

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-7-19

УДК 001



Научная статья | Системный анализ, управление и обработка информации

## ПРИМЕНЕНИЕ ИГРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

*Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский*

*Киберфизические системы (КФС), наряду с кибербиологическими и киберсоциальными системами, в последнее время становятся одним из ключевых элементов современных инфотелекоммуникационных систем. Интернет вещей, как революционная концепция прошлых нескольких лет, является фундаментальным понятием в контексте КФС. Однако, в отличие от Интернета вещей, выделяющего, в первую очередь, межмашинные соединения, концепция КФС основана на дуализме физической и кибернетической (информационной) сред. Обращаясь к прикладной области, следует отметить тенденцию к информатизации многих элементов окружающего мира. Степень проникновения варьируется от сенсоров, передающих информацию о состоянии живого организма, до точных моделей, описывающих текущее состояние элемента внутри умного производства. В данной работе рассматривается задача, связанная с управлением кибер-физическими системами в условиях, когда на них осуществляются различные случайные внешние воздействия. На основе теории игр в работе предлагается с учетом различных критериев проведение выбора управления. Рассмотрены примеры расчетов.*

**Ключевые слова:** системный анализ; киберфизическая система; теория игр; критерий

**Для цитирования.** Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П. Применение игровых моделей при управлении киберфи-

*зическими системами // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13, № 2. С. 7-19. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-7-19*

Original article | System Analysis, Management and Information Processing

## **APPLICATION OF GAME MODELS IN THE MANAGEMENT OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS**

***T.V. Avetisyan, J.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky***

*Cyber-physical systems (CPS), along with cyber-biological and cybersocial systems, have recently become one of the key elements of modern infotelecommunications systems. The Internet of Things, as a revolutionary concept of the past few years, is a fundamental concept in the context of SPS. However, unlike the Internet of Things, which primarily emphasizes machine-to-machine connections, the SPS concept is based on the dualism of physical and cybernetic (information) environments. Turning to the applied field, we should note the trend towards informatization of many elements of the world around us. The degree of penetration ranges from sensors transmitting information about the state of a living organism to precise models describing the current state of an element within a smart production. This paper deals with the problem related to the control of cyber-physical systems under conditions where various random external influences are exerted on them. On the basis of game theory, the paper proposes, taking into account various criteria, to carry out the choice of control. Examples of calculations are considered.*

**Keywords:** *system analysis; cyber-physical system; game theory; criterion*

**For citation.** *Avetisyan T.V., Lvovich J.E., Preobrazhensky A.P. Application of Game Models in the Management of Cyber-Physical Systems. International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 7-19. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-7-19*

## **Введение**

Сейчас разные разработки, связанные с кибер-физическими системами (КФС) активным образом внедряются в соответствующие сферы жизни и производства [1, 2]. В таких системах применяются сквозные информационно-коммуникационные и информационно-управляющие технологии. Это дает возможности для таких систем осуществлять активное взаимодействие с различными элементами окружающего физического мира.

В КФС за счет встраиваемых компьютеров совместным образом с сетевыми структурами происходит поддержка мониторинга и контроля за физическими процессами [3-5]. Среди КФС можно отметить «умные» сети, поддерживающие электроснабжение, системы, позволяющие поддерживать управление «умным» транспортом, автоматизированные системы управления в производстве и сельском хозяйстве, а также медицинское оборудование.

Активным образом технологии КФС применяются в «умных» городах. Следует понимать, что есть общие черты в архитектуре, если проводить сравнение интернет вещей и КФС.

Основная идея функционирования КФС основывается на том, что существует заметная взаимосвязь между их физическими и вычислительными элементами [6, 7]. После получения данных от датчиков они анализируются, и это применяется для того, чтобы вести управление физическими элементами. В этой связи КФС могут функционировать с учетом изменяющихся условий.

В данной работе рассматриваются возможности применения теории принятия решений для управления КФС.

## **Критерии принятия решения**

Критерий принятия решений может быть рассмотрен в виде функции, которая будет показывать предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР). На основе такого критерия будет определяться правило, в рамках которого происходит выбор приемлемого или оптимального вариант решения [8, 9].

Любое решение, когда учитываются условия, связанные неполной информацией, будет приниматься при учете соответствующих количественных характеристик ситуаций, при рассмотрении которых будут приниматься решения. В литературе по принятию решений рассматриваются и описываются разные критерии.

Такие критерии мы можем применять поочередным образом. После того, как проведены вычисления по нескольким вариантам, необходимо осуществлять выделение некоторого окончательного решения. Это дает возможности для того, чтобы изучить особенности принятия решений, а также провести ослабление влияния субъективных факторов [10].

### Моделирование кибер-физической системы

Внешних воздействий на КФС, которые являются случайными, может быть несколько, они образуют множество  $V$ . Пусть в рассматриваемом случае их три, то есть рассматривается три элемента множества  $v_1, v_2, v_3$ . Множество управлений в КФС  $U$ . Пусть в рассматриваемом случае в нем четыре элемента:  $u_1, u_2, u_3, u_4$ . Схема КФС приведена на рисунке 1 Управление определяется тем, как будут приниматься решения.

С тем, чтобы осуществлять эффективное управление, его необходимо делать по месту нахождения объекта воздействия, чтобы повышать безопасность компьютерных сетей [11].

Матрицу вероятностей  $A$ , которая показывает успешность управления кибер-физической системой, мы запишем следующим образом [8, 9]:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.21 & 0.31 & 0.16 \\ 0.76 & 0.21 & 0.36 \\ 0.26 & 0.81 & 0.26 \\ 0.86 & 0.06 & 0.46 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

То есть, если будет применяться управление  $u_3$  и на кибер-физическую систему будет оказываться воздействие  $v_2$ , тогда с ве-

роятностью 0.81 такое управление позволит максимально эффективное управление этой системой. Такой же смысл имеют другие элементы представленной матрицы.



Рис. 1. Иллюстрация типовой топологии КФС

Необходимо принять решение, какое управление выбрать.

Пусть вероятности внешних воздействий известны и задаются следующими значениями:  $p_1=0.29$ ,  $p_1=0.5$ ,  $p_1=0.21$ .

В таком случае средние выигрыши определяются таким образом:

$$\begin{aligned}
 v_{ygr_1} &= 0.29 \cdot 0.21 + 0.5 \cdot 0.31 + 0.21 \cdot 0.16 = 0.249, \\
 v_{ygr_2} &= 0.29 \cdot 0.76 + 0.5 \cdot 0.21 + 0.21 \cdot 0.36 = 0.401, \\
 v_{ygr_3} &= 0.29 \cdot 0.26 + 0.5 \cdot 0.81 + 0.21 \cdot 0.26 = 0.535, \\
 v_{ygr_4} &= 0.29 \cdot 0.86 + 0.5 \cdot 0.06 + 0.21 \cdot 0.46 = 0.376.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ полученных результатов показывает, что для указанных значений вероятностей в качестве предпочтительного можно рассматривать третий вариант управления, поскольку выигрыш при этом будет максимальным.

С другой стороны, вероятности внешних воздействий на кибер-физическую систему могут быть неизвестны. В таком случае перед экспертами возникает задача выбора необходимого управления. Для этого могут быть привлечены различные критерии.

Например, в случае пессимистического сценария используется критерий Вальда. В нем в качестве оптимального считается такое воздействие  $u$ , при использовании которого является максимальным значение минимального выигрыша:  $\max_i \min_j a_{ij}$ . То есть, внешние воздействия рассматриваются в таком случае, как самые худшие. Для представленных значений в матрице  $A$  минимальные значения по строкам будут следующими: 0.16, 0.21, 0.26, 0.06. Если среди них сделать выбор максимального значения, то оно равно 0.26, что соответствует третьей строке, то есть управляющее воздействие  $u_3$ .

Если сценарий рассматривается как оптимистический, то в случае учета благоприятных условий значение максимального выигрыша будет соответствовать четвертому управляющему воздействию  $u_4$ .

В случае обобщения можно рассмотреть применение критерия Гурвица, который считается как оптимистический-пессимистический. Проводится выбор величины  $0 \leq v \leq 1$ , после этого происходит определение строки, по которой выполняется условие

$$\max_i (v \min_j a_{ij} + (1-v) \max_j a_{ij}) \quad (3)$$

Анализ показывает, что если  $v=1$ , то мы приходим к пессимистическому критерию Вальда, если  $v=0$ , то тогда получается критерий, в котором оптимизм является максимальным.

Выберем для иллюстрации промежуточное значение  $v=0.65$ . Тогда можно для каждой из строк матрицы получить

$$\begin{aligned} rt_1 &= 0.65 \cdot 0.16 + 0.35 \cdot 0.31 = 0.213, \\ rt_2 &= 0.65 \cdot 0.21 + 0.35 \cdot 0.76 = 0.402, \\ rt_3 &= 0.65 \cdot 0.26 + 0.35 \cdot 0.81 = 0.453, \\ rt_4 &= 0.65 \cdot 0.06 + 0.35 \cdot 0.86 = 0.34. \end{aligned} \quad (4)$$

Наибольшее значение соответствует  $rt_3=0.453$ . Это относится к третьему варианту управления. Действительно, в ходе приня-

тия решений не следует ориентироваться ни на крайние значения пессимизма, ни на крайние значения оптимизма.

Рассмотрим возможности выбора управляющих воздействий на основе подходов, учитывающих риски. Тогда нет необходимости в том, чтобы осуществлять изучение матрицы успехов.

Анализ показывает, что первое управляющее воздействие  $u_1$  в рассматриваемой нами ситуации следует исключить. Это следует из того, что оно заметным образом будет хуже, чем третье управляющее воздействие  $u_3$ . То есть, такое бы ни было внешнее воздействие  $v_j$  вероятности эффективного управления кибер-физической системой  $a_{11}=0.21$ ,  $a_{12}=0.31$ ,  $a_{13}=0.16$ , не будут превосходить значения соответствующих вероятностей  $a_{31}=0.21$ ,  $a_{32}=0.81$ ,  $a_{33}=0.26$ . При отбрасывании первой строки в матрице успехов мы приходим к матрице, которая имеет меньшую размерность:

$$A_1 = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & v_3 \\ \begin{matrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.76 & 0.21 & 0.36 \\ 0.26 & 0.81 & 0.26 \\ 0.86 & 0.06 & 0.46 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

Почему матрицу успехов нет необходимости применять? Например, значение успеха  $a_{41}=0.86$ , если применяется управление  $u_4$  и учитывается внешнее воздействие  $v_1$ , будет большим, чем когда применяется управление  $u_3$  и внешнее воздействие  $v_2$ . Но можно рассматривать выбор управления  $u_4$  как более удачного, поскольку внешнее воздействие  $v_1$  рассматривается как более благоприятное, если его сравнивать с  $v_2$ . Тогда происходит сравнение наших решений с точки зрения различных внешних воздействий  $v_j$ .

С другой стороны, следует рассуждать с точки зрения того, насколько будет благоприятным внешнее воздействие, если осуществляется выбор по различным управляющим воздействиям  $u_i$ . То есть, при известном истинном внешнем воздействии  $v_j$  мы могли бы говорить о предопределенности выбора управления  $u_i$ .

Тогда для столбца  $v_j$  был бы выбран элемент, который является наибольшим, то есть  $\max_i a_{ij}$ . Введем обозначение  $d_j = \max_i a_{ij}$ . Проведем формирование разности  $r_j = d_j - a_{ij}$ . Она будет демон-

стрировать то, насколько будет отличаться выигрыш  $a_{ij}$ , который достигается при условии того, что применяется управление  $u_i$  (если не иметь информации заранее о воздействии  $v_j$ ) от того выигрыша, который может быть максимальным образом возможен  $c_j$ , который будет достигаться при учете того, что уже существует информация относительно того, что воздействие будет  $v_j$ .

В этой связи такая разность  $r_{ij}$  может рассматриваться в виде риска, когда применяется управление  $u_i$ , когда если рассматривается внешнее воздействие  $v_j$ . В таком случае удобнее вместо матрицы успехов проводить анализ на основе матрицы рисков  $R=(r_{ij})$ . Если провести вычисление выигрышей

$d_1 = \max_i a_{i1} = 0.86$ ,  $d_2 = \max_i a_{i2} = 0.81$ ,  $d_3 = \max_i a_{i3} = 0.46$ , (6)  
а также разностей  $r_{ij}$ , тогда можно прийти к матрице рисков

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.1 \\ 0.6 & 0.0 & 0.2 \\ 0.0 & 0.75 & 0.0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

Проведем сравнение такой матрицы и матрицы (5). Видно, что в матрице рисков значение выигрышей будет одно и то же, они будут равняться 0.0. Но нельзя говорить об их равноценности. Это можно объяснить тем, что, если будет выбираться управление  $u_3$  с учетом внешнего воздействия  $v_3$ , то значение риска при этом будет равно 0.6. Он будет в 3 раза превышать значение риска 0.2, которое соответствует управлению, с учетом внешнего воздействия  $v_3$ . То есть, если не будет известно внешнее воздействие, следует стремиться к тому, чтобы осуществлять минимизацию по риску, даже если рассматривается та ситуация, которая является самой неблагоприятной. В таких случаях следует проводить расчет  $\min_i \max_j a_{ij}$ .

С учетом приведенных нами данных  $\max_j r_{2j} = 0.6$ ,  $\max_j r_{3j} = 0.6$ ,  $\max_j r_{4j} = 0.75$ , при этом  $\min_i \max_j r_{ij} = 0.6$ . Тогда необходимо сделать выбор управления  $u_2$  или  $u_3$ . В таких случаях будет обеспечиваться риск с минимальным значением для любых внешних воздействий (что относится к той ситуации, которая будет наибольшим образом неблагоприятной).

Если провести анализ, то видно, что в данном случае будет проводиться расчет не по минимальному выигрышу, а с учетом максимального значения риска. То есть рассматривается критерий Севиджа.

Рассмотрим также возможность использования критерия Лапласа. В таком критерии исходят из известного принципа недостаточного обоснования. Так как нет информации относительно того, какие внешние воздействия, мы не можем быть уверены в том, что они различные. Иначе неопределенность была бы существенно ниже в ходе принятия соответствующего решения. Мы можем исходить из того, что внешние воздействия будут равновероятными.

Выигрыши при этом:

$$\begin{aligned}vI_1 &= (0.21 + 0.31 + 0.16) / 3 = 0.22, \\vI_2 &= (0.76 + 0.21 + 0.36) / 3 = 0.33, \\vI_3 &= (0.26 + 0.81 + 0.26) / 3 = 0.33, \\vI_4 &= (0.86 + 0.06 + 0.46) / 3 = 0.33.\end{aligned}\quad (8)$$

Анализ показывает, что при использовании критерия Лапласа предпочтительными управлениями будут  $u_2$  и  $u_3$ .

Если провести обобщение по рассмотренным выше подходам, то, в итоге, представляет интерес использование управления  $u_3$ , которое будет считаться как «золотая середина».

Перестройка КФС с учетом выбранных видов управления может проводиться на основе соответствующих алгоритмов [12].

## **Выводы**

Необходимо рассматривать КФС в виде важной части современной информационной эпохи [13]. Для управления КФС предлагается использование теории игр, применение различных критериев. Это позволит осуществить улучшение функционирования КФС по всем уровням.

## **Список литературы**

1. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ возможностей управления системами «Интернет вещей» // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 2 (41). С. 112-115.

2. Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. № 23(6). Т. 161-175. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>
3. Львович И.Я., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Особенности нейросетевого противодействия кибератакам // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 64-67.
4. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Особенности межканальных помех в сетях IEEE 802.11 // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 72-74.
5. Preobrazhenskiy Yu.P., Chuprinskaya Yu.L., Ruzhicky E. The problems of process control in computer systems // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 92-94.
6. Калашников П.В. Задача выбора оптимального варианта конструкции сложной системы в условиях интервальной неопределенности // International Journal of Advanced Studies. 2022. Т. 12. № 3. С. 94-108.
7. Kalashnikov P.V. Mathematical model of risk control arising from the functioning of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty of information about the values of parameters and the phase state // International Journal of Advanced Studies. 2022. Т. 12. № 3. С. 22-39.
8. Кини Р.Л., Райфа Х., Принятия решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
9. Эддоус М., Стенсфильд Р. Методы принятия решений. М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. 590 с.
10. Виксинин И.И., Мариненков Е.Д., Чупров С.С. Применение теории игр для обеспечения безопасности коммуникации киберфизической системы с использованием механизмов репутации и доверия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 1. С. 47–59. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-1-47-59>

11. Гумеров Э. А., Алексеева Т. В. Киберфизические системы промышленного Интернета вещей // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 2. С. 72–81. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-2-72-81>
12. Ронжин А.Л., Басов О.О., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 897-905.
13. Plotnikova T.A. Computer aided schematic design: how to manage large data in the early stages of urban design projects // International Journal of Advanced Studies. 2021. Т. 11. № 2. С. 52-64.

### *References*

1. L'vovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitskiy E. Analiz vozmozhnostey upravleniya sistemami «Internet veshchey» // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2022. № 2 (41). S. 112-115.
2. Vatamanyuk I.V., Yakovlev R.N. Obobshchennye teoreticheskie modeli kiberfizicheskikh sistem // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2019. № 23(6). Т. 161-175. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-161-175>
3. L'vovich I.Ya., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitskiy E. Osobennosti neyrosetevogo protivodeystviya kiberatakam // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2022. № 1 (40). S. 64-67.
4. L'vovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitskiy E. Osobennosti mezhkanal'nykh pomekh v setyakh IEEE 802.11 // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2022. № 1 (40). S. 72-74.
5. Preobrazhenskiy Yu.P., Chuprinskaya Yu.L., Ruzhicky E. The problems of process control in computer systems // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2022. № 1 (40). S. 92-94.
6. Kalashnikov P.V. Zadacha vybora optimal'nogo varianta konstruktssii slozhnoy sistemy v usloviyakh interval'noy neopredelennosti // International Journal of Advanced Studies. 2022. Т. 12. № 3. S. 94-108.
7. Kalashnikov P.V. Mathematical model of risk control arising from the functioning of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty of information about the values of parameters

- and the phase state // International Journal of Advanced Studies. 2022. T. 12. № 3. S. 22-39.
8. Kini R.L., Rayfa Kh., Prinyatiya resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya. M.: Radio i svyaz', 1981. 560 s.
  9. Eddous M., Stensfil'd R. Metody prinyatiya resheniy. M.: Audit, YuNITI, 1997. 590 s.
  10. Viksnin I.I., Marinenkov E.D., Chuprov S.S. Primenenie teorii igr dlya obespecheniya bezopasnosti kommunikatsii kiberfizicheskoy sistemy s ispol'zovaniem mekhanizmov reputatsii i doveriya // Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2022. T. 22, № 1. S. 47–59. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-1-47-59>
  11. Gumerov E. A., Alekseeva T. V. Kiberfizicheskie sistemy promyshlennogo Interneta veshchey // Prikladnaya informatika. 2021. T. 16. № 2. S. 72–81. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-2-72-81>
  12. Ronzhin A.L., Basov O.O., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kontseptual'naya i formal'naya modeli sinteza kiberfizicheskikh sistem i intellektual'nykh prostranstv // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2016. T. 59. № 11. S. 897-905.
  13. Plotnikova T.A. Computer aided schematic design: how to manage large data in the early stages of urban design projects // International Journal of Advanced Studies. 2021. T. 11. № 2. S. 52-64.

## **ДАНИЕ ОБ АВТОРАХ**

**Аветисян Татьяна Владимировна**, преподаватель колледжа, специалист проектного отдела ВИБТ  
*Колледж ВИБТ; Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий  
ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация  
vtatyana\_avetisyan@mail.ru*

**Львович Яков Евсеевич**, профессор, доктор технических наук  
*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*

*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация  
Komkovvvt@yandex.ru*

**Преображенский Андрей Петрович**, профессор, доктор технических наук, профессор

*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий*

*ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация  
Komkovvvt@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Tatiana V. Avetisyan**, project specialist VIVT

*Voronezh Institute of High Technologies*

*73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation*

*vtatyana\_avetisyan@mail.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>*

**Jakov E. Lvovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor

*Voronezh Institute of High Technologies*

*73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation*

*Komkovvvt@yandex.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-3763>*

**Andrey P. Preobrazhenskiy**, Doctor of Technical Sciences, Professor

*Voronezh Institute of High Technologies*

*73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation*

*Komkovvvt@yandex.ru*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-8053>*

Поступила 13.02.2023

После рецензирования 15.03.2023

Принята 20.03.2023

Received 13.02.2023

Revised 15.03.2023

Accepted 20.03.2023