

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.48.1.043](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.043)

Оптимизация управления функцией выполнения заказов потребителей в цифровизированной организационной системе их взаимодействия с производителями

Я.Е. Львович, Ю.П. Преображенский, А.Н. Пупыкин✉

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается применение оптимизационного подхода при принятии управленческого решения в цифровизированной организационной системе выполнения заказов потребителей. Показано, что при построении модели взаимодействия потребителей с производителями следует учитывать характеристики элементов человеко-машинной среды. Такой учет позволяет осуществлять оптимизацию управления взаимодействием эргатических и неэргатических элементов по показателям: производительность, надежность, стоимость. Формирование оптимизационной модели основано на введении альтернативных переменных, характеризующих выбор количества эргатических элементов, взаимодействующих с определенным неэргатическим. В качестве экстремального требования рассматривается требование максимизации производительности процесса выполнения заказов потребителей в цифровизированной организационной системе, в качестве граничных требований рассматриваются заданные уровни надежности и затрат. Осуществим переход к эквивалентной оптимизируемой функции без ограничений. Алгоритмическая процедура принятия управленческих решений ориентирована на структуру эквивалентной оптимизируемой функции и включает ряд этапов, связанных с автоматической генерацией допустимых решений в рандомизированной среде, итерационный режим настройки переменных, проверка условия останова итерационного процесса и экспертного выбора окончательного варианта решения.

Ключевые слова: организационная система, цифровизация, управление, человеко-машинная среда, оптимизация, экспертное оценивание.

Для цитирования: Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Пупыкин А.Н. Оптимизация управления функцией выполнения заказов потребителей в цифровизированной организационной системе их взаимодействия с производителями. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1845> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.043.

Optimization of consumer order fulfillment management in a digitalized organizational system of interaction with producers

Ya.E. Lvovich, Yu.P. Preobrazhensky, A.N. Pupykin✉

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. The article explores the application of an optimization approach in managerial decision-making within a digitalized organizational system for consumer order fulfillment. It is demonstrated that when constructing a model of interaction between consumers and producers, the characteristics of human-machine environment elements must be taken into account. Such consideration enables the optimization of management in the interaction between ergatic and non-ergatic elements based on performance, reliability, and cost indicators. The formation of the optimization model is based on the introduction of alternative variables characterizing the choice of the number of ergatic elements interacting with a specific non-ergatic element. The extremal requirement considered is the maximization of the performance of the consumer order fulfillment process in the digitalized organizational system, while the boundary requirements are the specified levels of reliability and costs.

A transition to an equivalent unconstrained optimization function is implemented. The algorithmic procedure for managerial decision-making is oriented towards the structure of the equivalent optimization function and includes several stages: automatic generation of feasible solutions in a randomized environment, iterative settings of variables, verification of the stopping condition for the iterative process, and expert selection of the final solution.

Keywords: organizational system, digitalization, management, human-machine environment, optimization, expert evaluation.

For citation: Lvovich Ya.E., Preobrazhensky Yu.P., Pupykin A.N. Optimization of consumer order fulfillment management in a digitalized organizational system of interaction with producers. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1845> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.043

Введение

На современном этапе реализации нового технологического уклада «Индустрия 4.0» неотъемлемыми инструментами управления в организационных системах стали цифровые сервисы и платформы [1–4]. Интенсификация их использования приводит к формированию цифровизированных организационных систем [5]. Широкое распространение этот класс систем приобретает при управлении процессами взаимодействия производителей и потребителей товаров [2].

Повышение эффективности таких процессов основано на разработке проблемно ориентированных формализованных описаний, учитывающих не только материальные и человеческие компоненты, как это принято в теории управления организационными системами¹, но и характеристики информационных потоков. В [6] получено проблемно ориентированное формализованное описание в форме оптимизационных моделей для процесса управления информационными потоками при цифровом трансфере производителей и заказов потребителей. Однако эта модель не полностью охватывает все аспекты рассматриваемой цифровизированной организационной системы. В ней рассматривается зависимость показателей эффективности только от параметров информационных потоков. Кроме того, она ориентирована только на одну функцию цифрового взаимодействия – формирование заказов потребителей на основе предложений производителей, что на практике характерно для функционирования электронных торговых площадок [7].

Другой функцией рассматриваемой организационной системы является функция выполнения заказов потребителей, цифровизация которой реализуется в рамках электронной коммерции². При управлении взаимодействием производителей и потребителей с целью реализации указанной функции возникает необходимость учитывать не только характеристики информационной среды, но и влияние человеческого ресурса при сборке по цифровому двойнику заказа его материальных компонентов. Указанная интеграция влияния информационного и человеческого ресурсов приводит к необходимости построения формализованного описания в рамках человеко-машинной среды. В [8] показано, что формализация человеко-машинной среды цифровизации основана на оптимизационном моделировании эффективности взаимодействия эргатических элементов (человеческого ресурса) и неэргатических элементов (компонентов информационной системы) по ряду показателей: производительность, надежность, стоимость. Однако, указанная модель не ориентирована на особенности цифровизированной организационной системы при реализации функции выполнения заказов потребителей.

¹ Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. Москва: Ленанд; 2024. 500 с.

² Юрасов А.В. Основы электронной коммерции. Москва: Горячая линия-Телеком; 2008. 480 с.

Поэтому целью статьи является оптимизация управления цифровизированным выполнением заказов потребителей в человеко-машинной среде их взаимодействия с производителями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать оптимизационную модель интеграции эргатических и неэргатических элементов при цифровизированном выполнении заказов потребителей;
- предложить алгоритмическую процедуру принятия управленческого решения на основе оптимизационной модели.

Оптимизационная модель интеграции эргатических и неэргатических элементов

Эффективность реализации функции выполнения заказов потребителей в цифровизированной организационной системе их взаимодействия с потребителями зависит от эффективности деятельности следующих составляющих:

- управленческого центра;
- потребителей;
- локальных агрегаторов заказов потребителей;
- производителей.

Роль управляющего центра в цифровизированной системе играет цифровая платформа взаимодействия перечисленных выше составляющих. Потребители используют цифровые сервисы локальных агрегаторов и формируют заказ товаров с указанием производителя и адреса доставки, что отражается в цифровой платформе управляющего центра. Производители представляются эргатическими элементами, осуществляющими сборку заказа на складах с учетом отражения на окончательных устройствах (неэргатических элементах) цифрового двойника заказа, сформированного в рамках цифровой платформы управляющего центра.

Завершающим этапом с участием эргатических элементов является перемещение материальных потоков со склада производителей в пункты получения заказов потребителем с использованием цифровой логистики платформы управляющего центра.

Для построения оптимизационной модели интеграции эргатических и неэргатических элементов данной цифровизированной организационной системы введем следующие исходные данные:

$i = \overline{1, I}$ – нумерационное множество производителей [6];

$r_i = \overline{1, R_i}$ – нумерационное множество неэргатических элементов (оконечных устройств) на складе i -го производителя;

$w_{ri} = \overline{1, W_{ri}}$ – нумерационное множество эргатических элементов, взаимодействующих с r_i -м неэргатическим элементом;

$u = \overline{1, U}$ – нумерационное множество локальных агрегаторов;

t_{wziu} – среднее время, затрачиваемое w -м эргатическим элементом, связанным с r -м неэргатическим элементом i -го производителя и доставку заказа в пункт получения u -го локального агрегатора;

q_{ri}^H – вероятность ошибки r -го неэргатического элемента i -го производителя;

q_{wriu}^λ – вероятность ошибки w -го эргатического элемента, связанного с r -м неэргатическим элементом i -го производителя и u -м локальным агрегатором;

z_{wriu}^λ – затраты на функционирование w -го эргатического элемента, связанного с r -м неэргатическим элементом i -го производителя и u -м локальным агрегатором.

Управленческое решение, принимаемое в рамках задачи оптимизации направлено на выбор такого количества эргатических элементов W_{ri} , взаимодействующих с r_i -м неэргатическим элементом, которое обеспечивает выполнение экстремальных и

граничных требований к показателям эффективности рассматриваемой цифровизированной организационной системы: производительность, надежность, затраты.

Сформируем модели для вычисления зависимости этих показателей при заданных исходных данных. Производительность будем характеризовать интенсивностью выполнения заказов

$$\mu = \frac{1}{T^{\max}}, \quad (1)$$

где T^{\max} – максимальное время, затраченное на выполнение заказа при взаимодействии эргатических и неэргатических элементов:

$$T^{\max} = \max_{i=\overline{1, I}, r_i=\overline{1, R_i}, w_{ri}=\overline{1, W_{ri}}, u=\overline{1, U}} t_{wzi u}. \quad (2)$$

Модель надежности основана на вычислении количественных характеристик соединения неэргатических и эргатических элементов при исходных данных $q_{ri}^H, q_{wriu}^\lambda$ [9]:

$$Q_{iu} = 1 - \prod_{r_i=1}^{R_i} \left[(1 - q_{ri}^H) \prod_{w_{ri}=1}^{W_{ri}} (1 - q_{wriu}^\lambda) \right]. \quad (3)$$

В качестве оценки надежности цифровизированной организационной системы в целом выбирается максимальное значение (3) на множествах $i = \overline{1, I}, u = \overline{1, U}$:

$$Q = \max_{i=\overline{1, I}, u=\overline{1, U}} Q_{iu}. \quad (4)$$

Величина затрат на функционирование всей системы является аддитивной функцией исходных данных по затратам z_{wriu}^λ :

$$Z = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^I \sum_{r_i=1}^{R_i} \sum_{w_{ri}=1}^{W_{ri}} z_{wriu}^\lambda. \quad (5)$$

Значение показателей эффективности (2), (4), (5) зависит от количества эргатических элементов, взаимодействующих с r_i -м неэргатическим элементом – W_{ri} . Для построения оптимизационной модели эти зависимости представим с использованием альтернативных переменных:

$$x_{wri} = \begin{cases} 1, & \text{если } w_{ri} = w_{ri}^x \\ 0, & \text{в противном случае, } w_{ri} = \overline{1, W_{ri}} \end{cases} \quad (6)$$

где w_{ri}^x – оптимальное количество эргатических элементов, взаимодействующих с r_i -м неэргатическим элементом.

В результате получаем следующие формализованные описания показателей эффективности исследуемой системы:

$$\mu = \psi_1(x_{wri}), \quad Q = \psi_2(x_{wri}), \quad Z = \psi_3(x_{wri}). \quad (7)$$

Установим экстремальные и граничные требования к (7): требуется максимизировать интенсивность выполнения заказов при заданных предельных значениях надежности Q^0 и затрат Z^0 . Эти требования отразим в оптимизационной модели:

$$\begin{aligned} \psi_1(x_{wri}) &\rightarrow \max_{x_{wri}}, \\ \psi_2(x_{wri}) &\leq Q^0, \quad \psi_3(x_{wri}) \leq Z^0, \\ x_{wri} &= \begin{cases} 1, & w_{ri} = \overline{1, W_{ri}} \\ 0, & \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Алгоритмизация принятия управленческих решений на основе задачи многоальтернативной оптимизации (8) осуществляется с использованием эквивалентной оптимизируемой функции без ограничений [9]:

$$Y(x_{wri}) = \max_{x_{wri}} \min_{y_1, y_2 \geq 0} \left[\psi_1(x_{wri}) + y_1 (Q^o - \psi_2(x_{wri}) + y_2 (Z^o - \psi_2(x_{wri}))) \right], \quad (9)$$

где $y_1 \geq 0, y_2 \geq 0$ – штрафные коэффициенты.

Алгоритмическая процедура принятия управленческого решения на основе оптимизационной модели

Принятие управленческого решения в соответствии с оптимизируемой функцией (9) основывается на поиске оптимальных значений альтернативных переменных (6) и штрафных коэффициентов $y_1^*, y_2^* \geq 0$. При этом оптимальное решение на множестве альтернативных переменных представим векторами

$$X_{ri}^* = (x_{1ri} = 0, x_{2ri} = 0, \dots, x_{w_{ri}^*} = 1, \dots, x_{wri} = 0), \quad r_i = \overline{1, R_i}. \quad (10)$$

Алгоритмическую процедуру поиска (10) построим путем объединения следующих этапов:

- автоматической генерации векторов (10) в рандомизированной среде;
- итерационный режим настройки характеристик вероятностной среды;
- итерационный режим настройки штрафных коэффициентов;
- проверки условий останова итерационного процесса;
- экспертного выбора окончательного варианта решения.

Автоматическая генерация векторов (10) в рандомизированной среде достигается за счет введения вероятностных характеристик следующих рандомизированных величин:

$$\tilde{i} = \overline{1, I} \quad p_i = P(\tilde{i} = i), \sum_{i=1}^I p_i = 1, \quad (11)$$

$$\tilde{r}_i = \overline{1, R_i} \quad p_{ri} = P(\tilde{r}_i = r_i), \sum_{r_i=1}^{R_i} p_{ri} = 1, \quad (12)$$

$$\tilde{w}_{ri} = \overline{1, W_{ri}} \quad p_{wri} = P(\tilde{w}_{ri} = w_{ri}), \sum_{w_{ri}=1}^{W_{ri}} p_{wri} = 1, \quad (13)$$

$$\tilde{x}_{wri} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad p_{xwri} = P(\tilde{x}_{wri} = 1), \quad q_{xwri} = P(x_{wri} = 0), \quad p_{xwri} + q_{xwri} = 1, \quad (14)$$

где $P(\cdot)$ – обозначение оператора вероятности события; \sim – обозначение случайной величины.

В соответствии с распределениями (11)–(13) генерация осуществляется путем сравнения значений нарастающей суммы вероятностей 1, 2 и т. д. слагаемых со значениями из последовательности псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на интервале $[0, 1]$ [10]. Для распределения (14) генерируется случайное число и определяется

$$x_{wri} = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{\varepsilon} \leq p_{wri} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Итерационный режим построения вероятностных характеристик (11)–(14) состоит в определении значений вероятностей на $(k + 1)$ итерации при известных значениях на k -й итерации, где $k = 1, 2, \dots, K$ – номер итерации. При $k = 1$ приемлемо использовать равномерное распределение

$$p_i^1 = \frac{1}{I}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (15)$$

$$p_{ri}^1 = \frac{1}{R_i}, \quad r_i = \overline{1, R_i}, \quad (16)$$

$$p_{wri}^1 = \frac{1}{W_{ri}}, \quad w_{ri} = \overline{1, W_{ri}}, \quad (17)$$

$$p_{xwri}^1 = 0,5, \quad q_{xwri}^1 = 0,5. \quad (18)$$

Предлагается распределение (15), (16) использовать на весь период итерационного процесса, а (17), (18) настраивать по случайным вариациям оптимизируемой функции (9):

$$\begin{aligned} \Delta\widetilde{\varphi}^k = & \psi_1 \left(\widetilde{X}_1^k = (x_{1ri} = 0, x_{2ri} = 0, \dots, x_{w'ri} = 1, \dots, x_{wri} = 0) \right) + \\ & + y_1^k \left(Q^o - \psi_2(\widetilde{x}_1^k) \right) + y_2^k \left(Z^o - \psi_3(\widetilde{X}_1^k) \right) - \\ & - \psi_1 \left(\widetilde{X}_2^k = (x_{1ri} = 0, x_{2ri} = 0, \dots, x_{w'ri} = 0, \dots, x_{w''ri} = 1, \dots, x_{wri} = 0) \right) + \\ & + y_1^k \left(Q^o - \psi_2(X_2^k) \right) + y_2^k \left(Z^o - \psi_3(\widetilde{X}_2^k) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Для вычисления трех реализаций (19) на каждой реализации по распределению (15) выбирается значение i , для которого по распределению (16) выбирается значение r_i , для которого на основе распределений p_{wri}^k и p_{xwri} выбираются значения w'_{ri} и w''_{ri} . Имеем: $\Delta\widetilde{\varphi}_1^k, \widetilde{\Delta\varphi}_2^k, \widetilde{\Delta\varphi}_3^k$. Эти реализации используются для вычисления значений $p_{wri}^{k+1}, p_{xwri}^{k+1}$.

Вычисление (10) требует настройки на каждой итерации штрафных коэффициентов [9]:

$$y_1^{k+1} = \max \left[0, y_1^k - \gamma_1 \left(Q^o - \psi_2(x_{wri}^k) \right) \right],$$

$$y_2^{k+1} = \max \left[0, y_2^k - \gamma_2 \left(Z^o - \psi_3(x_{wri}^k) \right) \right],$$

где γ_1, γ_2 – коэффициенты, характеризующие шаг движения в изменении штрафных коэффициентов от k к $k + 1$ итерации и задаваемые при $k = 1$.

Для выработки условия останова итерационного процесса предлагается ориентироваться на динамику вероятностных характеристик (14). С этой целью зададим окрестность значения вероятности $p_{xwri} = 1$ малой величиной $\varepsilon > 0$:

$$p_{xwri}^k \geq 1 - \varepsilon. \quad (20)$$

Примем, что число координат вектора (10), удовлетворяющих (20) и необходимых альтернативности последующего выбора окончательного варианта должно обеспечивать 3 параллельных опыта автоматической генерации (10) – $\lambda_{ri} = 3, r_i = \overline{1, R_i}$. Тогда условие останова определяется оценкой

$$\lambda_{ri} (p_{xwri}^k \geq 1 - \varepsilon) = 3, r_i = \overline{1, R_i}. \quad (21)$$

В случае выполнения условия (21) на K -й итерации проводим генерацию 3–5 вариантов на основе значений вероятностей p_{xwri}^K и с использованием экспертного оценивания выбираем окончательный вариант [11]:

$$x_{w^{x_{ri}}}, \quad r_i = \overline{1, R_i},$$

где w_{ri}^x – оптимальное количество эргатических элементов, взаимодействующих с r_i -м неэргатическим элементом в цифровизированной организационной системе выполнения заказов потребителей.

Заключение

В цифровизированных организационных системах выполнения заказа потребителей оптимизация управления состоит в выборе количества эргатических элементов человеческого ресурса, взаимодействующих с неэргатическими компонентами цифровой платформы, с целью максимизации производительности системы при заданных требованиях к надежности системы и затратам на ее функционирование.

Оптимизационное моделирование процесса управления базируется на зависимостях показателей эффективности от альтернативных переменных, определяющих выбор оптимального количества эргатических элементов, взаимодействующих с неэргатическими.

Алгоритмизация принятия управленческих решений с использованием оптимизационной модели включает в себя несколько взаимосвязанных этапов: автоматическая генерация вариантов решений, итерационный режим настройки вероятностных характеристик альтернативных переменных и штрафных коэффициентов, проверка выполнения условия останова, экспертный выбор окончательного решения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Глущенко В.В. Научная теория технологических укладов и исследование направлений ее практического применения. *Бюллетень науки и практики*. 2020;6(4):488–504.
Glushchenko V. Scientific theory of technological structures and research directions of its practical application. *Bulletin of Science and Practice*. 2020;6(4):488–504. (In Russ.).
2. Вайл П., Ворнер С. *Цифровая трансформация бизнеса. Изменение бизнес-модели для организации нового поколения*. Москва: Альпина Паблишер; 2019. 264 с.
Weill P., Woerner S. *What's Your Digital Business Model?: Six Questions to Help You Build the Next-Generation Enterprise*. Moscow: Alpina Publisher; 2019. 264 p. (In Russ.).
3. Гретченко А.И., Горохова И.В. Цифровая платформа: новая бизнес-модель в экономики России. *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. 2019;(1):62–72. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2019-1-62-72>
Gretchenko A.I., Gorokhova I.V. Digital Platform: a New Business Model in the Russian Economy. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2019;(1):62–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2019-1-62-72>
4. Мрочковский Н.С., Ляндау Ю.В., Пушкин И.С., Кривоногов Е.А. Основные тенденции цифровой трансформации бизнеса. *Экономика и предпринимательство*. 2019;(4):89–91.
Mrochkovsky N.S., Lyandau Yu.V., Pushkin I.S., Krivonogov E.A. Main tendencies of digital transformation of business. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2019;(4):89–91. (In Russ.).
5. Рындин Н.А. Алгоритмизация процесса многовариантной структуризации в цифровизированных организационных системах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.005>
Ryndin N.A. Algorithmization of the multivariate structuring process in digitalized organizational systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.005>

6. Львович Я.Е., Пупыкин А.Н. Интеллектуализация управления в организационных системах с цифровым концентратором результатов деятельности на основе оптимизационного моделирования. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.018>
Lvovich Ya.E., Pupykin A.N. Intellectualization of management in organizational systems with a digital hub of performance results based on optimization modeling. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.018>
7. Селезнева М.П. Электронные аукционы в условиях цифровой трансформации. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2021;(11-1):197–199. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-11-1-197-199>
Selezneva M.P. Electronic auctions in the conditions of digital transformation. *Journal of Economy and Business*. 2021;(11-1):197–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2021-11-1-197-199>
8. Ермолова В.В., Львович Я.Е., Преображенский Ю.П. Оптимизация взаимодействий компонентов человеко-машинной системы цифровизации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.031>
Yermolova V.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P. Optimizing interaction of the components in a human-machine system of digitalization. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.031>
9. 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.
10. Соболев И.М. *Численные методы Монте-Карло*. Москва: Наука; 1973. 312 с.
11. Львович И.Я. *Принятие решений на основе оптимизационных моделей и экспертной информации*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2023. 232 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: office@vvt.ru

ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

Преображенский Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: petrovich@vvt.ru

ORCID: [0000-0002-9021-5106](https://orcid.org/0000-0002-9021-5106)

Пупыкин Алексей Николаевич, аспирант, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: mymailvrn98@gmail.com

Yakov E. Lvovich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Yuri P. Preobrazhenskiy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Alexey N. Pupykin, Postgraduate, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025;
принята к публикации 28.03.2025.*

*The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 24.03.2025;
accepted for publication 28.03.2025.*