

УДК 004.5

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.001)

Оптимизация человеко-машинной среды управления организацией с применением киберфизической системы

В.В. Ермолова✉, Я.Е. Львович, Ю.П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается применение оптимизационного подхода при управлении организацией с применением киберфизических систем. Объектом оптимизации является человеко-машинная среда. Установлены особенности взаимодействия эргатических элементов с элементами физического и вычислительного уровней архитектуры киберфизической системы. Показано, что задачей оптимизации на нижнем уровне является распределение функций эргатических элементов по показателям надежности и эффективности человеко-машинной среды. В формализованном виде требования оптимальности определяют многокритериальную модель на множестве альтернативных переменных. Предложен алгоритм принятия решения на основе рандомизированного поиска в комбинации с экспертным оцениванием. Учтены возможности установления разделения общего количества эргатических ОС элементов между тремя функциями на начальном этапе поиска экспертным путем с последующим назначением каждого эргатического элемента в итерационном режиме. Оптимизация человеко-машинной среды на верхних уровнях киберфизической системы направлена на распределение каждого эргатического элемента для выполнения определенного действия. Структура оптимизационной модели отличается от первой задачи. Для обеих задач оптимизации используется разработанный алгоритм принятия решения, основанный на интеграции итерационной процедуры рандомизированного поиска и процедуры экспертного оценивания. Учет многокритериальности совмещен с итерациями коррекции вероятностных характеристик альтернативных переменных путем изменения вероятностей привлечения критериев к поиску. Перечисленные модели и алгоритмы позволяют оптимизировать структуру действий эргатических элементов в человеко-машинной среде управления организацией с применением киберфизической системы.

Ключевые слова: организационная система, управление, человеко-машинная среда, киберфизическая система, оптимизация.

Для цитирования: Ермолова В.В., Львович Я.Е., Преображенский Ю.П. Оптимизация человеко-машинной среды управления организацией с применением киберфизической системы. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1360> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.001

Optimizing a human-machine environment for enterprise management using a cyber-physical system

V.V. Yermolova✉, Ya.E. Lvovich, Yu.P. Preoprazhenskiy

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. The article considers the application of the optimization approach to enterprise management using a cyber-physical system. A human-machine environment is the object of optimization. Features of interaction of nonergatic elements with the elements of physical and computational levels of cyber-physical architecture are observed. It is shown that ergatic element function allocation by the indexes of reliability and efficiency of a human-machine environment is the optimization task at the lower level. In the formalized form, the optimality requirements determine the multi-objective model by a set of alternative variables. The decision-making algorithm based on random search combined with expert assessment is offered. The capabilities of establishing the division of the total amount of ergatic OS

elements between three functions at the initial stage of the search by expert way followed by the assignment of each ergatic element in the iteration mode have been considered. The optimization of a human-machine environment at the upper levels of a cyber-physical system is aimed at assigning each ergatic element to perform a specific action. The structure of the optimization model differs from the first task. The developed decision-making algorithm based on the integration of random search iteration procedure and expert assessment procedure is used for both optimization tasks. Multicriteriality is accounted for along with the iterations of probabilistic characteristic adjustment by changing the probability of engaging the criteria in the search. The models and algorithms listed above help to optimize the structure of ergatic element operation in a human-machine environment for enterprise management using a cyber-physical system.

Keywords: organizational system, management, human-machine environment, cyber-physical system, optimization.

For citation: Yermolova V.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P. Optimizing a human-machine environment for enterprise management using a cyber-physical system. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1360> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.001 (In Russ.).

Введение

В условиях активной цифровой трансформации организаций экономики и социальной сферы [1] цифровое управление ими преимущественно осуществляется посредством информационно-аналитических (ИАС) [2] и киберфизических систем (КФС) [3]. Исследования, связанные с применением этих систем, посвящены проблемам разработки архитектуры [4, 5], обработки больших данных [6], оптимизации принятия решений [7]. Недостаточное внимание уделяется особенностям функционирования человеко-машинной среды, основанной на взаимодействии эргатических элементов с другими ее элементами в рамках архитектурных решений. Учет человеко-машинных процессов позволяет повысить эффективность, качество и надежность цифровизированных организационных систем [8].

Поскольку ИАС – устоявшаяся в практике форма цифровизации управления организацией, вопросы моделирования и оптимизации их функционирования как человеко-машинных систем нашли широкое отражение в научной литературе [8]. Один из аспектов, связанных с оптимизацией взаимодействия элементов человеко-машинной среды, детально рассмотрен в [9].

Применение КФС вызвано необходимостью управления не только на основании информации о динамике показателей эффективности организационной системы, что характерно для ИАС, но и на основе данных, генерируемых «умными» вещами (оборудование, продукты, ресурсы, материальные потоки, окружающая среда) [10]. В этом случае основой принятия управленческих решений становятся КФС, играющие основную роль в реализации парадигмы «Индустрия 4.0» [11]. Человеко-машинная среда цифрового управления формируется в рамках определенной архитектуры КФС, включающей следующие уровни: интеллектуальных соединений, интеллектуального анализа данных, киберфизических моделей, цифрового познания реальности, интеллектуальной автоматической конфигурации [5, 10]. Формы взаимодействия элементов человеко-машинной среды различаются для нижнего и последующих уровней архитектуры. На нижнем уровне основным является взаимодействие с физической средой, на верхнем – с аппаратно-программными средствами при формировании цифровых двойников и принятия решений на основе интеллектуального анализа данных. Вопросы оптимизации этих форм взаимодействия по показателям эффективности, качества и надежности человеко-машинной среды в научных публикациях не нашли отражения.

Целью работы является реализация оптимизационного подхода при выборе наилучшего варианта взаимодействия в рамках архитектуры КС, используемой при управлении в организационных системах. Для достижения этой цели предлагается решить следующие задачи:

1. Оптимизация распределения функций эргатических элементов на нижних уровнях по характеру взаимодействия с физической средой и межуровневым интерфейсом.

2. Оптимизация выполнения эргатическими элементами действий, связанных с формированием цифровых двойников и их применением при принятии решений.

Оптимизация распределений функций эргатических элементов на нижнем уровне КФС

Рассмотрим распределение $n = \overline{1, N}$ эргатических элементов человеко-машинной среды на нижнем уровне КФС при выполнении трех функций:

– взаимодействие с элементами физической среды уровня интеллектуальных соединений как с автономными неэргатическими элементами, включающими техническую составляющую и встроенные программы;

– взаимодействие при соединении физической среды с уровнем интеллектуального анализа данных как единой системы вычислительных узлов;

– взаимодействие одновременно как с автономными компонентами, так и системой вычислительных узлов.

Оптимальность распределения будет определяться основными количественными показателями человеко-машинной среды [8]:

– вероятностью безошибочного выполнения эргатическими элементами перечисленных функций;

– временем выполнения эргатическими элементами перечисленных функций;

– стоимостью выполнения эргатическими элементами перечисленных функций.

При этом необходимо, чтобы вариант назначения ($l = \overline{1, L}$) эргатических элементов на выполнение каждой функции соответствовал следующим условиям:

– минимальное значение вероятности безошибочного выполнения эргатическими элементами назначаемой функции должно быть максимально среди возможных вариантов;

– максимальные значения времени и стоимости выполнения эргатическими элементами назначаемой функции должно быть минимально среди возможных вариантов.

Запишем перечисленные условия в формализованном виде. Для этого в первую очередь введем альтернативные переменные, определяющие перебор вариантов распределения [12]:

$$x_n = \begin{cases} 1, & \text{если } n - \text{й эргатический элемент распределяется} \\ & \text{для выполнения первой функции,} \\ 0, & \text{в противном случае, } n = \overline{1, N}; \end{cases} \quad (1)$$

$$y_n = \begin{cases} 1, & \text{если } n - \text{й эргатический элемент распределяется} \\ & \text{для выполнения второй функции,} \\ 0, & \text{в противном случае, } n = \overline{1, N}; \end{cases} \quad (2)$$

$$z_n = \begin{cases} 1, & \text{если } n - \text{й эргатический элемент распределяется} \\ & \text{для выполнения третьей функции,} \\ 0, & \text{в противном случае, } n = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку по каждому набору альтернативных переменных (1)-(3) число комбинаций их значений, равных 1 или 0, равно 2^N , то общее число вариантов перебора $L = 2^N$.

Из каждого множества вариантов $l = \overline{1, L}$, где $L = 2^N$, следует выбрать такие варианты, которые позволят распределить $n = \overline{1, N}$ для выполнения трех функций при сохранении общего количества эргатических элементов N

$$\sum_{n=1}^N (x_n + y_n + z_n) = N. \quad (4)$$

Кроме того, для выполнения условия (6) вводят экспертные оценки количества эргатических элементов, планируемых для выполнения первой функции N_1 , второй – N_2 , третьей N_3 , где $N_1 + N_2 + N_3 = N$.

Условия оптимальности, приведенные выше, в формализованном виде запишем следующим образом:

по вероятности безошибочного выполнения функций

$$\Psi_1(x_n) = \min_{n=1, N} \pi_{1n} x_{nl} \rightarrow \max_{l=1, L}, \quad (5)$$

$$\Psi_2(y_n) = \min_{n=1, N} \pi_{2n} y_{nl} \rightarrow \max_{l=1, L}, \quad (6)$$

$$\Psi_3(z_n) = \min_{n=1, N} \pi_{3n} z_{nl} \rightarrow \max_{l=1, L}, \quad (7)$$

где $\pi_{1n}, \pi_{2n}, \pi_{3n}$ – вероятности безошибочного выполнения n -м эргатическим элементом соответственно первой, второй и третьей функции;

x_{nl}, y_{nl}, z_{nl} – значения альтернативных переменных в комбинации значений, равных 1 или 0 и образующих l -й вариант;

$$\Psi_4(x_n) = \max_{n=1, N} t_{1n} x_{nl} \rightarrow \min_{l=1, L}, \quad (8)$$

$$\Psi_5(y_n) = \max_{n=1, N} t_{2n} y_{nl} \rightarrow \min_{l=1, L}, \quad (9)$$

$$\Psi_6(z_n) = \max_{n=1, N} t_{3n} z_{nl} \rightarrow \min_{l=1, L}, \quad (10)$$

где t_{1n}, t_{2n}, t_{3n} – время выполнения n -м эргатическим элементом соответственно первой, второй и третьей функции;

$$\Psi_7(x_n) = \max_{n=1, N} c_{1n} x_{nl} \rightarrow \min_{l=1, L}, \quad (11)$$

$$\Psi_8(y_n) = \max_{n=1, N} c_{2n} y_{nl} \rightarrow \min_{l=1, L}, \quad (12)$$

$$\Psi_9(z_n) = \max_{n=1, N} c_{3n} z_{nl} \rightarrow \min_{l=1, L}, \quad (13)$$

где c_{1n}, c_{2n}, c_{3n} – время выполнения n -м эргатическим элементом соответственно первой, второй и третьей функции.

Для решения задачи оптимального выбора значений альтернативных переменных (1)-(3), обеспечивающих выполнение условий (4)-(13), используем рандомизированный подход, в комбинации с экспертным оцениванием [13]. С этой целью заменим альтернативные переменные (1)-(3) на случайные булевы переменные [14] с

соответствующими распределениями, характеризуемые вероятностями принятия ими значений 1 или 0

$$\tilde{x}_n, n = \overline{1, N}, P_{xn}, q_{xn} = 1 - p_{xn}, \quad (14)$$

$$\tilde{y}_n, n = \overline{1, N}, P_{yn}, q_{yn} = 1 - p_{yn}, \quad (15)$$

$$\tilde{z}_n, n = \overline{1, N}, P_{zn}, q_{zn} = 1 - p_{zn}. \quad (16)$$

Тогда конкретное случайное значение (14)-(16) определяется

$$\tilde{x}_n = \begin{cases} 1, \text{ если } p_{xn} \leq \tilde{\xi}, \\ 0, \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (17)$$

$$\tilde{y}_n = \begin{cases} 1, \text{ если } p_{yn} \leq \tilde{\xi}, \\ 0, \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (18)$$

$$\tilde{z}_n = \begin{cases} 1, \text{ если } p_{zn} \leq \tilde{\xi}, \\ 0, \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (19)$$

где $\tilde{\xi}$ – значение из последовательности случайных чисел, равномерно распределенных на интервале $[0, 1]$ [15].

Одновременно введем два дискретных случайных числа:

$\tilde{n} = \overline{1, N}$, значение которого соответствует номеру альтернативной переменной, которая на k -й итерации привлекается к покоординатному рандомизированному поиску [12] с вероятностью $p_n, n = \overline{1, N}, \sum_{n=1}^N P_n = 1$;

$\tilde{g} = \overline{1, G}$, значение которого принимает один из целочисленных уровней, соответствующий определенному номеру условий оптимальности (5)-(13), с вероятностью $P_g, \sum_{g=1}^G P_g = 1$.

Для определения конкретного случайного числа \tilde{n} или \tilde{g} происходит по нарастающей сравнение P_n или P_g со значением из последовательности случайных чисел $\tilde{\xi}$ [15].

Поиск наилучшего варианта распределения функций эргатических элементов осуществляется путем направленного перебора по вероятностям (14)-(16), P_n, P_g с использованием итерационной процедуры [13] их изменения

$$Px_n^{k+1} = Px_n^k + \kappa_1(\tilde{x}_n^k), n = \overline{1, N}, \quad (20)$$

$$Py_n^{k+1} = Py_n^k + \kappa_2(\tilde{y}_n^k), n = \overline{1, N}, \quad (21)$$

$$Pz_n^{k+1} = Pz_n^k + \kappa_3(\tilde{z}_n^k), n = \overline{1, N}, \quad (22)$$

$$Pn^{k+1} = Pn^k + \kappa_4(x_n^k, y_n^k, z_n^k), \sum_{n=1}^N p_n^{k+1}, n = \overline{1, N}, \quad (23)$$

$$Pg^{k+1} = Pg^k + \kappa_5(\Psi g), g = \overline{1, G}, \sum_{g=1}^G P_g^{k+1} = 1, \quad (24)$$

где k – номер итерации, $k=1, 2, \dots$,

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5$ – значения корректирующих функций, вычисляемых на основе вариаций оптимизируемых функций (5)-(13) [12].

Предлагается следующий алгоритм рандомизированного поиска оптимального распределения функций эргатических элементов.

1. Задаются начальные значения вероятностных характеристик для организации итерационных процедур (21)-(24): $Px_n^1 = 0,5; Py_n^1 = 0,5; Pz_n^1 = 0,5; Pn^1 = \frac{1}{N}, n = \overline{1, N}; Pg^1 = \frac{1}{G}, g = \overline{1, G}$.

2. На k -й итерации по распределению Pg^k , $g = \overline{1, G}$ определяется значение случайного числа \tilde{g} . Пусть $\tilde{g}^k = g_1 \in \overline{1, G}$.

3. Решается задача по условию оптимальности Ψg_1 . Допустим, что выполнение этого условия зависит от выбора варианта, соответствующего комбинации значений альтернативных переменных $x_n^k, n = \overline{1, N}$.

4. На основе сравнения значений вероятностей $p_n^k, n = \overline{1, N}$ с последовательностью случайных чисел ξ выбирается номер координаты n^k и для этого номера изменяется значение вероятности $Px_{n^k}^{k+1}$ в соответствии с (20), для номеров координат $n \neq n^k$ $Px_n^{k+1} = Px_n^k$.

5. Определяются в соответствии с условиями (18), (19) значения альтернативных переменных y_n по вероятностям $Pu_n^{k'}$ на k' -й итерации, на которой осуществлялся последний расчет (21), и z_n по вероятностям $Pz_n^{k''}$ на k'' -й итерации, на которой осуществлялся последний расчет (22). Эксперт регулирует количество альтернативных переменных $y_n = 1$ в окрестности планируемого значения N_2 и $z_n = 1$ в окрестностях планируемого значения N_3 .

6. По величине вероятности $Px_{n^k}^{k+1}$ на основе (17) определяют значение x_n . Если $x_n = 1$, то проверяется, есть ли переменные $y_n = 1, z_n = 1$ с этим номером. Если есть, то переходят к пункту 4 и затем п. 6. Если $x_n = 0$ или $x_n^k = 1$ для несовпадающего номера переменной, то в соответствии с (17) определяется вся комбинация значений альтернативных переменных x_n^{k+1} . Эксперт регулирует количество альтернативных $x_n = 1$ в окрестности планируемого значения N_1 .

7. Заменяется жесткое условие (4) на вариативное условие

$$N - \delta \leq \sum_{n=1}^N (x_n^{k+1}, y_n^{k'}, z_n^{k''}) \leq N + \delta, \quad (25)$$

где δ – целые числа, ограниченные значением Δ , которое задается экспертом

$$\delta = 0, 1, 2, \dots, \Delta. \quad (26)$$

8. Проверяется выполнение условия (25). Если оно выполняется хотя бы при одном из значений δ из множества целых чисел (26), то переходим к диалогу с экспертом, в противном случае повторяются пункты 3-6.

9. Для диалога с экспертом вычисляются значения $\Psi_1 - \Psi_3$ при значениях альтернативных переменных $x_n^{k+1}, y_n^{k'}, z_n^{k''}$. Эксперту задается вопрос [13]: «какое из значений $\Psi_1 - \Psi_3$ не устраивает его в наибольшей степени?». Если ответит – g_2 , то в соответствии с (24) корректируется значение p_g^{k+1} и повторяется процедура, начиная с пункта 2.

10. Процедура, включающая пункты, начиная со 2 до 9, повторяется до выполнения условия (25) при минимальном значении δ . Если δ отлично от значения 0, то число эргатических элементов, выполняющих функции на нижнем уровне, либо уменьшается, либо увеличивается на величину δ .

В результате получаем оптимальное распределение функций эргатических элементов на нижних уровнях КФС.

Оптимизация выполнения эргатическими элементами действий на верхних уровнях КФС

Человеко-машинная среда верхних уровней КФС определяется взаимодействием эргатических и неэргатических элементов при выполнении определенных действий [10]. Так, на уровне интеллектуального анализа данных это извлечение данных, характеризующих функционирование физических устройств; их очистка,

предобработка, связывание, структуризация; отбор факторов и формулирование статистических выборок для машинного обучения цифровых двойников. На уровне кибернетических моделей: выбор вида модели цифрового двойника (регрессии, классификации, прогнозирования), определение структуры модели, параметрическая идентификация на основе машинного обучения, оценка точности, адекватности, экономичности варианта цифрового двойника на уровне цифрового познания реальности; формирование задач принятия решений с использованием моделей цифровых двойников, подготовка алгоритмических процедур, выбор решения на последнем уровне действия эргатических элементов, связаны с принятием корректирующих решений по конфигурации КФС в форме обратной связи от кибернетического к физическому пространству.

Перечисленные действия требуют разного времени выполнения: средней длительности вычисляются одним эргатическим элементом, выше средней – двумя, короткие связываются в последовательность до трех действий, выполняемых одним эргатическим элементом. Обозначим разделение действий на три группы по временным характеристикам следующим образом:

– $d_1 = \overline{1, D_1}$ – нумерационное множество действий, выполняемых одним эргатическим элементом (первая группа);

– $d_2 = \overline{1, D_2}$ – нумерационное множество действий, выполняемых параллельно двумя эргатическими элементами (вторая группа);

– $d_3 = \overline{1, D_3}$ – нумерационное множество действий, выполняемых одним эргатическим элементом в рамках связанной последовательности (третья группа).

Оптимальность взаимодействия эргатических и неэргатических элементов при выполнении рассматриваемых действий будем определять, как для нижнего уровня КФС, экстремальными требованиями к количественным показателям человеко-машинной среды: вероятностью безошибочного выполнения, временем и стоимостью выполнения. Аналогичным образом для формализованного описания этих требований введем следующие альтернативные переменные [12]:

$$x_n = \begin{cases} 1, \text{ если } n - \text{й эргатический элемент выполняет} \\ \text{действие, относящееся к первой группе} \\ 0, \text{ в противном случае, } n = \overline{1, N}; \end{cases} \quad (27)$$

$$y_n = \begin{cases} 1, \text{ если } n - \text{й эргатический элемент выполняет} \\ \text{действие, относящееся ко второй группе} \\ 0, \text{ в противном случае, } n = \overline{1, N}; \end{cases} \quad (28)$$

$$z_n = \begin{cases} 1, \text{ если } n - \text{й эргатический элемент выполняет} \\ \text{действие, относящееся к третьей группе} \\ 0, \text{ в противном случае, } n = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (29)$$

При этом сохраняется условие (4).

Условия оптимальности в виде экстремальных требований к альтернативным переменным (27)-(29) запишем следующим образом с учетом моделей [8]: по вероятности безошибочного выполнения действий

$$\Psi_1(x_n) = \prod_{n=1}^N \pi_{nd_1} x_n \rightarrow \max_{x_n}, \quad (30)$$

$$\Psi_2(y_n) = \prod_{n=1}^N [1 - (1 - \pi_{d_2})^2] y_n \rightarrow \max_{y_n}, \quad (31)$$

$$\Psi_3(z_n) = \prod_{n=1}^N (\pi_{d_3})^3 z_n \rightarrow \max_{z_n}, \quad (32)$$

где π_{nd_1} , π_{nd_2} , π_{nd_3} – вероятности безошибочного выполнения n -м эргатическим элементом действий, соответственно первой, второй и третьей группы;

$$\Psi_4(x_n) = \sum_{n=1}^N t_{nd_1} x_n \rightarrow \min_{x_n}, \quad (33)$$

$$\Psi_5(y_n) = \sum_{n=1}^N t_{nd_2} y_n \rightarrow \min_{y_n}, \quad (34)$$

$$\Psi_6(z_n) = \sum_{n=1}^N t_{nd_3} z_n \rightarrow \min_{z_n}, \quad (35)$$

где t_{nd_1} , t_{nd_2} , t_{nd_3} – время выполнения n -м эргатическим элементом действий соответственно первой, второй и третьей группы;

$$\Psi_7(x_n) = \sum_{n=1}^N C_{nd_1} x_n \rightarrow \min_{x_n}, \quad (36)$$

$$\Psi_8(y_n) = \sum_{n=1}^N C_{nd_2} y_n \rightarrow \min_{y_n}, \quad (37)$$

$$\Psi_9(z_n) = \sum_{n=1}^N C_{nd_3} z_n \rightarrow \min_{z_n}, \quad (38)$$

где C_{nd_1} , C_{nd_2} , C_{nd_3} – стоимость выполнения n -м эргатическим элементом действий соответственно первой, второй, третьей группы.

Условия оптимальности (33)-(38) по характеру экстремальных требований отличается от условий (5)-(13). Однако, совпадение по характеру альтернативных переменных (27)-(29) и (1)-(3), а также по условию (4) позволяют для поиска оптимального решения использовать алгоритмическую процедуру, приведенную выше, по пунктам 1-10.

В результате получаем оптимальное решение по выполнению эргатическими элементами действий на верхних уровнях КФС.

Заключение

Оптимизация человеко-машинной среды управления организацией с применением киберфизической системы достигается решением двух задач, определяющих эффективное взаимодействие эргатических элементов с элементами физической и вычислительной среды.

Первая задача в формализованном виде является задачей многокритериальной оптимизации на множестве альтернативных переменных, разделяющих эргатические элементы для выполнения трех функций нижнего уровня архитектуры киберфизической системы.

Вторая задача в формализованном виде является тоже задачей многокритериальной оптимизации на множестве альтернативных переменных, разделяющих эргатические элементы для выполнения трех групп действий верхних уровней архитектуры киберфизической системы.

Для решения обеих оптимизационных задач используется алгоритм, основанный на совмещении рандомизированного поиска и экспертного оценивания. Также совмещение осуществляется как при привлечении экспертов для многокритериального выбора, так и для реализации внутреннего цикла направленного перебора по вероятностным характеристикам альтернативных переменных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вайл П., Ворнер С. Цифровая трансформация бизнеса. *Изменения бизнес-модели для организации нового поколения*. М.: Альпина Паблицер; 2019. 257 с.
2. Алексеева Т.В., Америци Ю.В., Лузетский М.Г. *Информационно-аналитические системы*. М.: МФПА; 2005. 214 с.
3. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Синягов С.А. Киберфизические системы – основа цифровой экономики. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(2)18–25.
4. Белов В.С. *Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения*. М.: МЭСИ; 2003. 111 с.
5. Гумеров Э.А., Алексеева Т.В. Киберфизические системы промышленного интернета вещей. *Прикладная информатика*. 2021;16(2):72–81.
6. Сенько А. *Работа с BigData в облаках*. СПб.: Питер; 2019. 448 с.
7. Львович Я.Е. (ред.) *Оптимизация цифрового управления в организационных системах: коллективная монография*. Воронеж: ИПЦ «Научная книга»; 2021. 191 с.
8. Губинский А.И., Евграфов В.Г. (ред.). *Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование. проектирование, испытания: Справочник*. М.: Машиностроение; 1993. 527 с.
9. 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://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1374>. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.031.
10. Ватаманюк И.В., Савельев А.И., Левоневский Д.К., Малов Д.А., Яковлев Р.Н. *Модели и способы взаимодействия пользователя с киберфизическим интеллектуальным пространством: Монография*. СПб.: Издательство «Лань»; 2019. 176 с.
11. 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.
12. Львович Я.Е. *Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения*. Воронеж: Кварта; 2006. 415 с.
13. Львович Я.Е., Львович И.Я. *Принятие решений в экспертно-виртуальной сфере*. Воронеж: ИПЦ “Научная книга”; 2010. 140 с.
14. 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.
15. Соболев И.М. *Численные методы Монте-Карло*. М.: Наука; 1973. 312 с.

REFERENCES

1. Weill P., Woerner S. *Digital transformation of business. Changing the business model for the next-generation enterprise*. Moscow, Alpina Publisher; 2019. 257 p. (In Russ.).
2. Alekseeva T.V., Ameridi Yu.V., Luzhetskii M.G. *Information analysis systems*. Moscow, MPhPA; 2005. 214 p. (In Russ.).
3. Kupriyanovsky V.P., Namiot D.Ye., Sinyagov S.A. Cyber-physical systems as a base for digital economy. *International Journal of Open Information Technologies*. 2016;4(2)18–25. (In Russ.).
4. Belov V.S. *Information analysis systems. Foundations of design and application*. Moscow, MESI; 2003. 111 p. (In Russ.).

5. 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.).
6. Sen'ko A. *BigData management in clouds*. Saint-Petersburg, Peter; 2019. 448 p. (In Russ.).
7. 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.).
8. Adamenko A.N. et al. *Data management human-machine systems: research, design, trial: a reference book*. Moscow, Mashinostroenie; 1993. 527 p. (In Russ.).
9. 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.).
10. Vatamanyuk I.V., Savel'ev A.I., Levonevskii D.K., Malov D.A., Yakovlev R.N. *Models and means of user interaction with cyber-physical intellectual space: a monograph*. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo “Lan”; 2019. 176 p. (In Russ.).
11. 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.).
12. Lvovich Ya.E. *Multialternative optimization: theory and applications*. Voronezh, Kvarta; 2006. 415 p. (In Russ.).
13. Lvovich Ya.E. Lvovich I.Ya. *Decision-making in expert and virtual environment*. Voronezh, IPTs “Nauchnaya kniga”; 2010. 140 p. (In Russ.).
14. 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.).
15. Sobol I.M. *Numerical Monte Carlo methods*. Moscow, Nauka; 1973. 312 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 технологий, Воронеж, Российская Федерация. Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.
e-mail: vv-ermolova@vvt.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 25.04.2023; одобрена после рецензирования 05.06.2023; принята к публикации 07.07.2023.

The article was submitted 25.04.2023; approved after reviewing 05.06.2023; accepted for publication 07.07.2023.