

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБОСНОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ТЕОРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В. А. Острейковский¹, С. А. Лысенкова², В. Г. Недорезов³, Н. К. Юрков⁴

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

^{3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru, ³ nedval@yandex.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для обеспечения надежности, безопасности, эффективности и качества структурно и функционально сложных и критически важных технических систем с длительными сроками активного существования возникает необходимость использования современных подходов к оценке ресурса и срока службы с учетом асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее». *Материалы и методы.* С целью реализации этой идеи проанализированы и выполнены научно-методические концептуальные обоснования применения новых методов функционального анализа для оценки показателей долговечности структурно и функционально сложных систем, изготавливаемых часто малыми сериями, а часто и вообще в единичных экземплярах типа систем защиты Земли от космических угроз. *Результаты и выводы.* Сделаны выводы о возможности применения концепций микроскопической формулировки второго начала термодинамики, внутреннего времени как оператора для описания функционирования неустойчивых и необратимых систем, и внутренне случайных и внутренне необратимых систем в задачах оценки долговечности структурно и функционально сложных систем применением современного функционального анализа и учета фактора асимметрии времени.

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

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-01-00244 и № 18-07-00391).

Для цитирования: Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Юрков Н. К. Концептуальные основы обоснования применения операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 17–30. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-2

CONCEPTUAL FOUNDATIONS FOR THE JUSTIFICATION OF THE USE OF MICROSCOPIC ENTROPY EVOLUTION OPERATORS, TRANSFORMATIONS AND INTERNAL TIME IN THE THEORY OF DURABILITY STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX SYSTEMS

V.A. Ostreykovskiy¹, S.A. Lysenkova², V.G. Nedorezov³, N.K. Yurkov⁴

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

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ ova@surgu.ru, ² lsa1108@mail.ru, ³ nedval@yandex.ru, ⁴ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* To ensure the reliability, safety, efficiency and quality of structurally and functionally complex and critical technical systems with long periods of active existence, it becomes necessary to use modern approaches to assessing the resource and service life, taking into account the asymmetry of time in the "past-present-future" modes. *Materials and methods.* In order to implement this idea, scientific and methodological conceptual justifications for the application of new methods of functional analysis to assess the durability indicators of structurally and functionally complex systems, often manufactured in small batches, and often in general in single copies such as

systems for protecting the Earth from space threats, have been analyzed and performed. *Results and conclusions.* Conclusions are drawn about the possibility of applying the concepts of the microscopic formulation of the second law of thermodynamics, internal time as an operator to describe the functioning of unstable and irreversible systems, and internally random and internally irreversible systems in the problems of assessing the durability of structurally and functionally complex systems using modern functional analysis and taking into account the time asymmetry factor.

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

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 17-01-00244 and 18-07-00391).

For citation: Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Yurkov N.K. Conceptual foundations for the justification of the use of microscopic entropy evolution operators, transformations and internal time in the theory of durability structurally and functionally complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;1:17–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-2

Введение

Обеспечение высокой долговечности таких сложных систем, как энергоблоки атомных электростанций, атомные подводные лодки и ледоколы, авиационные и космические системы, а в последние десятилетия и проектируемые системы защиты Земли от космических угроз, обычно выполняется на базе теорий длительной прочности. И здесь стоит особо подчеркнуть, что данные расчеты показателей долговечности (ресурса, срока службы и их остаточных значений) обеспечены соответствующими государственными и международными нормативными документами и стандартами с детерминированными и вероятностно-статистическими методами. Вместе с этим по данным ООН число природных аварий и катастроф за 30 лет возросло с 73 в 1975 г. до 440 в 2007 г. А число же техногенных аварий и катастроф за этот период увеличилось в три раза: с 1230 за десятилетний период с 1978 по 1987 г. до 3435 в период с 1998 по 2007 г. Объемы прямого ущерба от техногенных аварий и катастроф, оцениваемые коэффициентом их нарастания, за последние 5–10 лет резко увеличились до 6,0. Темп нарастания техногенных аварий и катастроф увеличивается в 3,5 раза быстрее, чем природных [1, 2]. Достаточно вспомнить многочисленные жертвы людей и многомиллиардные убытки от катастроф на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» (Япония), Саяно-Шушенской ГЭС. Только в России в 2011 г. произошло пять аварий с космическими аппаратами с многомиллиардными потерями [3, 4]. Все это свидетельствует о том, что, вполне возможно, наши знания о природе аварий и катастроф явно не успевают, особенно в обеспечении высоких показателей долговечности сложных систем, за увеличением их структурной и функциональной сложности. Неустойчивость и необратимость процессов приводят к разрушению траектории поведения оборудования структурно и функционально сложных систем (СФСС) и, следовательно, к появлению большого множества структурированных коллективных состояний. А это грозит появлению отказов, аварий и катастроф. Говоря техническим языком, сильно неустойчивые системы с большим числом возможных необратимых процессов являются источником когерентности явлений техногенной безопасности. Если в равновесии или вблизи него состояние оборудования СФСС по крайней мере в течение достаточно долгого периода времени полностью определяется краевыми условиями, то вдали от равновесия возможно появление множества диссипативных структур. Именно поэтому в последние десятилетия XX в. в качестве обобщенного параметра СФСС используются понятия детерминированного хаоса и аттрактора.

Постановка задачи

Середина и конец XX в. характеризуются новым этапом научно-технической революции, который, в частности, обогатил науку новым подходом в теории асимметрии времени. В центре идей были работы научных школ А. М. Ляпунова [5], В. И. Вернадского [6] и И. Р. Пригожина [7, 8]. Многочисленные исследования в приведенных работах [5–8] свидетельствуют, что неустойчивость и необратимые процессы имеют свои особенности на трех уровнях описания систем: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. Установлено, что причинами сложных деградационных процессов, приводящих в итоге к отказам, авариям и катастрофам СФСС, являются коррозия, эрозия, износ, усталость, деформации и другие макроскопические процессы. В указанных и других макропроцессах первопричиной служат необратимые процессы типа химических реакций,

диффузии, распада твердых растворов, адсорбции и т.п. Причем «необратимые процессы обычно развиваются и прогрессируют под действием комплекса внешних и внутренних эксплуатационных факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, динамических и статических механических нагрузок, термогидравлических ударов, облучения, воздействия электрических, магнитных и других полей), а также влияния человеческого фактора» [9,10].

Концептуальной научно-методологической основой применения операторов эволюции энтропии, преобразования и внутреннего времени следует принять для цели повышения эффективности исследований в области (оценки и анализа показателей) развития теории долговечности СФСС два утверждения:

– возрастание энтропии объектов во времени в соответствии со вторым началом термодинамики;

– феномен времени не параметр, а оператор.

В силу отмеченных особенностей описания функционирования СФСС целью данной статьи является исследование на концептуальном уровне нового подхода к задачам теории долговечности с применением операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени.

Основная часть

1. Концепция макроскопической формулировки второго начала термодинамики

Начиная с 1960 г. в течение последующих сорока лет лауреатом Нобелевской премии И. Р. Пригожиным были опубликованы восемь оригинальных книг (в том числе на русском языке), в которых на фундаментальном уровне доказано, что в сложных системах возрастание энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики приводит к асимметрии времени. В этом плане следует также отметить вклад в исследования рассматриваемых моделей неустойчивостей и необратимости процессов Больцмана, И. Р. Пригожина и плеяды отечественных ученых А. М. Ляпунова [5], В. И. Вернадского [6], Н. Н. Боголюбова [11], А. А. Власова [12], М. А. Леонтовича [13], Ю. П. Климонтовича [14] и др.

Для общности рассуждений приведем несколько известных положений:

1) И. Ньютон (1643–1727) в своем основном труде «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) сформулировал второй закон классической механики, в котором нет различия между прошлым и будущим, т.е. уравнение

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F \quad (1)$$

инвариантно относительно обращения времени в прошлое $t \rightarrow -\infty$ и в будущее $t \rightarrow +\infty$;

2) Р. Ю. Клаузиус (1822–1888) в 1835 г. ввел в термодинамику новое понятие «энтропия» [гр. *en* – в, внутрь, а *tropé* – поворот, превращение], характеризующее тепловое состояние тела или системы тел как меру внутренней неупорядоченности системы. Р. Клаузиусом были введены в рассмотрение основные понятия энтропии S , которые получили название второго начала термодинамики

$$\frac{dS}{dt} \geq 0, \quad dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (2)$$

где $d_e S$ определяет перенос энтропии через границы системы, а $d_i S$ описывает количество энтропии, производимой внутри системы.

Второе начало гласит: при любых граничных условиях производство энтропии положительно. И, как правило, создают энтропию необратимые процессы (химические реакции, диффузия и другие субмикроскопические процессы).

В соответствии с первым началом термодинамики для замкнутой системы, которая не обменивается с внешним миром ни веществом, ни энергией и находится в состоянии равновесия, производство энтропии равно нулю. Если же система обменивается теплом с внешним миром (открытая система), то макроскопическая энтропия

$$d_e S = \frac{dE}{T^0}, \quad d_i S = 0. \quad (3)$$

Полный дифференциал энтропии равен

$$dS = \frac{dE}{T^0} + P \frac{dV}{T^0}, \quad (4)$$

где E – энергия; V – объем; T^0 – абсолютная температура; P – давление.

3) Дж. У. Гиббс (1839–1903) в развитии формулы (4) предложил зависимость, учитывающую неоднородность состава тела

$$dS = \frac{dE}{T^0} + P \frac{dV}{T^0} - \sum \frac{\mu_\gamma}{T^0} dn_\gamma, \quad (5)$$

где μ_γ – химические потенциалы, а n_1, n_2, \dots – число молей различных компонент системы.

Для необратимых процессов в линейной термодинамике допускается обобщение формулы Гиббса (5) вида

$$\frac{dS}{dt} = \sum X_i J_i, \quad (6)$$

где J_i – скорости необратимых процессов, протекающих в системе; X_i – соответствующие им обобщающие силы (градиенты температур, химических потенциалов и т.д.). Значения обобщающих сил и химических потенциалов для конкретных необратимых процессов известны в литературе по физике отказов [9–15]. Выражение (6) является одной из основных зависимостей микроскопической термодинамики необратимых процессов.

2. Концепция внутреннего времени как оператора для описания функционирования неустойчивых и необратимых сложных систем

Концептуальные основы описания оператора внутреннего времени (возраста) содержат следующие положения: причины нарушения симметрии времени в структуре и функционировании: диссипативные силы, неустойчивости, флуктуации и бифуркации в сложных системах; время – это не параметр или метка, а оператор, тесно связанный с оператором микроскопической энтропии; существование асимметрии времени во внутренне случайных и внутренне необратимых системах.

2.1. Причины нарушения симметрии времени в структуре и функционировании: диссипативные силы, неустойчивости, флуктуации и бифуркации в сложных системах

Со времен Евклида и Галилея концепция описания поведения систем в пространстве и времени базировалась на принципе их однородности: сдвиги времени не влияют на физические свойства системы. Пространство также однородно и изотропно. Однако возникновение диссипативных структур, химических реакций, диффузии, неустойчивости по мере удаления от состояния равновесия внешних и внутренних воздействий, флуктуаций и других явлений приводит к нарушению однородности пространства и времени и требует применения для описания поведения таких систем дифференциальных уравнений в частных производных. Поэтому вдали от равновесного расстояния системы могут возникать последовательности неустойчивостей, которые приводят к бифуркациям. «Бифуркации являются проявлением внутренней дифференциации между элементами и подсистемами самой системы и системой с окружающей средой. При этом нарушается однородность времени и пространства. Удивительным фактом появления бифуркации является то, что между двумя точками бифуркаций в системе выполняются детерминистические закономерности, а в окрестностях точек бифуркации существенную роль играют флуктуации» [7], которые требуют вероятностного описания (рис. 1), и в соответствии со вторым законом термодинамики появляется эволюция направления вращения.

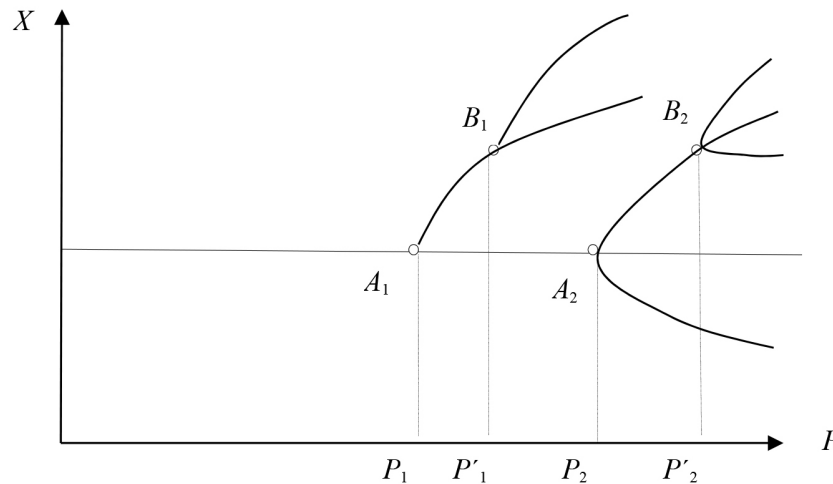


Рис.1. Последовательные бифуркации в сложных системах:
 A_1 и A_2 – точки первичных бифуркаций, B_1 и B_2 – точки вторичных бифуркаций

Поведение систем в окрестности точек бифуркации показывает, что обычно первая ветвь устойчива, а остальные ветви, как правило, неустойчивы. В целом классификация бифуркаций свидетельствует о возможности их изучения с помощью теории катастроф. Существует мнение, что вблизи бифуркаций возникают большие неустойчивости, из-за которых появляются большие трудности применения традиционных вероятностных методов поведения подобных систем [7].

2.2. Время – это не параметр или метка, а оператор, тесно связанный с оператором микроскопической энтропии и функциями Ляпунова

Традиционное представление.

Не вызывает сомнений утверждение: для устойчивых систем небольшое изменение точности начальных условий не имеет существенного значения. В то же время неустойчивая система даже при незначительном изменении начальных условий и флуктуаций внешних и внутренних факторов имеет большие изменения: траектории поведения становятся идеализациями из-за изменения структуры фазового пространства. Напомним, что предложенная Л. Больцманом (1844–1906) концепция необратимости постулирует: «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе стохастичности, существующей в микроскопическом масштабе» [7].

Если к этому еще добавить влияние необратимости, то больцмановский подход к описанию систем (опуская все подробности) сводится к следующему: динамика \rightarrow марковский процесс (вероятности) \rightarrow энтропия.

Обратимся сначала к оператору микроскопической энтропии M через оператора Лиувилля L .

Основным недостатком классической механики является принцип описания природы перехода из одного состояния в другое с применением траекторий в фазовом пространстве. В то же время более прогрессивным считается применение методов современного функционального анализа – операторного исчисления. И далее, задолго до достижений в исследовании асимметрии времени Нобелевского лауреата И. Р. Пригожина [7, 8, 22], в начале XX в. А. М. Ляпунов (1906) [5] предложил для решения задач неравновесной термодинамики ввести функции изменчивости временной симметрии, получившие позднее название «функции Ляпунова». В работах [7, 8, 22] было доказано, что с величиной микроскопической энтропии M существуют дополнительные свойства, не включаемые в динамическое описание функционала Ляпунова, зависящего от координат и импульсов:

$$\Omega = \int \rho^2 dpdq > 0 \quad (7)$$

и более общего вида

$$\Omega = \int \rho(t) M \rho(t) dpdq \geq 0, \quad (8)$$

где $M \geq 0$, $\frac{dM}{dt} = D \leq 0$; p и q – координаты и импульсы; $\rho(t)$ – их функции плотности.

Так как целью настоящей статьи является поиск возможностей использования операторного языка для оценки показателей долговечности, то одним из подходов для решения этой задачи является использование для описания систем одновременно и динамики (оператор Лиувилля L), и термодинамики (оператор микроскопической энтропии M), а также функционала Ляпунова (7) с помощью коммутатора

$$-i(LM - ML) = D \leq 0. \quad (9)$$

При этом учитывается, что собственных функций операторов L и M не существует и необходимы свойства дополнительности того или другого типа стохастичности движения.

Именно поэтому далее в п. 2.3 статьи будет рассмотрено решение следующей важной задачи: предложена более «тонкая» классификация структурно и функционально сложных систем на «внутренне случайные» и «внутренне необратимые». Внутренне случайные системы должны обладать возможностью описания повышенной сложности, т.е., например, допускать отображение на цепи Маркова. Внутренне необратимые системы должны иметь отображение, которое приводит к внутреннему различию времени между «прошлым» и «будущим». Поэтому в добавление к изложенному выше в п. 3 настоящей статьи будет рассмотрена еще одна концепция: для описания динамики связи между операторами M и L вводится новый тип времени, оператор «внутреннего» времени T .

И тогда с включением еще и функции Ляпунова замыкается связь между динамикой и термодинамикой, и в итоге четко может быть дано новое понятие времени: оно не «метка», связанная с траекториями, а определяющий фактор эволюции вообще. И только тогда появляется возможность строго математического толкования понятию «возраста» системы в теории долговечности структурно и функционально сложных систем.

2.3. Концепция асимметрии времени во внутренне случайных и внутренне необратимых системах

Нетрадиционное представление.

К внутренне случайным системам относятся системы, имеющие: а) стохастичность независимо от других переменных и б) оператор преобразования Λ . У другого класса систем, называемых внутренне необратимыми, кроме оператора преобразования Λ , в соответствии со вторым началом термодинамики выполняется еще и принцип отбора. Причем обе эти разновидности систем имеют строгое аналитическое обоснование [7].

И еще одно важное замечание: такое двухступенчатое описание эволюции систем определяется в фазовом пространстве функциями распределения состояния ρ , а не описанием точек состояния траекториями фазового пространства. Эволюция функций распределения состояния систем $\rho(t)$ описывается унитарным оператором эволюции U_t

$$U_t = e^{-iLt}, \quad (10)$$

где L – оператор Лиувилля $i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho$ и

$$\rho(\omega) = U_t \rho(\omega), \quad (11)$$

а ω – точка на кривой траектории зависимости исследуемой физической величины $Y(t)$ в фазовом пространстве.

Здесь необходимо подчеркнуть следующее:

1) если унитарность классического оператора эволюции U_t определяется, как и в квантовой механике, физическим величинам $Y(t)$ соответствуют операторы, которые в фазовом пространстве сводятся к точечным преобразованиям, лишь «кажутся» операторами, и тогда соотношение (11) можно записать в виде

$$\rho(\omega) = U_t \rho(\omega) = \rho(Y, \omega), \quad (12)$$

2) в подходе, разработанном в работе [7], унитарный оператор должен порождать группу

$$U_t U_s = U_{t+s} \quad (13)$$

при любых вещественных t и s .

Далее, опуская промежуточные рассуждения и выкладки, которые известны по книге И. Р. Пригожина [7], можно для включения вероятностного описания принять

$$\tilde{\rho}_t(\omega) = W_t \tilde{\rho}_0(\omega), \quad (14)$$

и тогда вместо (13) возможно иметь полугруппу операторов

$$W_t W_s = W_{t+s}, \quad (15)$$

где $t, s \geq 0$.

Таким образом, если динамический процесс, отображаемый зависимостью (13), не позволяет различать будущее от прошлого, то учет стохастических особенностей является способом, учитывающим эволюцию времени при анализе состояния сложных систем. И как вывод: операторы полугруппы W , ориентированные в прошлое $t, s \leq 0$, удовлетворяют соотношению

$$W_t W'_s = W'_{t+s}. \quad (16)$$

Тогда оператор преобразования Λ , учитывающий как динамическое описание системы, так и вероятностное, имеет вид

$$\tilde{\rho} = \Lambda \rho. \quad (17)$$

И тогда если для преобразования Λ существует обратное преобразование Λ^{-1} , то оно не унитарно

$$W_t = \Lambda \cup \Lambda^{-1}. \quad (18)$$

Таким образом, установлено чрезвычайно важное утверждение: «вместе с преобразованием Λ , порождающим полугруппу эволюции W_t с возрастанием энтропии, при $t \geq 0$, существует другое преобразование Λ' , порождающее другую полугруппу эволюции

$$W'_t = \Lambda' \cup \Lambda^{-1}, \quad (19)$$

в которой W'_t соответствует возрастанию энтропии в противоположном направлении времени $t < 0$ [7].

Теперь предлагается новая концепция асимметрии времени для внутренне случайных и внутренне необратимых структурно и функционально сложных систем, в которой доказано, что:

- 1) необходимым условием существования оператора преобразования Λ с двумя свойствами является случай, когда а) движение (динамика) сильно неустойчиво, б) обладает высокой чувствительностью к начальным условиям, т.е. наличие фактора перемешивания;
- 2) достаточным условием является существование K -поток (А. Н. Колмогоров, В. И. Арнольд и Ю. К. Мозер [16–18]);
- 3) для внутренне необратимых систем кроме существования нового преобразования Λ должно также выполняться требование наличия принципа отбора в соответствии со вторым началом термодинамики.

3. Концепция применения оператора внутреннего времени для определения показателей долговечности структурно и функционально сложных систем

Исходя из выводов концепций, описанных в пп. 2.2 и 2.3, представляется возможным сформулировать следующий подход к содержанию постулатов внутреннего времени. Необходимое и достаточное условие новой концепции для перехода от оператора M к оператору внутреннего времени T и на его основе к формулированию «возраста» СФСС, с учетом а) функций Ляпунова вида (7) и (8), б) соотношения теоремы Пуанкаре – Мисры [7], в) условия 1) – 3) в п. 2.3 данной статьи: для случая K -поток оператору L сопоставляется такой сопряженный оператор T , что их коммутатор (9) равен

$$-i[L, T] = -i(LT - TL) = 1, \quad (20)$$

где 1 – единичный оператор. В этом случае классификация динамических систем основывается на спектральных свойствах оператора Лиувилля, где оператору L соответствует число λ . Затем находим оператор T , который в том же представлении определяется производной $i(\partial/\partial\lambda)$.

А это означает: сопряженный оператор T соответствует «времени» в том смысле, что представление

$$L \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}, T \rightarrow t \quad (21)$$

удовлетворяет коммутационному уравнению (20).

Выражение (20) позволяет получить соотношение для среднего внутреннего времени. Средние значения $\langle T \rangle$ и $\langle T^2 \rangle$ определяются с помощью билинейных форм

$$\langle T \rangle = \text{tr} \rho^T, \langle T^2 \rangle = \text{tr} \rho^T T^2 \rho. \quad (22)$$

И тогда «обычное» время как динамический параметр есть новое соотношение неопределенности с оператором Лиувилля:

$$\frac{d}{dt} \langle T \rangle = \frac{d}{dt} \text{tr} \left[(e^{-iLt} \rho)^T T e^{-iLt} \rho \right] = i \text{tr} \left[\rho^T e^{iLt} (LT - TL) e^{-iLt} \rho \right] = \text{tr} \rho^T \rho = \text{const}. \quad (23)$$

Если найти подходящую нормировку константе правой части (22), равной единице, то

$$dt = dT. \quad (24)$$

Из выражений (22) – (24) следует: 1) внутреннее время T совпадает с астрономическим временем t , 2) внутреннее время совершенно отличается от времени, нумеруемого в классической или квантовой механике. Эти выводы получаются из анализа нового соотношения неопределенности с оператором Лиувилля (23).

Совпадение текущего времени t и среднего внутреннего $\langle T \rangle$ возможно только в том случае, когда собственные значения оператора T , то самое время, которое считывается с циферблата обычных часов:

$$T\rho(x, v, t) = t\rho(x, v, t), \quad (25)$$

где x – точка фазового пространства X ; v – функция скорости изменения точки x в X во времени t .

Во всех остальных случаях из выражений (20) – (24) следуют чрезвычайно важные принципиально новые выводы:

- 1) макроскопическое время есть среднее от оператора внутреннего времени системы;
- 2) «возраст» системы зависит от самого распределения системы в фазовом пространстве и не является внешним параметром;
- 3) «возраст» системы является средним значением от «индивидуальных» времен ансамбля.

После сделанных выводов можно пойти еще дальше.

Если выражения (9) и (20) справедливы, то вместо (20) можно, как это сделано в работах [7, 8], для перехода к вероятностному описанию сильно неустойчивых систем, использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_i (10) и оператором T вида

$$U_i^T T U_i = T \cdot t \cdot 1, \quad (26)$$

где

$$T \chi = n \chi_n, \quad (27)$$

χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» n .

Для количественного описания значений показателей долговечности, таких как ресурс, срок службы и их остаточные значения, в данный момент времени применения по назначению объектов СФСС необходимо получить аналитические зависимости показателей долговечности от функции распределения состояний объектов ρ и значений оператора внутреннего времени T . С этой целью рассмотрим полную систему собственных функций оператора T выражения (27).

Известно, что любая функция распределения состояний системы ρ может иметь разложение по собственным функциям

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n. \quad (28)$$

Аналогичным образом можно получить и полную систему собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Если известна точная локализация системы, то функция ρ имеет вид δ -функции:

$$\rho = \delta_{m_0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n(x_0, y_0)Y_n(x, y), \quad (29)$$

где x и y – оси координат.

Тогда можно утверждать:

- 1) в выражение (29) входят все «возрасты» системы с равными весами;
- 2) существует новая дополнительность между описанием системы на языке точек в фазовом пространстве и «разбиений», которые соответствуют различным внутренним «возрастам» системы;
- 3) внутренний возраст свидетельствует о новом нелокальном описании систем.

Приняв еще два предложения, если функция распределения ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и если по сравнению с равномерным равновесным распределением возможен избыток $\bar{\rho}$, равный

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n, \quad (30)$$

то каждому состоянию системы ρ возможно сопоставить средний возраст $\langle T \rangle_\rho$, равный

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \bar{\rho}, T\bar{\rho} \rangle}{\langle \bar{\rho}, \bar{\rho} \rangle}. \quad (31)$$

Учитывая ортонормированность функции Y_n и (29), можно формулу (31) преобразовать к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \quad (32)$$

Тогда в соответствии с выражением (26) получаем чрезвычайно важное выражение для среднего возраста состояния системы ρ :

$$\langle T_{\rho_t} \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t, \quad (33)$$

а именно, средний возраст состояния системы изменяется адекватно с внутренним временем или с обычным внешним временем. Более того, если

$$\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2, \quad (34)$$

то

$$d\langle \delta T^2 \rangle = 0, \quad (35)$$

т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна.

Отсюда появляется возможность сформулировать важные следствия.

Следствие 1. Феномен «внутреннее время» функционирования СФСС любого сложного объекта принципиально не похож на внешнее время.

Следствие 2. Возраст системы зависит не от срока службы какой-либо подсистемы или группы ее элементов, хотя и кажущихся наиболее важными, определяющими систему, а равен средней обобщенной оценке, относящейся ко всем частям системы.

Это противоречит принятой точке зрения в теории надежности и вероятности о «слабом звене».

Следствие 3. Неустойчивость процессов, протекающих в системе, является одним из «главных факторов появления внутреннего времени», и приводит к следующему источнику не локальности, но уже в классической механике.

Следствие 4. Суть следствия 3 приводит к возможности построения преобразования Λ , которое в свою очередь позволяет нарушить симметрию времени, т.е. осуществить переход от классической механики к термодинамике в модусах времени «прошлое–настоящее–будущее» [6–8, 19, 20].

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. Неустойчивые и необратимые процессы в СФСС имеют свои закономерности на всех трех взаимосвязанных уровнях описания СФСС: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. В конечном итоге такие микроскопические процессы, как химические реакции, диффузия, адсорбция, распад твердых растворов и другие, а также изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел являются причиной более сложных деградиационных макроскопических процессов, как коррозия, эрозия, износ, ползучесть, усталость, деформации и др. Причем такого рода необратимые процессы развиваются под действием комплекса внешних и внутренних эксплуатационных факторов в СФСС (динамические и статические механические нагрузки, температура, влажность, давление, термогидравлические удары, облучение, перенос и осаждение продуктов коррозии, примесей и другие) и могут приводить в конечном итоге к возникновению отказов, аварий и катастроф.

2. В теории неустойчивых и необратимых процессов СФСС появляется «второе» (внутреннее) время, связанное с флуктуациями как на микроскопическом, так и макроскопическом уровнях описания. Внутреннее время отличается от астрономического времени, поскольку появляется из-за случайного поведения траекторий в оборудовании динамических систем. Внутреннее время – это оператор, подобный операторам, соответствующий величинам в квантовой механике.

3. Необратимые процессы и асимметрия внутреннего времени по мнению многих исследователей теории детерминистического хаоса приводят к глубоким изменениям на самом фундаментальном уровне описания природы – на уровне пространственно-временного континуума.

4. Исходя из выводов 1–3 в данной работе принята концептуальная основа, опирающаяся на два фундаментальных положения: возрастание энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики, которое в конечном итоге и приводит к асимметрии времени, и время не параметр, а оператор, тесно связанный с операторами микроскопической энтропии, преобразования и функциями Ляпунова.

5. Если в классической механике Евклида, Галилея и Ньютона описывалось поведение системы вблизи точки равновесия, когда время и пространство однородно и изотропно, то вдали от равновесного состояния СФСС картина резко изменяется: возникновение диссипативных структур, флуктуаций и неустойчивостей приводит к нарушению пространственно-временной однородности парадигмы, т.е. вдали от равновесного состояния систем могут возникать последовательности неустойчивостей, которые могут приводить в конечном итоге к бифуркациям. При этом между двумя точками бифуркаций в системе выполняются детерминистические закономерности, а в окрестностях точек бифуркаций существенную роль играют флуктуации, требующие вероятностного описания поведения сложных систем с использованием понятий детерминистического хаоса и аттракторов. Именно в силу указанных причин в задачах теории долговечности СФСС необходим новый подход с учетом операторов микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени.

6. Переход от методов классической механики к операторному языку означает, что классическая механика, занимающаяся изучением траекторий, должна сосредотачивать свое внимание на исследовании эволюции во времени функций распределения состояния сложных систем.

7. В течение длительного времени (вторая половина XIX в. – первая половина XX в.) существовала концепция описания эволюции динамических систем, включающая в себя два вида: первая – прослеживание точек состояния систем по траекториям в фазовом пространстве, вторая (Гиббса – Эйнштейна) – введение в фазовом пространстве функций распределения состояний системы ρ . Причем поток точек состояния систем в фазовом пространстве должен сохранять свой объем (или меру).

8. Во второй половине XX в. появилась новая концепция включения эволюции состояния систем во времени, в которой рассматривается связь оператора микроскопической эволюции M с оператором Лиувилля L , задающей пространство энтропии и появление новой формы дополнительности между динамикой и термодинамикой. А так как общих собственных функций у операторов M и L не существует, то приходится решать дилемму: либо исследовать собственные функции оператора M , либо оператора L в отдельности. А это, по сути, является необходимостью нахождения дополнительных свойств того или иного типа стохастичности движения. В конечном итоге была предложена более «тонкая» классификация структурно и функционально сложных систем: внутренне случайные и внутренне необратимые системы.

9. Для внутренне случайных систем вводятся 1) специальный оператор преобразования Λ ; 2) стохастичность приобретает внутренний смысл независимо от каких-либо скрытых переменных; 3) такие системы должны обладать возможностью описания повышенной сложности, например, допускать отображение на цепи Маркова; 4) новый тип времени – «оператор внутреннего времени» системы T для описания динамики связи между операторами M и L . А с включением в описание динамики внутренне случайных систем еще и функций Ляпунова замыкается связь между динамикой и термодинамикой, и в итоге время является определяющим фактором эволюции вообще. Таким образом, с введением нового понятия внутреннего времени появляется возможность строгого математического толкования конкретного «возраста» системы и вычисления показателей долговечности СФСС типа «ресурс», «срок службы» и их остаточных значений в данный календарный момент времени.

10. Внутренне необратимые системы должны иметь отображения, для которых 1) существует оператор преобразования Λ ; 2) выполняется принцип отбора в соответствии со вторым началом термодинамики и 3) существует отображение, позволяющее различать время между «прошлым» и «будущим».

11. В концепции асимметрии времени для систем, которые в комплексе являются и внутренне случайными, и внутренне необратимыми (т.е. конструктивно и функционально сложными системами) доказано, что их описания должны удовлетворять следующим условиям: 1) необходимыми условиями существования являются: а) наличие оператора преобразования Λ , б) движение (динамика) сильно неустойчиво или обладает высокой чувствительностью по отношению к начальным условиям, т.е. наличие фактора перемешивания; 2) достаточным условием – существование K -потоков (А. Н. Колмогоров, В. И. Арнольд и Ю. К. Мозер); 3) для внутренне необратимых систем, кроме существования нового преобразования Λ , должно выполняться требование наличия принципа отбора в соответствии со вторым началом термодинамики.

12. Математически строго доказано, что если для систем, являющихся внутренне случайными и внутренне необратимыми, выполняются условия вывода 11, то: 1) макроскопическое время СФСС равно среднему значению от оператора внутреннего времени системы; 2) «возраст» системы зависит от самого распределения системы в фазовом пространстве и не является внешним параметром; 3) «возраст» системы является средним значением от «индивидуальных» времен ансамбля.

13. В теории эволюции внутреннего времени систем для перехода к вероятностному описанию предлагается использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_t (см. вывод 7) и оператором T вида $U_t^T T U_t = T + t \cdot I$, где $T \chi = n \chi_n$, и χ_n – собственная функция оператора T , соответствующая «возрасту» системы n .

14. Однако для количественного описания значений показателей долговечности СФСС необходимо знание аналитических зависимостей состояния системы ρ от значения оператора внутреннего времени T , т.е. знание полной системы собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Доказано, что если это становится возможным, тогда функция ρ имеет вид δ -функции (29). Это позволяет утверждать следующее: 1) в выражении для δ -функции описания ρ входят все «возрасты» системы с равными весами; 2) существует новая дополнительность между описанием системы на языке точек в фазовом пространстве и разбиениями, которые соответствуют различным внутренним «возрастам» системы; 3) «внутренний возраст» свидетельствует о новом нелокальном описании системы. Если при этом принять два предположения: а) функция распределения состояния системы ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и б) по сравнению с равномерным и равновесным распределением возможны избытки $\bar{\rho} = \rho - 1$, то каждому состоянию $\bar{\rho}$ возможно сопоставить средний возраст $\langle T \rangle_{\bar{\rho}} = \langle n \rangle$.

15. В конечном итоге получаем выражение для «среднего возраста» состояния системы ρ $\langle T_\rho \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t$, это свидетельствует о том, что средний возраст состояния системы изменяется адекватно внутреннему времени или с обычным внешним временем t . И даже более того, если $\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2$, то $d\langle \delta T^2 \rangle = 0$, т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна. Проанализировав выводы 13–15, появляется возможность сформулировать вывод 16 в виде четырех следствий, которые звучат как постулаты содержания всей статьи.

16. Следствие 1. Феномен «внутреннее время» любого сложного объекта принципиально отличается от времени функционирования СФСС.

Следствие 2. Возраст системы зависит не от срока службы (ресурса) какой-либо ее подсистемы или группы элементов, хотя и кажущихся наиболее важными, определяющими систему, а равен средней обобщенной оценке, относящейся ко всем частям системы. Это противоречит часто принимаемой точке зрения в теориях надежности и безопасности, положениях о «слабом звене», на которое должно быть обращено главное внимание при оценке долговечности.

Следствие 3. Неустойчивость процессов (особенно сильная) является одним из главных факторов появления «внутреннего времени» как источника нелокальности.

Следствие 4. Суть следствия 3 состоим в том, что оно приводит к возможности построения нарушающего симметрию времени оператора преобразования Λ и осуществления перехода от классической механики к термодинамике в модусах «прошлое–настоящее–будущее».

Список литературы

1. Острейковский В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф : монография. – М. : Высш. шк., 2005. 326 с.
2. Острейковский В. А. Математические модели теории техногенного риска : монография. Сургут : Изд. центр СурГУ, 2012. 252 с.
3. Острейковский В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ : монография. М. : Физматлит, 2008. 349 с.
4. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н., Мишкина В. С. Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем // Итоги науки. Т.1. Избранные труды международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. М. : РАН, 2013. Гл. 2. С. 12–31.
5. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. Череповец : Меркурий-ИПРЕСС, 2000. 386 с.
6. Вернадский В. И. Философские мысли натуралиста. М. : Наука, 1988. 520 с.
7. Prigogine I. From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences. San Francisco : W.H. Freeman&Co., 1980. 278 p.
8. Пригожин И. Р. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. 216 с.
9. 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.
10. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки. Вып. 37. Избран. тр. Междунар. симпозиума по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. С. 69–111.
11. Боголюбов Н. Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. М. : Гостехиздат, 1946. 120 с.
12. Власов А. А. Теория вибрационных свойств электронного газа и ее приложения. М. : ЛЕНАНД, 2017. 232 с.
13. Леонтович М. А. Основные уравнения кинетической теории газов с точки зрения теории случайных процессов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1935. Т. 5. С. 211.
14. Климонтович Ю. Л. Статическая теория неравновесных процессов в плазме. М. : ЛЕНАНД, 2019. 280 с.
15. Острейковский В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М. : Энергоатомиздат, 1994. 286 с.
16. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1932. Вып. 5. С. 5–41.
17. Арнольд В. И. Особенности, бифуркации и катастрофы // Успехи математических наук. 1983. Т. 141. С. 569–590.
18. Мозер Ю. Заметки о динамических системах. М. : Регулярная и хаотическая динамика, Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. 356 с.
19. Денисова Т. Ю. Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / Т. Ю. Денисова, В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. 253 с.

20. 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.
21. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных систем // Надежность и качества сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.
22. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Перспективы применения феномена асимметрии времени в задачах оценки остаточного ресурса сложных критически важных систем // Фундаментальные и прикладные проблемы науки : материалы XIII Междунар. симп. М. : РАН, 2018. С. 29–44.
23. Муравьев И. И., Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Моделирование асимметрии внутреннего времени с позиций второго начала термодинамики в задачах оценивания долговечности сложных систем // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы межрегион. практ. конф. (Севастополь 18–22 сентября 2018 г.). Севастополь : СевГУ, 2018. С. 79–81.

References

1. Ostreykovskiy V.A. *Analiz ustoychivosti i upravlyaemosti dinameskikh sistem metodami teorii katastrof: monografiya = Analysis of stability and controllability of dynamic systems by methods of the theory of catastrophes: monograph*. Moscow: Vyssh. shk., 2005:326. (In Russ.)
2. Ostreykovskiy V.A. *Matematicheskie modeli teorii tekhnogenogo riska: monografiya = Mathematical models of the technogenic risk theory: monograph*. Surgut: Izd. tsentr SurGU, 2012:252. (In Russ.)
3. Ostreykovskiy V.A., Shvyryaev Yu.V. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Veroyatnostnyy analiz: monografiya = Safety of nuclear power plants. Probabilistic analysis: monograph*. Moscow: Fizmatlit, 2008:349. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N., Mishkina V.S. Quantitative risk assessment in the theory of technogenic safety of complex dynamic systems. *Itogi nauki. T.1. Izbrannye trudy mezhdunarodnogo simpoziuma po fundamental'nym i prikladnym problemam nauki = Results of science. Vol. 1. Selected works of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science*. Moscow: RAN, 2013;2:12–31. (In Russ.)
5. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya = General problem of traffic stability*. Cherepovets: Merkurii-PRESS, 2000:386. (In Russ.)
6. Vernadskiy V.I. *Filosofskie mysli naturalista = Philosophical thoughts of a naturalist*. Moscow: Nauka, 1988:520. (In Russ.)
7. Prigogine I. *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*. SanFrancisco: W.H. Freeman&Co., 1980:278.
8. Prigozhin I.R. *Konets opredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody = The end of certainty. Time, chaos, and the new laws of nature*. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999:216. (In Russ.)
9. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoj AES) = Resource and service life of the equipment of nuclear power units (on the example of the power units of the Smolensk NPP)*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017:535. (In Russ.)
10. 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. Vyp. 37. Izbran. tr. Mezhdunar. simpoziuma po fundament. i priklad. problemam nauki = Results of science. Issue 37. Elected. tr. International. the foundation symposium. and the butt. problems of science*. Moscow: RAN, 2018: 69–111. (In Russ.)
11. Bogolyubov N.N. *Problemy dinamicheskoy teorii v statisticheskoy fizike = Problems of dynamical theory in statistical physics*. Moscow: Gostekhizdat, 1946:120. (In Russ.)
12. Vlasov A.A. *Teoriya vibratsionnykh svoystv elektronnoy gaza i ee prilozheniya = Theory of vibrational properties of an electron gas and its applications*. Moscow: LENAND, 2017:232. (In Russ.)
13. Leontovich M.A. Basic equations of the kinetic theory of gases from the point of view of the theory of random processes. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1935;5:211. (In Russ.)
14. Klimontovich Yu.L. *Sticheseskaya teoriya neravnovesnykh protsessov v plazme = Static theory of nonequilibrium processes in plasma*. Moscow: LENAND, 2019:280. (In Russ.)
15. Ostreykovskiy V.A. *Starenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy = Aging and forecasting of the service life of nuclear power plant equipment*. Moscow: Energoatomizdat, 1994:286. (In Russ.)
16. Kolmogorov A.N. On analytical methods in probability theory. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Advances in mathematical sciences*. 1932;5:5–41. (In Russ.)
17. Arnol'd V.I. Features, bifurcations, and catastrophes. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Advances in mathematical sciences*. 1983;141:569–590. (In Russ.)
18. Mozer Yu. *Zametki o dinamicheskikh sistemakh = Notes on dynamic systems*. Moscow: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, Izhevskiy institut komp'yuternykh issledovaniy, 2011:356. (In Russ.)

19. Denisova T.Yu., Ostreykovskiy V.A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogenogo riska slozhnykh dinamicheskikh sistem = Ontology of the time phenomenon in the theory of forecasting technogenic risk of complex dynamic systems*. Surgut: Pechatnyy mir, 2017:253. (In Russ.)
20. 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 dynamical systems: monograph*. Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
21. 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.)
22. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Prospects for the application of the time asymmetry phenomenon in the problems of estimating the residual resource of complex critical systems. *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki: materialy XIII Mezhdunar. simp. = Fundamental and applied problems of science: materials of the XIII International simp*. Moscow: RAN, 2018:29–44. (In Russ.)
23. Murav'ev I.I., Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Modeling of internal time asymmetry from the standpoint of the second principle of thermodynamics in the problems of estimating the durability of complex systems. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologiy: materialy mezhtregion. prakt. konf. (Sevastopol' 18–22 sentyabrya 2018 g.) = Perspective directions of development of domestic information technologies: materials of interregional practical conference*. Sevastopol: SevGU, 2018:79–81. (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, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Светлана Александровна Лысенкова

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

Валерий Григорьевич Недорезов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nedval@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Vladislav A. Ostreykovsky

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of informatics
and computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Svetlana A. Lysenkova

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

Valeriy G. Nedorezov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of sub-department of welding,
founding manufacture and materials science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)