

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 517.98:519.2:621.039

doi:10.21685/2307-4205-2021-3-1

КОНЦЕПЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УРОВНЯМ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский¹, С. А. Лысенкова²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Традиционные методы оценки и анализа показателей долговечности оборудования сложных систем основаны на описании систем во времени на уровне траекторий поведения и являются идеализациями, так как не учитывают изменения структуры фазового пространства. Следует признать, что эти методы и существующие методики, основанные на теории долговременной прочности, обеспечены соответствующими стандартами. В то же самое время за последние 40–50 лет появились новые теоретические разработки, учитывающие более тонкую структуру времени в динамике и термодинамике. В этих работах показано, что современные подходы динамики и термодинамики позволяют существенно повысить достоверность расчетов показателей долговечности оборудования структурно и функционально сложных систем на всех этапах их жизненного цикла. Поэтому целями данной статьи является анализ существующих подходов и методов описания процессов старения оборудования (блоков, подсистем) и их дальнейшее развитие в теории долговечности сложных систем, что особенно важно для критически важных систем с длительными сроками активного существования. *Материалы и методы.* Физическая и математическая сущность новых современных подходов к уровням описания процессов старения оборудования с учетом достижений классической механики и термодинамики состоит в следующем: 1) широкое применение языка теории операторов функционального анализа в классической механике, что означает замену описания систем на уровне изучения траектории исследованиями их функций распределения; 2) введение в описание систем более простых уравнений, учитывающих специфику необратимых процессов; 3) обязательное применение теории случайных процессов. *Результаты и выводы.* Доказано, что так как фундаментальной теоретической основой нового подхода в описании уровней старения оборудования в теории долговечности структурно и функционально сложных систем с учетом асимметрии времени являются неустойчивые и необратимые процессы, то для решения теоретических и прикладных задач оценки и анализа показателей долговечности необходимо использовать собственные функции и собственные значения операторов Леувилля, Гамильтона, энтропии преобразования и внутреннего времени. Предложены новая методика концепции комплексного подхода к уровням описания показателей долговечности и последовательность выполнения исследований.

Ключевые слова: операторы микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени, «возраст» системы, показатели долговечности

Финансирование: работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 17-01-00244, 18-07-00391 и 18-47-86007).

Для цитирования: Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Концепция современных подходов к уровням описания процессов старения структурно и функционально сложных критически важных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-1

THE CONCEPT OF MODERN APPROACHES TO THE LEVELS OF DESCRIBING THE AGING PROCESSES OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX CRITICAL SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V.A. Ostreykovskiy¹, S.A. Lysenkova²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru

Abstract. Background. Traditional methods for assessing and analyzing the indicators of the durability of equipment of complex systems are based on the description of systems in time at the level of trajectories of behavior, and are idealizations, since they do not take into account changes in the structure of the phase space. It should be recognized that these methods and existing techniques based on the theory of long-term strength are provided with appropriate standards. At the same time, over the past 40-50 years, new theoretical developments have appeared that take into account the finer structure of time in dynamics and thermodynamics. These works show that modern approaches to dynamics and thermodynamics can significantly increase the reliability of calculations of equipment durability indicators for structurally and functionally complex systems at all stages of their life cycle. Therefore, the goals of this article are to analyze the existing approaches and methods for describing the aging processes of equipment (blocks, subsystems) and their further development in the theory of the durability of complex systems, which is especially important for critical systems with long periods of active existence. *Materials and methods.* The physical and mathematical essence of new modern approaches to the levels of describing the aging processes of equipment of structurally and functionally complex systems, taking into account the achievements of classical mechanics and thermodynamics, is as follows: 1. Wide application of the language of the theory of operators of functional analysis in classical mechanics, which means replacing the description of systems at the level of studying the trajectory by researching their distribution functions. 2. Introduction to the description of systems of simpler equations that take into account the specifics of irreversible processes. 3. Mandatory application of the theory of random processes. *Results and conclusions.* 1. It has been proved that, since the fundamental theoretical basis of the new approach in describing the aging levels of equipment in the theory of the durability of structurally and functionally complex systems, taking into account the asymmetry of time, are unstable and irreversible processes, then for solving theoretical and applied problems of assessing and analyzing durability indicators it is necessary to use eigenfunctions and eigenvalues of the Leeouville and Hamilton operators, transformation entropy and internal time. 2. A new methodology for the concept of an integrated approach to the levels of description of indicators of durability and the sequence of research is proposed.

Keywords: operators of microscopic entropy, transformation and internal time, "age" of the system, indicators of durability

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the RFBR (projects No. 17-01-00244, 18-07-00391 and 18-47-86007).

For citation: Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A. The concept of modern approaches to the levels of describing the aging processes of structurally and functionally complex critical systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-1

Введение

За три столетия существования современной классической науки (от 1685 г. доклада И. Ньютона «Математические начала...» до работ А. Эйнштейна – Дж. В. Гиббса и В. И. Вернадского – И. Р. Пригожина конца XIX – начала XX в.), заложившей основы квантовой механики и теории относительности описания уровней природы, необходим переход к новым подходам построения системы на основе современных взглядов и учета эффектов существования асимметрии времени и комплексного влияния внешних и внутренних факторов окружающей среды и человека, т.е. назрела проблема глубокого анализа имеющихся достижений науки «существующей сегодня» и переход к новому этапу «завтрашней» науки, и в частности, к построению на базе достижений динамики и термодинамики новой теории долговечности структурно и функционально сложных систем.

Постановка задачи

В задачах оценки показателей долговечности важную роль играют уровни описания состояния систем с длительными сроками активного существования. Поэтому необходимо, прежде всего, произвести оценку и сделать анализ различных теоретических подходов к описанию уровней с точки зрения их эффективности при использовании конкретных аналитических методов. При этом важной особенностью является не только оценка и применение существующих методов, но и применение нового аналитического аппарата для получения значений показателей долговечности СФСС.

Именно на эту цель и направлено содержание данной статьи.

Использование метода Л. Больцмана

В XIX в. появилась первая стройная концепция описания процессов старения Л. Больцмана, в основании которой был положен принцип: необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе. Если опустить многие подробности, то схему использования подхода Л. Больцмана для целей создания методики анализа и оценки показателей долговечности СФСС можно свести к следующей последовательности (рис. 1).



Рис. 1. Последовательность расчетов показателей долговечности при использовании кинетических уравнений Л. Больцмана

В последние годы XX в. этот подход получил распространение через применение уравнений для плотных сред. Необходимо отметить, что основанные на методе Л. Больцмана уравнения не допускают функцию Ляпунова, что приводит к утрате связи со вторым началом термодинамики.

Неунитарные преобразования Λ и их роль в описании динамики систем с нарушенной симметрией времени

Следующим шагом в получении искомой методики расчета показателей долговечности явилось использование неунитарных преобразований Λ . С этой целью рассмотрим «связь между существованием оператора микроскопической энтропии M и теорией преобразования с оператором Λ » [1, 2].

Пусть оператор M и функция Ляпунова Ω имеет следующее соотношение:

$$\Omega = \text{tr} \rho^+ M \rho \geq 0, \quad (1)$$

в котором (1) задает функцию Ляпунова, а оператор M зависит от «динамики». Кроме того, оператор M можно представить в виде произведения оператора T и эрмитово сопряженного оператора T^T

$$M = T^T T \text{ и } \Lambda^{-1} = T. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\Omega = \text{tr} \rho^+ \tilde{\rho}, \quad (3)$$

где $\tilde{\rho}$ – образ плотности при преобразовании

$$\tilde{\rho} = \Lambda^{-1} \rho. \quad (4)$$

Следовательно, можно сделать выводы:

1) если уравнение (3) – функция Ляпунова, то все выпуклые функционалы от $\tilde{\rho}$

$$\Omega = \text{tr} \tilde{\rho} \ln \tilde{\rho} \quad (5)$$

также функции Ляпунова;

- 2) функции Ляпунова вида (3) могут существовать только в новом представлении, получаемом из выражения (1) с помощью преобразования (4);
 3) состояние $\tilde{\rho}$, которое приводит к значению $\Omega = \min$, служит аттрактором для любых остальных состояний;
 4) существует тесная связь между операторами энтропии M и преобразования Λ .
 Далее рассмотрим свойства преобразования, задаваемого соотношениями (1)–(3).

Класс уравнений движения с унитарным законом преобразования

Уравнения движения в новом представлении (1)–(3) с учетом (4) имеют вид

$$i \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = \Phi \tilde{\rho}, \tag{6}$$

где

$$\Phi = \Lambda^{-1} L \Lambda. \tag{7}$$

Из выражений (6), (7) следует: новое преобразование, позволяющее включить необратимость через функции Ляпунова, намного шире простой замены координат, выражаемой унитарным преобразованием. В работе [1] доказано, что разность между Φ и эрмитово сопряженным оператором Φ^T не равна тождественно нулю:

$$i(\Phi - \Phi^T) \geq 0, \tag{8}$$

т.е. оператор движения (6), входящий в преобразование (4), не должен быть эрмитовым, как оператор Лиувилля L , и возникает необходимость выхода за пределы обычного класса унитарных преобразований. Если опустить промежуточные рассуждения, можно получить следующее соотношение:

$$[\Lambda^{-1}(-L)]^T = \Lambda(L), \Lambda^{-1}(L) = \Lambda^T(L). \tag{9}$$

Если оператор преобразования Λ не зависит от оператора Лиувилля, то он является унитарным преобразованием.

Класс уравнений движения с неунитарным законом преобразования

Известно [1], для того чтобы перейти от динамического описания поведения систем к термодинамическому, требуется прибегать к новому закону преобразования (9), которое называется унитарным *-преобразованием

$$\Lambda^*(L) = \Lambda^T(-L). \tag{10}$$

(* означает инверсию $L \rightarrow -L$). Используя эрмитовость оператора L и соотношения (9), (10), получаем

$$\Phi^* = \Phi^T(-L) = \Phi(L) \tag{11}$$

или

$$(i\Phi)^* = i\Phi. \tag{12}$$

Таким образом оператор движения Φ является *-эрмитовым и должен быть либо эрмитовым и четным относительно инверсии оператора L , либо антиэрмитовым и нечетным. Следовательно, в общем случае *-эрмитов оператор имеет вид

$$i\Phi = \overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} + \overset{\text{нечетн.}}{(i\Phi)}. \tag{13}$$

Тогда условие диссипативности (9), выражающее существование функции Ляпунова Ω , принимает вид

$$\overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} \geq 0. \tag{14}$$

Таким образом, получена новая форма микроскопического уравнения. Кроме того, так как уравнения (13), (14) содержат обратимую и необратимую части, то удалось включить в микроскопи-

ческое описание систем макроскопическое и термодинамическое различие между обратимыми и необратимыми процессами.

При этом необходимо акцентировать внимание на физическом смысле уравнений (13) и (14): четный член включает в себя такие процессы, как рассеяние, рождение, затухание и другие необратимые процессы, которые способствуют положительному приращению функции Ляпунова и сдвигают систему к состоянию равновесия, что объединяет динамику и термодинамику и в целом приводит к существованию систем с нарушенной « $L-t$ » симметрией.

Но на этом не нужно останавливаться, появляется возможность координации различных уравнений описания долговечности СФСС.

Уровни описания асимметрии времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем

При сегодняшнем состоянии теории необратимых процессов согласно И. Р. Пригожину [1] сложилась следующая последовательность шагов оценки и анализа результатов описания временной асимметрии в теории долговечности СФСС, представленная на рис. 2.



Рис. 2. Последовательность оценки и анализа состояния сложной системы с учетом уровней описания

К содержанию рис. 2 необходимо сделать дополнения:

1. В принципе для обратимых процессов в классической динамике возможны ситуации, обратимые во времени, $t \leftrightarrow -t$.

2. Однако это становится невозможным, если переходить к необратимым процессам (например, химическим реакциям, биологическим процессам и др.), где $t \neq -t$.

Следовательно, оба случая являются фундаментальным фактом и необходимым. Если будем считать первичным мир траекторий, тогда, введя дополнительные допущения, можно перейти ко второй формулировке.

3. Так как рассматриваются системы, эволюционирующие к равновесию в будущем ($t \rightarrow +\infty$), и выбор подгруппы обусловлен «правилами отбора», то выбирается подгруппа W_i .

4. В квантовой механике и теории относительности в конце XIX и начале XX в. при анализе асимметрии времени появились исследования, связанные с влиянием наблюдателя на процессы необратимости. В связи с этим при анализе уровней состояния систем необходимым условием является учет влияния фактора «наблюдатель», что показано на рис. 3.



Рис. 3. Самосогласованная схема учета различия между прошлым и будущим

Под наблюдателем события обычно понимается либо биологическое начало (т.е. живой организм), либо измерительный комплекс, имеющие прямое отношение к модусам времени «прошлое–настоящее–будущее» и содержанию диссипативных структур в виде «исторических измерений». Кроме того, под наблюдателем часто понимают высоко развитую диссипативную структуру, которая способна объективно оценивать различия между прошлым и будущим. И поэтому можно считать в качестве вывода: если в системе находится наблюдатель, то невозможно называть уровень ее описания фундаментальным [7–9].

Комплексный подход к выбору уровней описания показателей долговечности сложных систем с учетом асимметрии внутреннего времени

Так, причинами сложных деградиационных процессов, приводящих к отказам, авариям и катастрофам структурно и функционально сложных систем являются коррозия, эрозия, износ, усталость, деформации и другие макроскопические процессы. Первопричиной таких макропроцессов служат необратимые процессы типа химических реакций, диффузии, распада твердых растворов, адсорбции и др. Причем необратимые процессы обычно развиваются и прогрессируют под действием комплекса внешних и внутренних факторов (температуры, влажности, давления, динамических и статических нагрузок, термогидравлических ударов, облучения, воздействия электрических, магнитных и других полей), а также влияния человеческого фактора. И, как следствие, это может приводить к глубоким изменениям состояния СФСС на уровне пространственно-временного континуума. Поэтому важно констатировать следующее: концептуальной научно-методической основой в проблеме обеспечения высоких показателей долговечности оборудования СФСС должен стать комплексный подход к уровням описания его состояния на всех этапах жизненного цикла системы.

На основании многолетних исследований авторы данной статьи при поддержке грантов РФФИ разработали ряд методических рекомендаций для прикладных работ по созданию конкретных инженерных методик расчета ресурса, срока службы и их остаточных значений для систем длительного пользования с учетом эффекта асимметрии времени.

Типовая методика по проведению работ в соответствии с материалами, изложенными в данной статье и работах [3–9], приведена в табл. 1.

Таблица 1

Самосогласованная схема последовательности выполнения исследований по прогнозированию показателей долговечности сложных систем на этапах их жизненного цикла

Наименование работ
Постановка задачи
Выбор вида необратимых процессов, протекающих в конструкционных материалах объекта
Характеристика изменения показателей необратимых процессов в элементах оборудования СФСС
Макроскопические уравнения связи параметров необратимых процессов и показателей долговечности

Наименование работ
Выбор вида и параметров функций Ляпунова
Статистические модели необратимых процессов элементов, блоков и подсистем СФСС
Определение собственных функций и собственных значений исследуемых операторов
Оценка влияния параметров собственных функций и собственных значений на эволюцию возраста конструкционных материалов элементов СФСС
Расчет срока службы, ресурса и их остаточных значений в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее» для элементов, блоков и подсистем СФСС
Рекомендации по выработке ресурса и срока службы объектов СФСС в процессе жизненного цикла

Таким образом, предложена обобщенная методика в задачах описания уровней старения оборудования сложных систем.

Заключение

Рассмотрены концептуальные основы научно-методологического обоснования асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» для полной оценки и анализа показателей долговечности СФСС. Приведенный концептуальный анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Последовательность расчетов показателей долговечности систем при использовании кинетических уравнений Больцмана выглядит следующим образом: динамика \rightarrow Марковские процессы \rightarrow энтропия через H -функцию. Однако оказалось, что полученные таким образом уравнения не допускают функции Ляпунова, что приводит к утере связи со вторым началом термодинамики. Поэтому следующим шагом в получении искомой методологии расчета показателей долговечности явился подход с использованием преобразований оператора Λ .

2. В конце XX в. сложился принципиально новый подход к оценке и анализу показателей долговечности сложных систем с учетом асимметрии времени и неунитарных преобразований оператора Λ .

В целом данный подход объединяет динамику и термодинамику и приводит к существованию динамики с характерной, нарушенной « $L-t$ » симметрией. И тогда результат этого фундаментального факта позволяет скоординировать различные виды уравнений описания состояния и показателей долговечности структурно и функционально сложных систем.

3. Для решения задач оценки асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее» в теории долговечности СФСС необходим комплексный подход с учетом операторов эволюции микроскопической энтропии M , преобразования Λ , внутреннего времени T , функций Ляпунова, методов и моделей современного функционального анализа и теории случайных процессов.

4. Предложена концепция нового комплексного учета математических и физических методов для расчета показателей долговечности, которая приведена в виде таблицы.

Список литературы

1. Prigogine I. From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences. San Francisco : W.H. Freeman&Co, 1980. 278 p.
2. Пригожин И. Р. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. 216 с.
3. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС). М. : Инновационное машиностроение, 2017. 535 с.
4. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки : избр. тр. Междунар. симп. по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. Вып. 37. С. 69–111.
5. Денисова Т. Ю., Острейковский В. А. Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем. Сургут : Печатный мир, 2017. 253 с.
6. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
7. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.
8. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Волков А. В. Необратимость, хаос и время Ляпунова в теории долгосрочного прогнозирования состояния сложных систем // Региональная информатика (РИ-2020) :

XVII Санкт-Петербургская Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 г.). СПб. : СПОИСУ, 2020. С. 309–310.

9. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Сорочкин А. В. Онтология необратимости и корней времени в задачах долговечности сложных систем // Региональная информатика (РИ-2020) : XVII Санкт-Петербургская Междунар. конф. (г. Санкт-Петербург, 28–30 октября 2020 г.). СПб. : СПОИСУ, 2020. С. 311–312.

References

1. Prigogine I. *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W.H. Freeman&Co, 1980:278.
2. Prigozhin I.R. *Konets opredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody = The end of certainty. Time, chaos and new laws of nature*. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999:216. (In Russ.)
3. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoj AES) = Resource and service life of nuclear power plant power units equipment (on the example of Smolensk NPP power units)*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017:535. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Mathematical modeling of the effect of internal time asymmetry in the theory of durability of structurally and functionally complex critical systems. *Itogi nauki: izbr. tr. Mezhdunar. simp. po fundamental. i priklad. problemam nauki = Results of Science : selected works of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science*. Moscow: RAN, 2018;(37):69–111. (In Russ.)
5. Denisova T.Yu., Ostreykovskiy V.A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogenogo riska slozhnykh dinamicheskikh system = Ontology of the phenomenon of time in the theory of forecasting technogenic risk of complex dynamic systems*. Surgut: Pechatnyy mir, 2017:253. (In Russ.)
6. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of complex dynamic systems : monograph*. Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
7. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Shevchenko E.N. On the possibility of using the effect of time asymmetry in the problems of assessing the durability of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):21–34. (In Russ.)
8. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N., Volkov A.V. Irreversibility, chaos and Lyapunov's time in the theory of long-term forecasting of the state of complex systems. *Regional'naya informatika (RI-2020): XVII Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. (g. Sankt-Peterburg, 28–30 oktyabrya 2020 g.) = Regional Informatics (RI-2020) : XVII St. Petersburg International Conference (St. Petersburg, October 28-30, 2020)*. Saint Petersburg: SPOISU, 2020:309–310. (In Russ.)
9. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N., Sorochkin A.V. The ontology of irreversibility and time roots in the problems of durability of complex systems. *Regional'naya informatika (RI-2020): XVII Sankt-Peterburgskaya Mezhdunar. konf. (g. Sankt-Peterburg, 28–30 oktyabrya 2020 g.) = Regional Informatics (RI-2020) : XVII St. Petersburg International Conference (St. Petersburg, October 28-30, 2020)*. Saint Petersburg: SPOISU, 2020:311–312. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Алексеевич Острейковский

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики
и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Vladislav A. Ostreykovskiy

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of information theory
and computer technology,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Светлана Александровна Лысенкова

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информатики
и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Svetlana A. Lysenkova

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of sub-department
of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 02.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 01.10.2021

Принята к публикации/Accepted 14.10.2021