

УДК 68/3

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.030](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.030)

Анализ и оптимизация эффективности функционирования организационной системы с автоматизированными устройствами обслуживания на основе имитационного моделирования

А.Ю. Бакулин✉, Я.Е. Львович

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается подход к анализу и оптимизации эффективности сетевых организационных систем в условиях активизации процессов автоматизации и цифровизации. Выделен класс организационных систем с автоматизированными устройствами обслуживания, результатом деятельности которых является выполнение услуг. Включение в сетевую структуру сервисных автоматов определяет особенность решения задач анализа и оптимизации. Анализ базируется на имитационном моделировании исследуемого класса систем как систем массового обслуживания с варьируемой топологией каналов обслуживания. Поэтому оптимизируемыми переменными определены альтернативные переменные, характеризующие компоненты топологии, которые связаны с дублированием как компонентов, так и автоматизированных устройств в целом. К этим переменным добавлены переменные, влияющие на лояльность клиентов за счет предоставления скидок в определенные временные периоды. Оптимизационная модель представляет собой объединение формализованных описаний зависимостей от оптимизируемых переменных экстремального и граничных требований. В качестве экстремального требования определена необходимость максимизации дохода, а граничных – временные характеристики, связанные с временем простоя автоматизируемых устройств и временем простоя обслуживания. Алгоритмизация принятых решений по варианту топологии сетевой системы и механизму повышения лояльности клиента основана на объединении трех составляющих итерационного процесса поиска: анализа исследуемой организационной системы с использованием имитационной модели; имитацией направленного перебора при случайных значениях альтернативных переменных; окончательного выбора на множестве перспективных вариантов путем экспертного оценивания. Предложена структурная схема алгоритма, базирующегося на интеграции перечисленных составляющих.

Ключевые слова: организационная система, автоматизированные устройства обслуживания, имитационное моделирование, анализ, оптимизация, экспертное оценивание.

Для цитирования: Бакулин А.Ю., Львович Я.Е. Анализ и оптимизация эффективности функционирования организационной системы с автоматизированными устройствами обслуживания на основе имитационного моделирования. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1567> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.030

Analysis and optimization of organizational system functioning efficiency with automated service devices on the basis of simulation modeling

A.Yu. Bakulin✉, Ya.E. Lvovich

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract: The article considers the approach to the analysis and optimization of the efficiency of network organizational systems in the conditions of intensification of automation and digitalization processes. The class of organizational systems with automated service devices, the result of whose activity is the performance of services, is singled out. The inclusion of service automata in the network structure determines the peculiarity of solving analysis and optimization problems. The analysis is based on simulation modeling of the studied class of systems as mass service systems with varying topology of service channels. Therefore, alternative variables characterizing topology components, which are related to duplication of both components and automated devices as a whole, are defined as optimizable variables. To these variables are added variables affecting customer loyalty by providing discounts in certain time periods. The optimization model is a combination of formalized descriptions of dependencies on the optimized variables of extreme and boundary requirements. As an extreme requirement the necessity of maximizing the income is defined, and the boundary requirements are the time characteristics related to the downtime of the automated devices and service downtime. Algorithmization of the decisions made on the variant of the network system topology and the mechanism for increasing customer loyalty is based on the combination of three components of the iterative search process: analysis of the organizational system under study using a simulation model; simulation of a directed enumeration at random values of alternative variables; final choice on the set of promising options by means of expert evaluation. The structural scheme of the algorithm based on the integration of the above components is proposed.

Keywords: organizational system, automated service devices, simulation modeling, analysis, optimization, expert evaluation.

For citation: Bakulin A.Yu., Lvovich Ya.E. Analysis and optimization of organizational system functioning efficiency with automated service devices on the basis of simulation modeling. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1567> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.030 (In Russ.).

Введение

Одним из распространенных классов организационных систем являются сетевые системы, в которых объединены объекты $O_i, i = \overline{1, I}$ с однородными видами деятельности для обеспечения эффективного функционирования по множеству показателей $f_j, j = \overline{1, J}$, требования к которым определяет управляющий центр [1]:

$$f_j(O_i) \geq f_j^{\text{тп}}, j = \overline{1, J}, i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

где $f_j^{\text{тп}}$ – требования к уровню показателей эффективности, устанавливаемые управляющим центром.

Активная автоматизация и цифровизация в бизнесе [2] приводит к тому, что деятельность объектов $O_i, i = \overline{1, I}$ осуществляется автоматизированными устройствами обслуживания. Особую значимость такая разновидность сетевых организационных систем

приобретает в сфере сервисного обслуживания, где результатом деятельности является услуга [3, 4]. Поэтому повышение эффективности функционирования организационных систем с автоматизированными устройствами обслуживания (ОСАУО) является актуальной задачей. Решение этой задачи направлено прежде всего на увеличение уровня лояльности клиентов, что обычно связано с временными и стоимостными показателями. С другой стороны, необходимо обеспечить запланированный уровень интегральных экономических показателей сетевой организационной системы. Структурирование интеграции сервисных автоматов в систему и планирование деятельности ОСАУО требует согласования требований управляющего центра (1) по всем перечисленным показателям. Для принятия согласованных управленческих решений в организационных системах используется оптимизационный подход, позволяющий наряду с полнофункциональной автоматизацией услуг обеспечить цифровое управление в ОСАУО [5, 6].

Основой применения оптимизационного подхода является построение формализованного описания объектов организационной системы, то есть математическая модель $O_i, i = \overline{1, I}$. В [5, 6] такая модель определяет оптимальные механизмы распределения ресурсов в соответствии с требованиями управляющего центра. При автоматизации в сфере услуг сервисные автоматы, определяющие функционирование объектов ОСАУО, целесообразно анализировать как систему массового обслуживания (СМО) [7], в которой результатом деятельности является преобразование потока заявок клиентов в канале обслуживания с последовательно-параллельной структурой. Традиционно СМО представляется имитационной моделью, с использованием которой осуществляется управление на основе выбора оптимальных интенсивностей обслуживания [8].

В случае ОСАУО управляющий центр планирует деятельность сетевой организационной системы, ориентируясь на управление структурными составляющими объектов O_i , что приводит к применению алгоритма многоальтернативной оптимизации [9]. В свою очередь алгоритмы многоальтернативной оптимизации позволяют сформировать множество приоритетных вариантов структур объектов O_i при их объединении в сеть. Окончательный выбор наилучшего варианта осуществляется с использованием экспертных оценок [10].

Необходимость совмещения анализа эффективности функционирования объектов $O_i, i = \overline{1, I}$ на основе имитационной модели СМО с оптимизацией сетевой организационной системы в целом определяет, что целью статьи является разработка интегрированного процесса принятия решений по повышению эффективности ОСАУО, объединяющего процедуры имитационного моделирования, многоальтернативной оптимизации и экспертного оценивания.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- формирование оптимизационной модели эффективного функционирования ОСАУО;
- алгоритмизация анализа и оптимизация эффективности функционирования ОСАУО.

Формирование оптимизационной модели эффективного функционирования ОСАУО

Первым этапом при формировании оптимизационной модели является установление варьируемых структурных компонентов объектов O_i , объединенных сетевым механизмом в ОСАУО, и их формализация в виде альтернативных оптимизируемых переменных [9].

Эти компоненты зависят от топологии последовательно-параллельного соединения автоматизированных устройств в объекте O_i . Может быть две разновидности топологий. Первая: параллельные каналы создаются для n -ого устройства, $n = \overline{1, N}$ с низкой интенсивностью обслуживания по сравнению с остальными, соединенными последовательно. Вариативность такой топологии определяется альтернативными переменными

$$x_{in} = \begin{cases} 1, \text{ если для } n \text{ – о го устройства } i \text{ – о го объекта} \\ \quad \text{вводится параллельный канал,} \\ 0, \text{ в противном случае, } i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (2)$$

Вторая: параллельный канал полностью дублирует последовательно-параллельное соединение устройств, обеспечивающих функционирование объекта O_i . Создание дублирующего канала определяется альтернативными переменными

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{ если для соединения устройств } i \text{ – о го объекта} \\ \quad \text{создается дублирующий канал,} \\ 0, \text{ в противном случае, } i = \overline{1, I}. \end{cases} \quad (3)$$

Кроме топологической вариативности на показатели эффективности влияет вариативность ценовой политики при выполнении услуг в ОСАУО, связанная с предоставлением скидок клиентам, которые обслуживаются i -ым объектом в определенный временной период суток $m = \overline{1, M}$. Этому вариативному компоненту соответствуют альтернативные переменные

$$z_{im} = \begin{cases} 1, \text{ если клиентам } i \text{ – о го объекта предоставляется} \\ \quad \text{скидка в } m \text{ – ый временной период,} \\ 0, \text{ в противном случае, } i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}. \end{cases} \quad (4)$$

На втором этапе формирования оптимизационной модели необходимо определить экстремальные и граничные требования в зависимости от оптимизируемых переменных (2)–(4). Управляющий центр заинтересован в максимизации прибыли за период времени T , как основного показателя эффективности функционирования исследуемой организационной системы в целом.

$$\psi(x_{in}, y_i, z_{im}) = \sum_{i=1}^I [d_i(T, x_{in}, y_i, z_{im}) - c_i(T, x_{in}, y_i, z_{im})] \rightarrow \max_{x_{in}, y_i, z_{im}}, \quad (5)$$

где d_i – доход i -ого объекта за период T ; c_i – затраты на функционирование i -ого объекта за период T .

Кроме требования (5), которое имеет экстремальный характер, управляющий центр выдвигает ряд граничных требований. С позиции эффективности функционирования ОСАУО в целом следует ограничить упущенный доход по причине простоя автоматизированных устройств.

$$\tau^{\text{пп}}(T, x_{in}, y_i, z_{im}) = \sum_{i=1}^I \tau_i^{\text{пп}}(T, x_{in}, y_i, z_{im}) \leq \hat{\tau}^{\text{пп}}, \quad (6)$$

где $\tau^{\text{пп}}$ – время простоя автоматизированных устройств для сетевой системы в целом; $\hat{\tau}^{\text{пп}}$ – граничное значение, установленное управляющим центром; $\tau_i^{\text{пп}}$ – время простоя автоматизированных устройств i -ого объекта.

Другая группа граничных требований связана с влиянием ряда показателей функционирования объектов на лояльность клиента. В данном случае таким показателем является время ожидания завершения обслуживания i -м объектом $\tau_i^{ож}$, $i = \overline{1, I}$, которое зависит от топологии i -ого объекта. Управляющий центр, ориентируясь на анализ лояльности клиентов, устанавливает ограничения на время ожидания $\hat{\tau}^{ож}$:

$$\tau_i^{ож}(T, x_{in}, y_i) \leq \hat{\tau}_{ож}, i = \overline{1, I}. \quad (7)$$

Объединяя экстремальное требование (5), граничные требования (6), (7) и требования к значениям альтернативных переменных (2)–(4), получаем следующую оптимизационную модель:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I [d_i(T, x_{in}, y_i, z_{im}) - c_i(T, x_{in}, y_i, z_{im})] \rightarrow \max_{x_{in}, y_i, z_{im}}, \\ \sum_{i=1}^I \tau_i^{np}(T, x_{in}, y_i, z_{im}) \leq \hat{\tau}^{np}, \\ \tau_i^{ож}(T, x_{in}, y_i) \leq \hat{\tau}_{ож}, i = \overline{1, I}, \\ x_{in} = \begin{cases} 1, & i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}, \\ 0 & \end{cases} \quad (8) \\ y_i = \begin{cases} 1, & i = \overline{1, I}, \\ 0 & \end{cases} \\ z_{im} = \begin{cases} 1, & i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}. \\ 0 & \end{cases} \end{aligned}$$

Алгоритмизация анализа и оптимизация эффективности функционирования ОСАУО

Основой анализа эффективности функционирования ОСАУО является имитационная модель СМО. Она позволяет генерировать в случайные моменты времени поступление заявок на обслуживание i -ым объектом и их прохождение через комплекс автоматизированных устройств. Имитация прохождения заявок за период времени T дает возможность автоматизировать изменение показателей, необходимых для организации поиска оптимального решения (8). Исходные данные для имитационного моделирования определяются на основе мониторинга функционирования реальных автоматизированных устройств обслуживания. К ним относятся:

λ_i – средняя интенсивность потока заявок клиентов за период времени T ;

λ_{im} – средняя интенсивность потока заявок клиентов i -ого объекта в m -ый период времени суток;

μ_{in} – средняя интенсивность обслуживания n -ым автоматизированным устройством i -ого объекта за период времени T ;

q_{in}^0 – вероятность отказа n -ого автоматизированного устройства i -ого объекта при аварийной ситуации.

С целью алгоритмизации процесса оптимизации предлагается интегрировать в цикл анализа на основе имитационной модели СМО цикл имитации направленного перебора, вариантов реализации ОСАУО за счет рандомизации множества альтернативных

переменных (2)–(4) [9]. Имитацию направленного перебора вариантов целесообразно проводить с использованием эквивалентной оптимизационной функции задачи (8) [7]:

$$\varphi(T, x_{in}, y_i, z_{im}) = \sum_{i=1}^I [d_i(T, x_{in}, y_i, z_{im}) - c_i(T, x_{in}, y_i, z_{im})] + \alpha \times \times (\hat{\tau}^{np} - \sum_{i=1}^I \tau_i^{np}(T, x_{in}, y_i, z_{im})) + \sum_{i=1}^I \alpha_i (\hat{\tau}^{ож} - \tau_i^{ож}(T, x_{in}, y_i)), \quad (9)$$

где $\alpha, \alpha_i \geq 0$ – коэффициенты, задаваемые экспертом в зависимости от значимости граничных требований для управляющего центра.

Имитация направленного перебора вариантов реализации ОСАУО осуществляется за счет случайного выбора значений оптимизируемых переменных (2)–(4) с настраиваемыми в итерационном решении распределений этих переменных [9]. При настройке распределений используют вариации оптимизируемой функции (5). С этой целью выбирают одну из переменных на множествах (2)–(4) и проводят анализ функционирования ОСАУО с использованием имитационной модели СМО и вычислением (9) для двух вариантов: значение выбранной переменной фиксируется равным 1, остальные переменные имеют случайные значения в соответствии с распределениями, настроенными на k ($k=1,2,\dots$) итерации; значения выбранной переменной фиксируется равным 0, остальные – имеют случайные значения. В зависимости от значений выбираемых переменных меняется структура моделируемой СМО, что приводит к разным значениям оптимизируемой функции (9). Так при $x_{in} = 1$ в структуре i -ого канала обслуживания вводится параллельный канал n -ого устройства, что меняет значения (5)–(7) в отличие от ситуации $x_{in} = 0$, когда дублирование n -ого устройства не осуществляется; $y_i = 1$ – в структуре СМО i -ый объект имеет параллельный канал, что сказывается на значениях (5)–(7) в отличие от $y_i = 0$, когда i -ый объект функционирует в одноканальном режиме: $z_{im} = 1$ – при моделировании СМО используются значения λ_{im} вместо α_i при вариации переменных x_{in}, y_i , что влияет на значения дохода и затрат в (5), доход зависит от интервала времени суток $m = \overline{1, M}$ и принимает значения d_{im} . Направленный перебор вариантов структуры СМО на основе анализа вариации оптимизируемой функции (4) позволяет за ограниченное число итераций, заданное в условии итерационного процесса, сформировать множество перспективных вариантов [9]. Третий этап алгоритмизации, связанный с окончательным принятием решения на множестве перспективных вариантов, предлагается осуществлять с использованием коллективного режима экспертного оценивания [10]. Структурная схема алгоритма анализа оптимизации эффективности функционирования ОСАУО приведена на Рисунке 1:

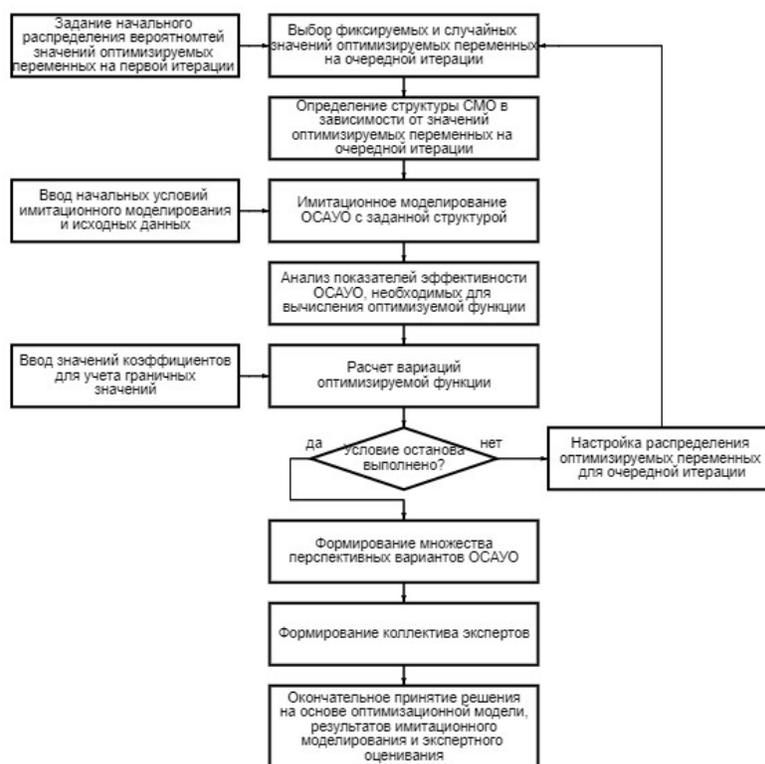


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма анализа и оптимизации эффективности функционирования OSAVO

Figure 2 –Structural scheme of the algorithm for analysis and optimization of the effectiveness of the ASAMS functioning

Заключение

В условиях активной автоматизации и цифровизации сферы услуг широкое распространение получили сетевые организационные системы с автоматизированными устройствами обслуживания. Эффективность функционирования таких систем в значительной мере зависит от топологии объединения сервисных автоматов в организационное целое на основе целей, определяемых управляющим центром.

Анализ и оптимизация эффективности организационных систем с автоматизированными устройствами обслуживания целесообразно проводить с использованием их имитационного моделирования как систем массового обслуживания. При этом для оптимизации используются результаты анализа по показателям эффективности за определенный временной период, характеризующим доход и время простоя автоматизированных устройств в рамках сетевой структуры. Повышение лояльности клиентов определяется возможностью сокращения времени ожидания обслуживания формализация этих показателей в виде зависимостей от альтернативных переменных для экстремальных и граничных требований являются основой для построения оптимизационной модели.

Принятие решений по топологии сетевой структуры организационной системы с автоматизированными устройствами обслуживания и механизму обслуживания клиентов приемлемо осуществлять за счет интеграции в едином итерационном цикле направленного

случайного поиска, использующего результаты анализа путем имитационного моделирования сетевой системы и коллективного экспертного выбора на множестве перспективных вариантов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Бурков В.Н., Кузнецов Н.А., Новиков Д.А. Механизмы управления в сетевых структурах. *Автоматика и телемеханика*. 2002;(12):96–115.
Burkov V.N., Kuznetsov N.A., Novikov D.A. Control Mechanisms in Network Structures. *Automation and Remote Control*. 2002;63(12):1947–1965. <https://doi.org/10.1023/a:1021695432453>
2. Вайл П., Ворнер С. *Цифровая трансформация бизнеса: Изменение бизнес-модели для организации нового поколения*. Москва: Альпина Паблишер; 2019. 257 с.
Weill P., Woerner S. *What's Your Digital Business Model?: Six Questions to Help You Build the Next-Generation Enterprise*. Harvard Business Review Press; 2018. 256 p.
3. Котляров И.Д. Автоматизация и самообслуживание в сфере услуг: попытка анализа. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право*. 2016;(4):32–36.
Kotliarov I. Automation and self-service in the field of services: an attempt at an analysis. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo = Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Economics and law*. 2016;(4):32–36. (In Russ.).
4. Шайдаков И.Е. Автоматизация процессов и внедрение дистанционного обслуживания клиентов – ключевые тенденции развития сферы услуг. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2016;(5):169–172.
Shaidakov I.E. Automation of processes and introduction of remote customer service – key trends of the service companies' development. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2016;(5):169–172. (In Russ.).
5. Львович Я.Е., Львович И.Я., Чопоров О.Н. и др. *Оптимизация цифрового управления в организационных системах*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2021. 191 с.
L'vovich Ya.E., L'vovich I.Ya., Choporov O.N. et al. *Optimizatsiya tsifrovogo upravleniya v organizatsionnykh sistemakh*. Voronezh: Publishing and Printing Center «Nauchnaya kniga»; 2021. 191 p. (In Russ.).
6. Рындин Н.А., Скворцов Ю.С., Тишуков Б.Н. *Цифровизация управления в организационных системах агропромышленных предприятий*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2022. 148 с.
Ryndin N.A., Skvortsov Yu.S., Tishukov B.N. *Tsifrovizatsiya upravleniya v organizatsionnykh sistemakh agropromyshlennykh predpriyatii*. Voronezh: Publishing and Printing Center «Nauchnaya kniga»; 2022. 148 p. (In Russ.).
7. 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.
L'vovich I.Ya., L'vovich Ya.E., Frolov V.N. *Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i optimizatsii. Kratkaya teoriya i prilozheniya*. Voronezh: Publishing and Printing Center «Nauchnaya kniga»; 2016. 444 p. (In Russ.).

8. Снапелев Ю.М., Старосельский В.А. *Моделирование и управление в сложных системах*. Москва: Советское радио; 1974. 264 с.
Snapelev Yu.M., Starosel'skii V.A. *Modelirovanie i upravlenie v slozhnykh sistemakh*. Moscow: Sovetskoe radio; 1974. 264 p. (In Russ.).
9. Львович Я.Е. *Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения*. Воронеж: Издательский дом «Кварта»; 2006. 415 с.
L'vovich Ya.E. *Mnogool'ternativnaya optimizatsiya: teoriya i prilozheniya*. Voronezh: Izdatel'skii dom «Kvarta»; 2006. 415 p. (In Russ.).
10. Львович И.Я. *Принятие решений на основе оптимизационных моделей и экспертной информации*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2023. 232 с.
L'vovich I.Ya. *Prinyatie reshenii na osnove optimizatsionnykh modelei i ekspertnoi informatsii*. Voronezh: Publishing and Printing Center «Nauchnaya kniga»; 2023. 232 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бакулин Александр Юрьевич, аспирант,
Воронежский институт высоких технологий,
Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: bakulin-aleksandr@mail.ru

Alexander Yu. Bakulin, Postgraduate Student,
Voronezh Institute of High Technologies,
Voronezh, the Russian Federation.

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)

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

*Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024;
принята к публикации 17.06.2024.*

*The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 21.05.2024;
accepted for publication 17.06.2024.*