert assessment.

**For citation:** Yermolova V.V., Lvovich Ya.E., Preoprazhenskiy Yu.P. Optimizing interaction of the components in a human-machine system of digitalization. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1374> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.031 (In Russ.).

## Введение

Системы цифровизации различных классов объектов представляют собой совокупность технических и программных средств, персонала, обеспечивающих цифровую трансформацию характеристик процессов функционирования этих объектов и интеграцию управленческой, технологической, когнитивной, физической составляющих в рамках единой цифровой среды [1]. Наиболее характерные реализации таких систем – различного рода киберфизические системы в рамках концепции индустрии 4.0: умный дом, умный город, цифровой завод, цифровой университет [2, 3]. Получили развитие системы цифрового управления [4]. Поскольку указанные системы построены на основе взаимодействия эргатических компонентов (технические средства, программы, информация), будем рассматривать их как человеко-машинные системы (ЧМС) [5]. Разнообразие задач, решаемых в системах цифровизации, требует выбора рациональных форм взаимодействия эргатических и неэргатических компонентов, отвечающих наилучшим образом значениям ключевых показателей ЧМС: производительность, надежность, стоимость [5]. Возможность количественной оценки этих показателей как на уровне компонентов, так и системы в целом позволяет обеспечить эффективное взаимодействие компонентов.

Традиционно задача повышения эффективности решается путем выдвижения нескольких вариантов взаимодействия компонентов в цифровизированной системе и выбора наилучшего на основе экспертных оценок [5]. При этом возможность применения формализованного оптимизационного подхода [6] не рассматривается, что снижает учет влияния эргатических компонентов.

Содержательная постановка задачи оптимизации состоит в следующем. Предлагается рассмотреть систему цифровизации функционирования сложного объекта, реализующую решение  $i = \overline{1, I}$  задач. Для решения  $i$ -й задачи задействовано  $m_i = \overline{1, M_i}$  неэргатических компонентов. С каждым неэргатическим компонентом  $m_i$  взаимодействует  $n_{mi} = \overline{1, N_{mi}}$  эргатических компонентов, параллельно выполняющих функции администрирования, обслуживания и ремонта. Для количественной оценки компонентов экспериментально определяются следующие показатели:

1. Производительность оценивается средним временем выполнения операции решения  $i$ -й задачи при взаимодействии  $m_i$ -го неэргатического компонента  $n_{mi}$ -го эргатического компонента  $t_{nmi}$ .

2. Надежность оценивается вероятностью безошибочного выполнения операции неэргатическим компонентом  $P_{mi}^H$ , эргатическим компонентом  $P_{nmi}^Э$ .

3. Стоимость оценивается затратами финансовых средств на функционирование неэргатических компонентов  $C_{nmi}^H$ , эргатических компонентов  $C_{nmi}^Э$ .

Интегральные значения показателей при решении  $i$ -й задачи вычисляются следующим образом:

среднее время решения  $i$ -й задачи [5]

$$t_i = \sum_{m_i=1}^{M_i} [t_{m_i}^H(n_{m_i}) + \max_{n_{m_i}=1, N_{m_i}} t_{n_{m_i}}^Э]; \quad (1)$$

вероятность безошибочного решения  $i$ -задачи с учетом того, что узлы системы цифровизации, объединяющие неэргатический компонент  $m_i$  с  $n_{mi}$  эргатическими компонентами, соединены последовательно, а эргатические компоненты  $n_{mi}$  – параллельно в смысле надежности [3].

$$p_i = \prod_{m_i=1}^{M_i} P_{m_i}^H [1 - (1 - \prod_{n_{m_i}=1}^{N_{m_i}} P_{n_{m_i}}^Э)]; \quad (2)$$

стоимость решения  $i$ -й задачи [2]

$$C_i = \sum_{m_i=1}^{M_i} [C_{m_i}^H(n_{m_i}) + \sum_{n_{m_i}=1}^{N_{m_i}} C_{n_{m_i}}^Э], \quad (3)$$

где обозначение  $t_{m_i}^H(n_{m_i})$ ,  $C_{m_i}^H(n_{m_i})$  характеризует экспериментальные зависимости времени и стоимости выполнения операции при решении  $i$ -й задачи на основе взаимодействия  $m_i$ -го неэргатического компонента с  $n_{mi}$  эргатическими компонентами от количества параллельных эргатических компонентов [5].

Целью данной работы является разработка оптимизационных моделей и алгоритмов принятия решений для обеспечения эффективного взаимодействия компонентов системы.

Для достижения поставленной цели решаются две задачи:

1. Разработка оптимизационной модели и алгоритма принятия решения при выборе числа эргатических компонентов, взаимодействующих с неэргатическими.

2. Разработка оптимизационной модели и алгоритма принятия решения при распределении задач, выполняемых эргатическими компонентами в цифровизированной системе.

### **Оптимизация числа эргатических компонентов, взаимодействующих с неэргатическими.**

Предлагается провести оптимизацию взаимодействия компонентов ЧМС при решении  $i$ -й задачи за счет поиска компромисса между максимизацией  $p_i$  и минимизацией  $C_i$  за счет выбора оптимальных значений  $N_{m_i}$ ,  $m_i = \overline{1, M_i}$ .

Оптимизационную модель представим в виде задачи бикритериальной оптимизации [7] на основе показателей (2), (3):

$$\Psi_1(N_{mi}) = \prod_{mi=1}^{M_i} P_{mi}^H [1 - (1 - \prod_{n_{mi}=1}^{N_{mi}} (1 - P_{n_{mi}}^{\exists}))] \rightarrow \max_{N_{mi}}, \quad (4)$$

$$\Psi_2(N_{mi}) = - \sum_{mi=1}^{M_i} [C_{mi}^H(N_{mi}) + \sum_{n_{mi}}^{N_{mi}} C_{n_{mi}}^{\exists}] \rightarrow \max_{N_{mi}}$$

Для решения оптимизационной задачи (4) представим переменные  $N_{mi}$  в двоичном исчислении, считая, что  $N_{mi} \leq 8 \forall_{mi} = \overline{1, M_i}$  [8]:

$$\begin{aligned} N_{1i} &= 1 + x_1 + 2x_2 + 4x_3, \\ &\vdots \\ N_{mi} &= 1 + x_{j-2} + 2x_{j-1} + 4x_j, \\ &\vdots \\ N_{mi} &= 1 + x_{j-2} + 2x_{j-1} + 4x_j, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x_j = \begin{cases} 1, & j = \overline{1, J} \\ 0, & \end{cases}$

Таким образом, множество дискретных переменных  $N_{mi} = \overline{1, N_{mi}}$ ,  $m_i = \overline{1, M_i}$  заменяем на множество булевых переменных  $x_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ .

Выполним еще одно преобразование. Значение величины функции  $\Psi_1$  в задаче (4) является безразмерным и нормированным на интервале  $[0, 1]$  по свойству вероятности [6]. Пронормируем на этом же интервале значения функции  $\Psi_2$ . С этой целью указываются предполагаемые минимальное и максимальное значения стоимости решения  $i$ -й задачи  $\Psi_2^{\min}$ ,  $\Psi_2^{\max}$ . Нормированные значения функции  $\Psi_2$  вычисляются следующим образом [7]:

$$\hat{\Psi}_2 = \frac{\Psi_2(N_{mi}) - \Psi_2^{\min}}{\Psi_2^{\max} - \Psi_2^{\min}}.$$

Преобразованная бикритериальная задача (4) имеет вид:

$$\Psi_1(x_j) \rightarrow \max, \hat{\Psi}_2(x_j) \rightarrow \max, x_j = \begin{cases} 1, & j = \overline{1, J} \\ 0, & \end{cases} \quad (6)$$

Итерационное решение задачи (6) осуществим с использованием направленного случайного поиска [8], управляемого изменением величины аддитивной свертки критериев  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  [7] которая формируется на основе экспертной информации [9].

Предлагается выполнить следующую последовательность шагов.

1. Установить начальные значения параметров случайного поиска:

вероятность привлечения к поиску  $j$ -й координаты оптимизируемых переменных  $x_j$ ,  $j = \overline{1, J}$

$$p_j^1 = \frac{1}{J}, j = \overline{1, J}; \quad (7)$$

вероятность принятия случайными реализациями оптимизируемых переменных значений 1 или 0

$$p_{x_j}^1 = P(x_j = 1) = 0,5; q_{x_j}^1 = P(x_j = 0) = 0,5; j = \overline{1, J}, \quad (8)$$

где  $P(\cdot)$  – обозначение вероятности события;

вероятности привлечения к поиску критериев  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$

$$P_{\Psi_1}^1 = 0,5, P_{\Psi_2}^1 = 0,5. \quad (9)$$

2. Организовать итерационный процесс  $k = 1, 2, \dots$
3. Определить случайную реализацию дискретной величины  $\tilde{j} = \overline{1, J}$  при значениях вероятностей привлечения к поиску  $p_j$ .

С этой целью генерируется значение случайного числа  $\tilde{\xi}$  [6].

Если  $\tilde{\xi} \leq \sum_{j=1}^{J_1} p_j^k$ , то  $\tilde{j} = J_1$ , в противном случае проверяем условие  $\tilde{\xi} \leq \sum_{j=1}^{J_1+1} p_j^k$  и при его выполнении имеем  $\tilde{j} = J_1 + 1$  и т. д.,

где  $\tilde{\xi}$  – значение из последовательности псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на интервале  $[0, 1]$ .

4. Определить случайные реализации булевых переменных  $\tilde{x}_j, j = \overline{1, J}$

$$\tilde{x}_j^k = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{\xi} \leq p_{x_j}^k, j = \overline{1, J}, j \neq J_1, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

5. Вычислить вариации значений свертки показателей  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$

$$\Delta\psi = P_{\Psi_1}^k [\Psi_1(x_{J_1} = 1, \tilde{x}_j^k) - \Psi_1(x_{J_1} = 0, \tilde{x}_j^k)] + P_{\Psi_2}^k [\widehat{\Psi}_2(x_{J_1} = 1, \tilde{x}_j^k) - \widehat{\Psi}_2(x_{J_1} = 0, \tilde{x}_j^k)]. \quad (10)$$

6. Провести настройку вероятности (7), (8) для  $(k+1)$  итерации

$$\begin{aligned} p_j^{k+1} &= p_j^k + f_1(\Delta\psi), \\ p_{x_j}^{k+1} &= p_{x_j}^k + f_2(\Delta\psi), \end{aligned}$$

где  $f_1, f_2$  – функции, определяющие направленный поиск в зависимости от значений вариаций, вычисление которых рассмотрено в [8].

6. Для настройки вероятностей (9) дополнительно используется экспертная информация.

С целью выяснения мнения эксперта ему предполагается визуальная интерпретация значимости критериев  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  на отрезке между точками на плоскости с координатами  $P_{\psi_1} = 1, P_{\psi_2} = 0$  и  $P_{\psi_1} = 0, P_{\psi_2} = 1$ . Этот отрезок разбивается на  $B$  равных части. Части, лежащие выше точки  $(0,5; 0,5)$ , нумеруются положительными числами  $1, 2, \dots, B$ , а части, лежащие ниже этой точки, отрицательными:  $-1, -2, \dots, -B$ . Такое визуальное представление позволяет эксперту указать на  $k$ -й итерации точку с определенным номером  $\pm b^k$ , соответствующую соотношению значимостей критериев по его мнению. Если координаты точки  $b^k$  совпали со значениями  $P_{\Psi_1}^k, P_{\Psi_2}^k$ , то компромисс найден и последующие вычисления вариаций свертки осуществляются в соответствии с выражением (10). В противном случае до завершения итерационного процесса осуществляется настройка вероятностей для  $(k+1)$ -й итерации [6]

$$\begin{aligned} P_{\Psi_1}^{k+1} &= \frac{p_{\Psi_1}^k + \gamma^{k+1} \frac{b^{k+1}}{B}}{1 + \gamma^{k+1} \frac{b^{k+1}}{B}}, P_{\Psi_2}^{k+1} = 1 - P_{\Psi_1}^{k+1}, \text{ если } b^k > 0; \\ P_{\Psi_1}^{k+1} &= \frac{p_{\Psi_1}^k + \gamma^{k+1} \frac{|b^k|+1}{B}}{1 + \gamma^{k+1} \frac{|b^k|+1}{B}}, P_{\Psi_2}^{k+1} = 1 - P_{\Psi_1}^{k+1}, \text{ если } b^k < 0. \end{aligned}$$

Для учета обучаемости эксперта по оценке соответствия выбранной им точки множества Парето [7] реальному соотношению предпочтений критериев при выборе величины шага  $\gamma^{k+1}$  используются его суждения, высказанные на текущей ( $b^k$ ) и предыдущей ( $b^{k-1}$ ) итерациях.

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k \exp\left(\frac{1}{k} \text{sign}[b^k b^{k-1}]\right).$$

При совпадении суждений

$$b^k > 0, b^{k-1} > 0 \text{ либо } b^k < 0, b^{k-1} < 0$$

происходит большее изменение вероятностей, чем на предыдущей итерации, в противном случае – изменение менее значительное.

7. Завершить итерационный процесс при  $k=K$ .

8. Вычислить вероятности вариантов  $l = \overline{1, L}, L = 2^J$  решения задачи (5) на основе значений  $p_{x_j}^K, q_{x_j}^K = 1 - p_{x_j}^K$  с учетом того, что  $x_j^K = 1, j = \overline{1, J_1} \in \overline{1, J}$

$$p_l = \prod_{j \in J_1} p_{x_j}^K \prod_{j \notin J_1} q_{x_j}^K.$$

9. Эксперт выбирает для дальнейшего рассмотрения 5-7 вариантов с наибольшими значениями  $p_l$ .

10. Выбор окончательного варианта  $x_j^*, j = \overline{1, J}$  осуществляется коллективом экспертов с использованием алгоритмов, приведенных в [9].

11. Вычислить на основе (5) оптимальные значения  $N_{mi}^*, m_i = \overline{1, M_i}$ , соответствующие  $x_j^*, j = \overline{1, J}$ .

### Оптимизация распределения задач, выполняемых эргатическими компонентами в цифровизированной системе

Перейдем к формализованной постановке задачи оптимального распределения выполнения  $i = \overline{1, I}$  задач между эргатическими компонентами  $N_{mi}^*, m_i = \overline{1, M_i}$ . В этом случае основным показателем, который необходимо минимизировать, рассматривается среднее время выполнения всех  $i = \overline{1, I}$  задач [10]

$$t = \sum_{i=1}^I t_i, \tag{11}$$

где  $t_i$  вычисляется с использованием (1).

В выражении (1) переменной частью, которой можно варьировать, является суммарное время участия в решении  $i$ -й задачи одного из  $n_{mi} = \overline{1, N_{mi}^*}$  эргатических элементов, связанного с неэргатическим компонентом  $m_i$ .

Варьирование определяется следующими булевыми переменными:

$$x_{nmi} = \begin{cases} 1, \text{ если эргатический компонент} \\ n_{mi} \text{ привлекается к решению} \\ i - \text{й задачи,} \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \tag{12}$$

$$n_{mi} = \overline{1, N_{mi}^*}, m_i = \overline{1, M_i}, i = \overline{1, I}.$$

Тогда переменная часть (11) запишется

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{n_{mi}=1}^{N_{mi}^*} t_{nmi}^\Theta x_{nmi}. \tag{13}$$

Используем функцию (13), зависящую от булевых переменных (12), в качестве критерия оптимизации задачи о назначениях [8] с учетом ограничений, которые обусловлены условием выполнения каждой задачи в один период времени одним

эргатическим компонентом из  $N_{mi}$ , связанных с  $m_i$ -м неэргатическим компонентом каждого эргатического компонента для решения  $i_{nmi} = \overline{1, I_{nm}} \in \overline{1, I}$  задач:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{n_{mi}=1}^{N_{mi}^*} t_{nmi}^{\exists} x_{nmi} \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$\sum_{n_{mi}=1}^{N_{mi}^*} x_{nmi} = 1_n, i = \overline{1, I},$$

$$\sum_{i=1}^I x_{nmi}, I_{nm}, n_{mi} = 1, N_{mi}^*, m_i = \overline{1, M_i},$$

$$x_{nmi,i} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, n_{mi} = \overline{1, N_{mi}^*}, m_i^* = \overline{1, M_i}, i = 1, I.$$

Решение задачи (14) предлагается осуществить аналогично решению первой задачи с использованием направленного случайного поиска.

Отличие состоит в учете при выполнении алгоритма (пункт 1 – пункт 11) следующих особенностей:

1) многоиндексного представления значений булевых переменных (2)  $x_{nmi}, x_{mi} = \overline{1, N_{mi}^*}, i = \overline{1, I}$ ;

2) разных способов включения в оптимизируемую функцию ограничений задачи (14).

Многоиндексное представление переменных (12) требует в пункте 1 алгоритма установить вероятностные характеристики для каждого индекса

$$P_i^1 = \frac{1}{I}, P_{mi}^1 = \frac{1}{M_i}, i = \overline{1, I}; P_{nmi}^1 = \frac{1}{N_{mi}^*}. \quad (15)$$

Тогда определение случайной реализации дискретной величины  $\tilde{i} = \overline{1, I}$  (пункт 3) будет влиять на последующий выбор случайных реализаций  $\tilde{m}_i = \overline{1, M_i}$  и далее  $n_{mi} = \overline{1, N_i}$ .

Ограничения задачи (14)

$$\sum_{n_{mi}=1}^{N_{mi}^*} x_{nmi} = 1, i = \overline{1, I} \quad (16)$$

учитываются при вычислении вариации (10) в пункте 5 для определенной случайной реализации  $\tilde{i} = \overline{1, I}$  алгоритмически путем исключения комбинаций, не соответствующих ограничениям (16).

Ограничения задачи (14)

$$\sum_{i=1}^I x_{nmi} \leq I_{nm}, n_{mi} = \overline{1, N_{mi}^*}, m_i = \overline{1, M_i} \quad (17)$$

учитываются путем включения вместо пункта 7 процедуры определения эквивалентной оптимизируемой функции Лагранжа [6]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{n_{mi}=1}^{N_{mi}^*} x_{nmi} + x_{nm} (\sum_{i=1}^I x_{nmi} - I_{nm}), \quad (18)$$

где  $x_{nm} \geq 0$  – коэффициенты функции Лагранжа, задаваемые экспертом на первой итерации.

При определении вариации (10) вычисляются значения оптимизируемой функции (18).

Пункты 7-10 выполняются без изменений. Пункт 11 исключается, поскольку значения  $x_{nmi}^* = 1$  определяют номера тех эргатических элементов, которые

взаимодействуют с определенным неэргатическим элементом  $m_i$  при решении  $i$ -й задачи.

### Заключение

Таким образом, исследование систем цифровизации как человеко-машинных систем позволяет установить влияние характеристик взаимодействия эргатических и неэргатических компонентов на показатели производительности, надежности и стоимости их функционирования. Оптимизационный подход базируется на формализованном описании отдельных этапов комплекса задач цифровизации, связанных с определенным неэргатическим компонентом, путем введения булевых оптимизируемых переменных. Компромиссное решение по значимости показателей надежности и стоимости достигается направленным случайным поиском в рамках бикритериальной задачи оптимизации с привлечением экспертной информации. Целесообразной в этом случае является многошаговая алгоритмическая схема, позволяющая установить оптимальное число эргатических компонентов в каждом узле ЧМС. Оптимизация производительности системы достигается за счет обеспечения эффективной схемы назначения определенного набора решаемых задач каждому эргатическому компоненту.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Толковый словарь по информационному обществу и новой экономике. М.: 2007. URL: [http://information\\_society.academic.ru](http://information_society.academic.ru).
2. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Киберфизические системы промышленного интернета вещей. *Прикладная информатика*. 2021;16(2):72–81.
3. Смышляева А.А., Резников К.М., Савченко Д.В. Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы. *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2020;3. URL: <https://resources.today/02inor320.html>. DOI: 10.15862/02INOR320.
4. Львович Я.Е., Львович И.Я., Чопоров О.Н. Оптимизация цифрового управления в организационных системах: коллективная монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2021. 191 с.
5. Адаменко А.Н. и др. *Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: Справочник*. М.: Машиностроение; 1993. 527 с.
6. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. *Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2016. 444 с.
7. Батищев Д.И., Львович Я.Е., Фролов В.Н. *Оптимизация в САПР: Учебник для вузов по направлению "Информатика и вычислительная техника" и специальности "Системы автоматизированного проектирования*. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета; 1997. 415 с.
8. Львович Я.Е. *Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения*. Воронеж: Кварта; 2006. 415 с.
9. Львович Я.Е., Львович И.Я. *Принятие решений в экспертно-виртуальной сфере*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2010. 140 с.
10. Шеффер Э. *Индустрия Х.О. Преимущества цифровых технологий для производства (пер. с англ.)*. М.: Издательская группа «Точка»; 2019. 320 с.

## REFERENCES

1. An explanatory dictionary on information society and new economics. Moscow, 2007. URL: [http://information\\_society.academic.ru](http://information_society.academic.ru). (In Russ.).
2. Gumerov E.A., Alekseeva T.V. Cyber-physical systems of the industrial internet of things. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*. 2021;16(2):72–81. (In Russ.).
3. Smyshlyaeva A.A., Reznikova K.M., Savchenko D.V. Modern technologies in Industry 4.0 – cyber-physical systems. *Internet-zhurnal “Otkhody i resursy” = Russian journal of resources, conservation and recycling*. 2020;7(3). URL: <https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf>. DOI: 10.15862/02INOR320. (In Russ.).
4. Lvovich Ya.E., Lvovich I.Ya., Choporov O.N. *Optimization of digital management in organizational systems*. Voronezh, IPTs “Nauchnaya kniga”; 2021. 191 p. (In Russ.).
5. Adamenko A.N. et al. *Data management human-machine systems: research, design, trial: a reference book*. Moscow, Mashinostroenie; 1993. 527 p. (In Russ.).
6. Lvovich I.Ya., Lvovich I.Ya., Frolov V.N. *Information technologies of modeling and optimization: a brief theory and applications*. Voronezh, IPTs “Nauchnaya kniga”; 2016. 444 p. (In Russ.).
7. Batishchev D.I., Lvovich Ya.E., Frolov V.N. *Optimization in CAE systems: a textbook*. Voronezh, Izdatel'stvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta; 1997. 415 p. (In Russ.).
8. Lvovich Ya.E. *Multialternative optimization: theory and applications*. Voronezh, Kvarta; 2006. 415 p. (In Russ.).
9. Lvovich Ya.E., Lvovich I.Ya. *Decision-making in expert and virtual environment*. Voronezh, IPTs “Nauchnaya kniga”; 2010. 140 p. (In Russ.).
10. Schaeffer E. *Industry X.0 – Realising Digital Value in Industrial Sector (translated from English)*. Moscow, Izdatel'skaya gruppa “Tochka”; 2019. 320 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ермолова Валентина Викторовна**, Valentina Viktorovna Yermolova, Head of начальник отдела информатизации Digital Development Department, Воронежского института высоких Voronezh Institute of High Technologies, Воронеж технологий, Воронеж, Российская Федерация. the Russian Federation.  
e-mail: [vv-ermolova@vvt.ru](mailto:vv-ermolova@vvt.ru)

**Львович Яков Евсеевич**, Yakov Evseevich Lvovich, Doctor of Technical технических наук, профессор, президент Sciences, Professor, President of Воронежского института высоких Voronezh Institute of High Technologies, Воронеж технологий, Воронеж, Российская Федерация. the Russian Federation.  
ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

**Преображенский Юрий Петрович**, Yuri Petrovich Preobrazhenskiy, Candidate of кандидат технических наук, доцент, Technical Sciences, Associate Professor, Vice- проректор по информационным технологиям Rector for Digital Development, Воронежского института высоких Voronezh, the Russian Federation. технологий, Воронеж, Российская Федерация.

*Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 05.06.2023; принята к публикации 29.06.2023.*

*The article was submitted 11.05.2023; approved after reviewing 05.06.2023; accepted for publication 29.06.2023.*