УДК 519.2:621.0.039+517.98 DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-4

В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко

О МЕТОДЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАТОРА ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ ОБОСНОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

V. A. Ostreykovsky, S. A. Lysenkova, E. N. Shevchenko

ON THE APPROACH TO APPLYING THE INTERNAL TIME OPERATOR IN THE PROBLEMS OF JUSTIFICATION OF THE LONGEVITY OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цели*. Вполне возможно, что одной из важных причин большого числа аварий и катастроф является неполный учет при проектировании структурно и функционально сложных систем (СФСС) условий их жизни и в том числе недостатками в расчетах долговечности с учетом неустойчивости и необратимости процессов, протекающих в оборудовании динамических систем. При этом особого внимания заслуживают вопросы одновременного учета существования разнообразных факторов конструктивного и эксплуатационного характера в условиях асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее». Без знания влияния комплекса факторов внешней среды и их разнообразия невозможно с требуемой точностью предсказывать будущее поведение сложной системы и тем более без знания ее прошлого и значений начальных условий. Неустойчивость и необратимость процессов приводят к разрушению траектории поведения оборудования СФСС и, следовательно, к возможному появлению многообразия структурированных коллективных состояний. А это грозит появлением отказов, аварий и катастроф оборудования сложных комплексов. Исследования неустойчивостей и необратимых процессов в сложных системах привели к образованию стройной теории использования понятия второго (внутреннего) времени, как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровнях описания СФСС. Так как из-за случайного поведения траекторий оборудования динамических систем внутреннее время существенно отличается от астрономического времени, оно является оператором, соответствующим величинам в квантовой механике. И вследствие этого оно приводит к глубоким изменениям на функциональном уровне пространственно-временного континуума. 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 опре-

Abstract. *Background*. It is possible that one of the important reasons for a large number of accidents and disasters is the incomplete consideration of their living conditions when designing structurally and functionally complex systems (SSSS), including shortcomings in the calculation of durability, taking into account the instability and irreversibility of processes in the equipment of dynamic systems. At the same time, special attention is paid to the issues of simultaneous consideration of the existence of various factors of a constructive and operational nature in the conditions of time asymmetry in the past-present-future modes. Without knowledge of the influence of a complex of environmental factors and their diversity, it is impossible to predict the future behavior of a complex system with the required accuracy, and even more so without knowledge of its past and the values of the initial conditions. The instability and irreversibility of the processes lead to the destruction of the trajectory of behavior of the SPSS equipment and, consequently, to the possible emergence of a variety of structured collective states. And this threatens the appearance of failures, accidents and catastrophes of equipment of complex complexes. Investigations of instabilities and irreversible processes in complex systems have led to the formation of a coherent theory of using the concept of second (internal) time, both at the microscopic and macroscopic levels of the description of SPSS. Since, due to the random behavior of the trajectories of the equipment of dynamic systems, the internal time differs significantly from astronomical time, it is an operator corresponding to quantities in quantum mechanics. And as a consequence of this, it leads to profound changes at the functional level of the space-time continuum. Strongly unstable systems with a large number of possible irreversible processes are a source of coherence of technological safety phenomena. If, at or near equilibrium, the state of the SPSS equipment, at least for a sufficiently long period of time, is completely determined by boundary conditions, then far from equilibrium, many dissipative structures. That is why in the last three decades of the XX and the beginning of the XXI century, the concepts of deterministic chaos деляется краевыми условиями, то вдали от равновесия возможно появление множества диссипативных структур. Именно поэтому в последние три десятилетия XX и начале XXI в. в качестве обобщенного параметра СФСС используются понятия детерминистического хаоса и аттрактора. В силу сказанного целью данной статьи является анализ структуры и содержания концепции оператора внутреннего времени в теории долговечности сложных динамических систем. *Материалы и методы*. Концептуальной основой методологии в статье является закон возрастания энтропии и возникновение на его базе асимметрии времени в модусах «прошлое–настоящее–будущее». При этом анализируется новое понятие «внутреннее время», характеризующее необратимые процессы в неустойчивых динамических системах. Такой подход позволил получить аналитические выражения показателей долговечности на базе новой структуры пространства-времени: непротиворечивые средние значения «возраста» систем. *Результаты*. Сформулирована и раскрыта концепция применения понятия «внутреннее время» в теории долговечности структурно и функционально сложных систем, в том числе и специального назначения.

Ключевые слова: операторы микроскопической энтропии, Лиувилля и внутреннего времени, долговечность.

and attractor are used as a generalized parameter of the SSSS. In view of the foregoing, the purpose of this article is to analyze the structure and content of the concept of the operator of internal time in the theory of the durability of complex dynamic systems. *Materials and methods*. The conceptual basis of the methodology in the article is the law of increasing entropy and the emergence on its basis of the asymmetry of time in the modes «past-present-future.» At the same time, the new concept of "internal time", which characterizes irreversible processes in unstable dynamic systems, is analyzed. This approach made it possible to obtain analytical expressions of durability indicators based on the new space – time structure: consistent average values of the "age" of systems. *Results*. The concept of the application of the concept of "internal time" in the theory of the durability of structurally and functionally complex systems, including for special purposes, is formulated and disclosed.

Keywords: operators of microscopic entropy, Liouville and internal time, durability.

Физико-математическое обоснование концепции оператора внутреннего времени

Требуется понимание того, как удается включить необратимость в динамическое описание систем.

Функции Ляпунова вида (1)–(3) сдвигают оператор микроскопической энтропии M, зависящий от динамики системы

$$\Omega = \int \rho(t) M \rho(t) dpdq \geq 0\,; \tag{1}$$

$$\Omega = tr\rho^{+} M \rho(t) \geq 0\,; \tag{2}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} \leq 0\,, \tag{3}$$

где p и q – соответственно импульсы и координаты; ρ – плотность вероятности в фазовом пространстве плотности $\rho(p_1, \ldots, p_s, q_1, \ldots, q_s)$.

Линейный оператор Лиувилля L

$$i\frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho\,, \tag{4}$$

$$L = -i\frac{\partial H}{\partial \rho}\frac{\partial}{\partial q} + i\frac{\partial H}{\partial q}\frac{\partial}{\partial p}\,, \tag{5}$$

$$\rho(t) = e^{-iLt}\rho(0)\,, \tag{6}$$

где H – гамильтониан.

Оператор Лиувилля действует на матрицу и, следовательно, принадлежит к числу операторов.

Оператор M также является супероператором, так как тоже действует на матрицу плотности ρ.

Но оператор M принципиально отличается от оператора L из-за различия между чистыми и смешанными состояниями. Оператор L, действуя на ρ, соответствует чистому состоянию и оставляет систему в чистом состоянии. А оператор M не сохраняет различия между чистыми и смешанными состояниями.

Как разобраться с физическим смыслом соответствующих понятий? Для этого: 1) сначала необходимо установить связь между существованием функций Ляпунова вида (1)–(3) и больцмановским подходом, а затем 2) рассмотреть некоторые приложения с помощью включения непротиворечивым способом необратимости в динамическое описание систем.

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

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 значения: траектории поведения систем 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» [1].

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

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

Переход от методов классической механики к операторному языку означает, что классическая механика перестает заниматься изучением траекторий и сосредотачивает все внимание на исследовании эволюции во времени функций распределения. И далее задолго до достижений в исследовании асимметрии времени Нобелевского лауреата И. Р. Пригожина [2–4] в начале XX в. А. М. Ляпунов (1906 г.) [5, 6] предложил для решения задач неравновесной термодинамики ввести функции изменчивости временной симметрии, получившие позднее название «функции Ляпунова». В работах [2–4] было доказано, что с величиной микроскопической энтропии M существуют дополнительные свойства, не включаемые в динамическое описание функционала Ляпунова, зависящего от координат и импульсов (1)–(3).

Однако если рассмотреть величину M как оператор микроскопической энтропии, не коммутирующий с оператором Лиувилля, то коммутатор

$$-i(LM - ML) = D \leq 0 \tag{7}$$

задает производство микроскопической энтропии. Такой подход приводит к новой форме дополнительности между динамическим и термодинамическим описаниями, так как общих собственных функций у операторов L и M не существует. Другими словами, приходится решать дилемму, а именно: 1) либо исследовать собственные функции оператора L для определения динамики системы, 2) либо анализировать собственные функции оператора M. Из этого следует, что, по сути, необходимы дополнительные свойства, не включаемые в динамическое описание. Для этого необходимы свойства дополнительности того или иного типа стохастичности движения. Поэтому была 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»

И, как следствие, для описания динамики связи между операторами M и L вводится новый тип времени, оператор «внутреннего» времени T.

В работах [2, 4] также строго аналитически доказано, что необходимыми и достаточными условиями для перехода от оператора M к оператору внутреннего времени T являются следующие: 1) существование соотношений теоремы Пуанкаре – Мисры [2] и 2) наличие K-потоков (А. Н. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. К. Мозера [7–9]), оператору Лиувилля L можно сопоставить такой сопряженный оператор T, что их коммутатор (8) равен константе

$$-i[L,T]=-i(LT-TL)=1, \tag{8}$$

где 1 – единичный оператор. Классификация динамических систем основана на спектральных свойствах оператора Лиувилля, в котором оператору L соответствует число λ. Если из каких-то предположений известен оператор L, то возможно отыскать оператор T, который в том же представлении определяется производной $i(\partial/\partial\lambda)$. Это означает, что сопряженный оператор T соответствует «времени» в том смысле, что представление

$$L\to i\frac{\partial}{\partial t}, T\to t, \tag{9}$$

удовлетворяет коммутационному уравнению (8).

Выражение (8) позволяет получить соотношение для среднего внутреннего времени. Средние значения $\langle T\rangle$ и $\langle T^2\rangle$ определяются с помощью билинейных форм

$$\langle T\rangle=tr\rho^T, \langle T^2\rangle=tr\rho^T T^2\rho. \tag{10}$$

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

$$\frac{d}{dt}\langle T\rangle=\frac{d}{dt}tr\left[\left(e^{-iLt}\rho\right)^T Te^{-iLt}\rho\right]=itr\left[\rho^T e^{iLt}\left(LT-TL\right)e^{-iLt}\rho\right]=tr\rho^T\rho=\text{const.} \tag{11}$$

Если найти подходящую нормировку константе правой части (10), равной единице, то

$$dt=dT, \tag{12}$$

т.е. в этом простейшем случае внутреннее время T совпадает с астрономическим временем t. Здесь необходимо подчеркнуть, что принципиально внутреннее время совершенно отличается от времени, нумеруемого в классической или квантовой механике траектории или волновых функций, это следует из нового соотношения неопределенности с оператором Лиувилля (11).

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:

$$T\rho(x,v,t)=t\rho(x,v,t), \tag{13}$$

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

Во всех остальных случаях из выражений (8)–(12) следуют важные 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 (7) и (8) справедливы, то вместо (8) можно, как это сделано в работах [2–4], для перехода к вероятностному описанию сильно неустойчивых систем, использовать следующее соотношение между унитарным оператором U_t и оператором T:

$$U_t^T TU_t=T\cdot t\cdot 1, \tag{14}$$

где

$$T\chi=n\chi_n, \tag{15}$$

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 (15).

Известно, что любая функция распределения состояний системы ρ может иметь разложение по собственным функциям $\{1, Y_n\}$

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n. \tag{16}$$

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:

$$\rho = \delta_{m_0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y_n(x_0, y_0) Y_n(x, y), \tag{17}$$

где *x* и *y* оси координат.

Тогда можно утверждать:

1) в выражение (17) 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 предположения: 1) если функция распределения ρ имеет нулевой возраст при $\chi = \chi_0$ и 2) если по сравнению с равномерным равновесным распределением возможен избыток $\bar{\rho}$, равный

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n Y_n, \tag{18}$$

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

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \bar{\rho}, T\bar{\rho} \rangle}{\langle \bar{\rho}, \bar{\rho} \rangle}. \tag{19}$$

Учитывая ортонормированность функции Y_n и уравнение (17), можно формулу (19) преобразовать к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \tag{20}$$

Тогда в соответствии с формулой (14) получаем чрезвычайно важное выражение для среднего возраста состояния системы ρ:

$$\langle T_{\rho_t} \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t, \tag{21}$$

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

$$\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle = \langle T \rangle^2, \tag{22}$$

то

$$d\langle \delta T^2 \rangle = 0, \tag{23}$$

т.е. дисперсия внутреннего времени постоянна.

Отсюда появляется возможность сформулировать важные следствия.

Следствие 1. Феномен «внутреннее время» функционирования СФСС любого сложного объекта принудительно 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».

Обобщенная схема последовательности оценки и анализа описания СФСС на макроскопическом уровне в теории долговечности

Использование метода Л. Больцмана

Подход, описанный выше в п. 2, очень близок к концепции необратимости Л. Больцмана, приведенной в работе [1]: «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).

Динамика

↓

Марковские процессы

↓

Энтропия через H-функцию Больцмана

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

В последние годы XX в. подход Л. Больцмана получил распространение через применение уравнений для плотных сред. Однако такие 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 не унитарных преобразований Λ. С этой целью рассмотрим «связь между существованием оператора микроскопической энтропии M и теорией преобразования с оператором Λ».

Пусть оператор M и функция Ляпунова Ω имеют следующее соотношение:

$$\Omega = tr\rho^{+} M \rho \geq 0, \tag{24}$$

в котором (24) задает функцию Ляпунова, а оператор M зависит от «динамики». В то же самое время он может быть представлен в виде произведения оператора T и эрмитово сопряженного оператора T^T, так как T – «квадратный корень» из оператора M:

$$M = T^T T \text{ и } \Lambda^{-1} = T. \tag{25}$$

Подставляя (27) в (26), получим

$$\Omega = tr\rho^{+}\tilde{\rho}, \tag{26}$$

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

$$\tilde{\rho} = \Lambda^{-1}\rho. \tag{27}$$

Следовательно, можно сделать выводы:

1) если (26) – функция Ляпунова, то все выпуклые функционалы от $\tilde{\rho}$

$$\Omega = tr\tilde{\rho}\ln\tilde{\rho} \tag{28}$$

также функции Ляпунова;

2) функции Ляпунова вида (26) могут существовать только в новом представлении, получаемом из (24) с помощью преобразования (27);

3) состояние $\tilde{\rho}$, которое приводит к значению $\Omega = \min$, является аттрактором для любых остальных состояний;

4) таким образом, существует тесная связь между существованием оператора энтропии M с теорией преобразования оператора Λ.

Кроме того, важно рассмотреть свойства полученного преобразования, задаваемого соотношениями (24)–(26).

1. Уравнения движения в новом представлении (24)–(26) с учетом (27) имеют вид

$$i\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t} = \Phi\tilde{\rho}, \tag{29}$$

где

$$\Phi = \Lambda^{-1}L\Lambda. \tag{30}$$

И очень важное следствие из выражений (29)–(30): новое преобразование, позволяющее включать необратимость через функции Ляпунова, намного шире простой замены координат, выражаемой унитарным преобразованием. В главе 8 [2] доказано, что разность между Φ и эрмитово сопряженным оператором Φ^{T} не равна тождественно нулю:

$$i(\Phi - \Phi^{T}) \geq 0, \tag{31}$$

т.е. новый оператор движения (29), входящий в преобразование Лиувилля (27) не должен быть эрмитовым, как оператор Лиувилля L, и возникает необходимость выхода за пределы обычного класса унитарных преобразований. Опуская промежуточные рассуждения, можно получить следующие соотношения:

$$\left[\Lambda^{-1}(-L)\right]^{T} = \Lambda(L), \Lambda^{-1}(L) = \Lambda^{T}(L). \tag{32}$$

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

2. Класс уравнений движения с не унитарным законом преобразования.

Известно [2, с. 161–165], для того чтобы перейти от динамического описания поведения систем к термодинамическому, требуется прибегать к новому закону преобразования (32). Такое преобразование носит название унитарное *-преобразование

$$\Lambda^{*}(L) = \Lambda^{T}(-L), \tag{33}$$

(* означает инверсию $L \to -L$). Используя эрмитовость оператора L и соотношения (32)–(33), получаем

$$\Phi^{*} = \Phi^{T}(-L) = \Phi(L) \tag{34}$$

или

$$(i\Phi)^{*} = i\Phi. \tag{35}$$

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

$$i\Phi = \overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} + \overset{\text{нечетн.}}{(i\Phi)}. \tag{36}$$

Условие диссипативности (31), выражающее существование функции Ляпунова Ω, принимает вид

$$\overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} \geq 0, \tag{37}$$

в соответствии с которым четная часть порождает «производство энтропии».

Исходя из вышеизложенного, получена новая форма микроскопического уравнения, которая в явном виде – часть, соответствующая функции Ляпунова. Другими словами, уравнения (36)–(37) содержат обратимую и необратимую части и, следовательно, макроскопическое и термодинамическое различие между обратимыми и необратимыми процессами включено в микроскопическое описание.

Физический смысл уравнений (36)–(37) таков, четный член включает в себя все процессы, дающие положительное приращение функции Ляпунова и сдвигающие систему к состоянию равновесия (рассеяние, рождение, затухание и другие процессы). И вообще, приведенные в п. 3 соотношения объединяют динамику и термодинамику и приводят к существованию динамики с характерной нарушенной «L–t» симметрией. Тогда схема для последовательности анализа этого фундаментального факта может быть представлена следующим образом (рис. 2).

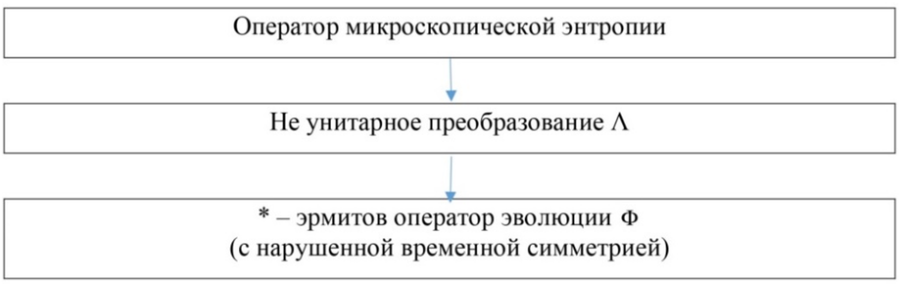

Рис. 2. Последовательность оценки и анализа при описании состояния сложных систем с неунитарным законом преобразования

Заключение

1. 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.

2. 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.

3. 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 $\langle T \rangle_\rho = \langle n \rangle$.

4. В конечном итоге получаем выражение для «среднего возраста» состояния системы ρ $\langle T_{\rho_t} \rangle = \langle T \rangle_{\rho_0} + t$. 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 2–4, появляется возможность сформулировать вывод 5 в виде четырех следствий, которые звучат как постулаты содержания всей статьи.

5. 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 преобразования Λ, и осуществляется переход от классической механики к термодинамике в модусах «прошлое–настоящее–будущее».

6. Результаты, описанные в выводах 1–5, очень близки к концепции необратимости Л. Больцмана: «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе». Последовательность расчетов показателей долговечности систем при использовании кинетических уравнений Л. Больцмана выглядит следующим образом: динамика → Марковские процессы → энтропия через *H*-функцию Больцмана. 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 Λ.

7. В конце XX в. сложился принципиально новый подход к оценке и анализу показателей долговечности сложных систем с учетом асимметрии времени и неунитарных преобразований Λ. Математически строго получен оператор движения Φ вида: $i\Phi = \overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} + \overset{\text{нечетн.}}{(i\Phi)}$, в котором содержатся обратимые и необратимые части. Условие диссипативности, выражающее существование функции Ляпунова $\overset{\text{четн.}}{(i\Phi)} \geq 0$, порождает «производство энтропии», и, следовательно, макроскопическое термодинамическое различие между обратимыми и необратимыми процессами включено в микроскопическое описание. Физический смысл уравнений (36) и (37): четный член включает в себя все процессы, дающие вклад в положительное приращение функции Ляпунова и сдвигающее систему к состоянию равновесия.

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.

Сама методика (последовательность) описания оценки и анализа состояния таких систем будет детально рассмотрена авторами статьи позднее.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №18-07-00391, № 18-47-860007).

Библиографический список

1. *Больцман, Л.* Лекции по теории газов : пер. с нем. / Л. Больцман. – Москва, 1956. – 554 с.
2. *Пригожин, И. Р.* От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. / И. Р. Пригожин ; под ред. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 304 с.
3. *Пригожин, И. Р.* Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы / И. Р. Пригожин. – Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. – 208 с.
4. *Пригожин, И. Р.* Время. Хаос. Квант: к решению парадокса времени : пер. с англ. / И. Р. Пригожин, И. Стенгерс ; под ред. В. И. Аршинова. – Москва : Книжный дом «Либроком», 2009. – 240 с.
5. *Ляпунов, А. М.* Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – Москва – Ленинград, 1956. – Т. 2. – 472 с.
6. *Ляпунов, А. М.* Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. – Москва : Изд. АН СССР, 1950. – 470 с.
7. *Колмогоров, А. Н.* Теория вероятностей и ее применения / А. Н. Колмогоров // Математика и естествознание в СССР. – Москва ; Ленинград : ГОНТИ, 1938. – С. 51–61.
8. *Арнольд, В. И.* Математические методы классической механики / В. И. Арнольд. – Москва : Едиториал УРСС, 2017. – 416 с.
9. *Мозер, Ю. К.* Регулярная и стохастическая динамика / Ю. К. Мозер. – Москва : Мир, 1984. – 536 с.
10. Острейковский, В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций / В. А. Острейковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
11. *Антонов, А. В.* Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / А. В. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
12. *Острейковский, В. А.* Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // В книге: Итоги науки. Выпуск 37. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – Москва : РАН, 2018. – С. 69–111.

References

1. Bol'tsman L. *Lektsii po teorii gazov: per. s nem.* [Lectures on the theory of gases: transl. from German]. Moscow, 1956, 554 p. [In Russian]
2. Prigozhin I. R. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From the Existing to the Emerging: Time and Complexity in the Physical Sciences: trans. from English]. 2nd ed., suppl. Moscow: Editorial URSS, 2002, 304 p. [In Russian]
3. 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, 208 p. [In Russian]
4. Prigozhin I. R., Stengers I. *Vremya. Khaos. Kvant: k resheniyu paradoksa vremeni: per. s angl.* [Time. Chaos. Quantum: to the solution of the time paradox : transl. from English]. Moscow: Knizhnyy dom «Librokom», 2009, 240 p. [In Russian]
5. Lyapunov A. M. *Sobranie sochineniy* [Collected works]. Moscow; Leningrad, 1956, vol. 2, 472 p. [In Russian]
6. Lyapunov A. M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The General problem of motion stability]. Moscow: Izd. AN SSSR, 1950, 470 p. [In Russian]
7. Kolmogorov A. N. *Matematika i estestvoznanie v SSSR* [Mathematics and Natural science in the USSR]. Moscow; Leningrad: GONTI, 1938, pp. 51–61. [In Russian]
8. Arnol'd V. I. *Matematicheskie metody klassicheskoy mekhaniki* [Mathematical methods of classical mechanics]. Moscow: Editorial URSS, 2017, 416 p. [In Russian]
9. Mozer Yu. K. *Regulyarnaya i stokhasticheskaya dinamika* [Regular and stochastic dynamics]. Moscow: Mir, 1984, 536 p. [In Russian]
10. Ostreykovskiy V. A. *Starenie i prognozirovanie resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy* [Aging and forecasting of the service life of nuclear power plant equipment]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 288 p. [In Russian]
11. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoy 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, 536 p. [In Russian]
12. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Itogi nauki. Vypusk 37. Izbrannye trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma po fundamental'nym i prikladnym problemam nauki* [Results of science. Issue 37. Selected proceedings of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science]. Moscow: RAN, 2018, pp. 69–111. [In Russian]

Острейковский Владислав Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@surgu.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

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

Lysenkova Svetlana Aleksandrovna
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Шевченко Елена Николаевна
кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Shevchenko Elena Nikolaevna
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of computer science,
Surgut State University
(1 Lenin street, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Острейковский, В. А. О методе применения оператора внутреннего времени в задачах обоснования долговечности сложных динамических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 31–41. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-4-4.