

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

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА АСИММЕТРИИ ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

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

ON THE POSSIBILITY OF USING THE EFFECT OF TIME ASYMMETRY IN PROBLEMS OF ESTIMATING THE DURABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Существующие методы оценки показателей долговечности сложных технических систем (ресурса, остаточного ресурса, срока службы) основаны на детерминированных и вероятностно-статистических идеях. Для структурно и функционально сложных систем, у которых искомый ресурс и срок службы составляет 30–50 и более лет, часто изготавливаемых малыми сериями, а иногда и уникальных, применение традиционных методов расчета показателей долговечности весьма проблематично. Поэтому использование современного математического аппарата функционального анализа может повысить точность прогноза состояния сложных макроскопических технических систем. *Материалы и методы.* Применялись методы оценки долговечности сложных динамических систем. Перспективным направлением в исследовании прогнозирования показателей долговечности высоко ответственных и особенно критически важных систем является применение теории операторов функционального анализа. С этой целью рассмотрены два класса операторов: операторы микроскопической и макроскопической энтропии и оператор внутреннего времени жизненного цикла систем «в модусах «прошлое-настоящее-будущее». *Результаты.* Подробно проанализированы взгляды и концепции философской и научной мысли о природе времени, а также постулаты модусов «прошлое – настоящее – будущее». Показаны детерминированные и вероятностно-статистические методы оценки показателей долговечности, требующие большого объема как экспериментальных данных, так и данных реальной эксплуатации объектов, что часто трудно выполнить. Введение нового понятия в теорию долговечности сложных технических систем «внутреннее» время играет важную роль в переходе от динамического, обратимого описания функционирования, характерного

Abstract. *Background.* Existing methods for assessing the durability of complex technical systems are based on deterministic and probabilistic-statistical ideas. For structurally and functionally complex systems, in which service life is 30–50 years or more, often manufactured in small batches, the use of traditional methods for calculating durability indicators is very problematic. Therefore, the use of mathematical apparatus of functional analysis can improve the accuracy of prediction of the state of complex technical systems. For this purpose, two classes of operators are considered: the microscopic and macroscopic entropy operators and the operator of the internal time of the life cycle of systems in the modes «past-present-future». The views and concepts of philosophical and scientific thought about the nature of time, as well as the postulates of the modes “past-present-future” are analyzed in detail. Deterministic and probabilistic-statistical methods for assessing durability indicators are shown to require a large amount of both experimental data and data on actual operation of objects, which is often difficult to accomplish. The introduction of the new concept into the theory of durability of complex technical systems “internal” time plays an important role in the transition from a dynamic, reversible description of the functioning characteristic of classical mechanics to a probabilistic description. The internal time of the equipment of complex technical systems is fundamentally different from astronomical time, although both have the same dimension. It’s considered appropriate to use new mathematical methods of functional analysis for the development of specific engineering methods for assessing the durability of complex critical systems of long-term use, taking into account the asymmetry effect of internal time.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 17-01-00244).

для классической механики, к вероятностному описанию. *Выводы.* Внутренне время оборудования сложных технических систем в корне отличается от астрономического времени, хотя оба имеют одинаковое измерение. Считается целесообразным применять новые математические методы функционального анализа для развития конкретных инженерных методик оценки долговечности сложных критически важных систем длительного использования с учетом эффекта асимметрии внутреннего времени.

Ключевые слова: асимметрия времени, неустойчивость, необратимость, ресурс, срок службы.

Keywords: time asymmetry, instability, irreversibility, resource, service life.

Введение

Классическая теория техногенной безопасности на основе теоретико-вероятностной математики и детерминированных необратимых процессов эрозивно-коррозионного износа не позволяет корректно прогнозировать во времени значения характеристик долговечности современных сложных высокоопасных динамических объектов, таких как ядерные и тепловые энергетические установки, летательные аппараты, объекты добычи, транспортировки и переработки в нефтегазовой отрасли. Это происходит из-за того, что в моделях надежности и безопасности указанных сложных критически важных систем со временем эксплуатации 30–50 и более лет, как правило, не учитывается эффект асимметрии времени «прошлое – настоящее – будущее». Напрашивается вопрос: как могли произойти катастрофы на атомной станции «Фукусима» (2011) и разлив нефти в Мексиканском заливе (2010), если после катастрофы на Чернобыльской АЭС (1986) в развитых странах были предприняты чрезвычайные (в том числе технологические) меры по предупреждению глобальных катастрофических событий? Вполне возможно, что подобные меры пока не привели к кардинальному повышению характеристик ресурса и срока службы высокоопасных структурно и функционально сложных критически важных систем.

Постановка задачи

Так как в задачах прогнозирования состояния структурно и функционально сложных систем (СФСС) длительного использования чрезвычайно остро стоит вопрос оценки показателей долговечности, то весьма актуальным является на всех этапах жизненного цикла таких систем определение характеристик остаточного ресурса и срока службы их оборудования. Одним из путей решения подобного рода задач может быть предложен подход применения к задачам долговечности методов современного функционального анализа. Решению этого вопроса и посвящена предлагаемая статья.

Краткая историческая справка

На протяжении двадцати пяти столетий феномен времени остается в фокусе внимания философской и научной мысли, демонстрируя свою глубину и многоаспектность в многочисленных трактатах, акцентирующих внимание на отдельных ракурсах проблемы.

Концепции времени античной и средневековой философии. Наиболее содержательные концепции времени в эпоху античности были созданы выдающимися мыслителями эпохи классики Платоном и Аристотелем. С точки зрения этих мыслителей время является неотъемлемой характеристикой и условием существования вещей.

Согласно субстанциальной модели, время есть независимая сущность, которая является условием существования вещей, но не их состоянием или атрибутом (Б. Спиноза, И. Ньютон). Кроме того, по Ньютону, размышляя о сущности времени, необходимо различать его математическое и обыденное истолкования или, иначе говоря, различать абсолютное и относительное время.

В реляционной модели Г. В. Лейбница никакого абсолютного времени не существует, есть лишь собственные длительности конкретных вещей, их «внутренние времена», недоступные наблюдателю в опыте.

Чрезвычайно содержательную концепцию времени предложил Р. Декарт. Он, по сути, устранил время как абсолютную внешнюю точку отсчета изменений объекта, поместив его внутрь самого объекта, сделав время «внутренним» и тем самым невидимым или несуществующим для наблюдателя.

С точки зрения И. Канта, время не существует объективно, само по себе, вне вещей и вне нашего сознания. Как и пространство, оно относится к априорным (внеопытным) формам чувственности, которые не существуют вне субъекта и являются всего лишь субъективными схемами восприятия реальности.

В онтологии Г. Ф. В. Гегеля время отождествляется со становлением и движением, а потому оно не универсально и не всеобще, поскольку имеет отношение только к конечному, переходящему бытию вещей. Целое же существует вне времени [2–4].

Природа времени в философии и естествознании XX–XXI вв. В фокусе внимания размышлений о природе и свойствах времени, получивших развитие в XX в., постоянно находились идеи «внутреннего времени» объекта – будь то вещь или живой организм, а также проблема происхождения, порождения времени. Многие наиболее значимые философские концепции природы времени получили убедительное естественнонаучное обоснование. Среди самых перспективных в отношении дальнейшей разработки и при этом самых дискутируемых следует назвать концепции А. Бергсона, В. И. Вернадского, М. Хайдеггера.

Время есть длительность, т.е. нерасчленимая целостность, предполагающая единство всех событий и состояний объектов, взаимодетерминацию всех модусов времени – прошедшего прошлого, наличного настоящего и возможного (но не predetermined жестко) будущего. Ничто не существует вне времени, и тем самым время есть всеобщий атрибут – и вещей, и организмов, и бытия в целом (А. Бергсон).

Поскольку каждый организм обладает «внутренним временем», измерение времени представляет собой соотнесение каждый раз специфичного «внутреннего времени» с конвенционально принятой системой отсчета (В. И. Вернадский).

По мысли М. Хайдеггера, время не одномерно и должно рассматриваться в единстве с пространством, а также в единстве своих измерений – прошлого, настоящего и будущего. Модусы (части) времени не равноправны – прошлое и будущее оцениваются исходя из настоящего, причем они не симметричны относительно этой границы между ними. Настоящее обладает протяженностью, образуя единство с прошлым и будущим, как бы «прорастая» в них [2–4].

Постулаты модусов времени «прошлое – настоящее – будущее»

Постулат, вытекающий из теории марковских процессов. Марковский процесс, процесс без последствия – это случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения временного параметра t не зависит от эволюции, предшествующей t , при условии, что значение процесса в этот момент фиксировано (т.е. «будущее» и «прошлое» процесса не зависят друг от друга при известном «настоящем»).

Иными словами, *марковский процесс – это процесс, в котором будущая эволюция состояния объекта зависит только от настоящего текущего состояния.* Для объекта с непрерывным временем это означает, что процесс локализован во времени, т.е. эффекты памяти отсутствуют.

Постулат Шеннона. Любой математический аппарат прогнозирования является бесполезным, если не учитывается физическая сущность прогнозируемых процессов. Определение закономерностей изменения физических процессов деградации оборудования СФСС в задачах прогнозирования должно базироваться на одном из центральных фундаментальных постулатов физики о сохранении сущности физических процессов при прогнозировании поведения объектов: *основные закономерности, наблюдавшиеся в прошлом, будут сохранены в будущем.* При этом процесс функционирования СФСС должен рассматриваться как последовательная смена ее состояний под действием внешних и внутренних факторов.

Постулат Седякина. Опираясь на понятие ресурса, представляется возможным сформулировать один из законов теории надежности, суть которого заключается в следующем: *надежность объекта зависит от величины выработанного им ресурса в прошлом и не зависит от того, как выработан этот ресурс.*

Постулат Ляпунова. Для поведения хаотических динамических систем понятие траектории утрачивает смысл через некоторое характерное время (время Ляпунова). Под хаосом будем понимать поведение системы, при котором первоначально близкие траектории экспоненциально разбегаются со временем. При этом режим называется хаотическим, если расстояние между любыми двумя точками первоначально сколь угодно малое экспоненциально возрастает со временем. Постулат А. М. Ляпунова формулируется следующим образом: *разбегание траекторий описывается функцией $\exp(t/\tau)$, где $1/\tau$ – для хаотических систем по определению положительная величина.* Величина $1/\tau$ называется показателем Ляпунова, а само τ – временем Ляпунова [15].

Постулаты Пригожина. Существуют три формы законов природы:

- 1) первая форма законов оперирует траекториями в классической механике и волновыми функциями в квантовой механике (И. Ньютон);
- 2) вторая форма законов – статистическая формулировка законов природы (Дж. Гиббс, А. Эйнштейн) «приводима» или «сводима»;
- 3) третья формулировка законов природы: законы хаоса носят вероятностный характер, но недостоверный.

Законы, управляющие поведением устойчивых систем, детерминистичны и обратимы во времени. И, наоборот, законы, описывающие хаотические системы, соответствуют вероятностям и включают в себя необратимость.

Теперь можно сформулировать постулаты И. Р. Пригожина:

- 1) хаос приводит к включению стрелы времени в фундаментальное динамическое описание поведения системы. Эволюция систем при $t \rightarrow +\infty$ и при $t \rightarrow -\infty$ различна;
- 2) все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, считаются хаотическими;
- 3) законы, описывающие хаотические системы, соответствуют вероятностям и включают в себя необратимость [1, 6, 7].

Феноменология методов оценки остаточного ресурса оборудования сложных систем

Детерминированный метод

Пример 1. Расчет остаточного ресурса трубопроводов атомных электростанций (АЭС) при эксплуатации.

В качестве примера рассмотрим расчет скорости эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) элементов трубопроводов АЭС по данным контроля при эксплуатации, изложенным в работе [8]. В этой работе приведена методика расчета скорости ЭКИ и остаточного срока службы элементов прямых участков трубопроводов, их гибов и околошовных зон. «Данная методика оценки скорости ЭКИ применена к расчету скорости коррозии, усиливаемой потоком, на прямых участках трубопроводов:

$$W_{\text{утн}} = [(S_{\text{ном}} K_{11} K_{12} - S_{\text{мин}} K_2)] K_{\text{без}} / \Delta \tau_0, \quad (1)$$

где $S_{\text{ном}}$, $S_{\text{мин}}$ – соответственно номинальная и минимальная толщины стенки; K_{11} – коэффициент, учитывающий положительный допуск на толщину стенки при изготовлении трубопровода; K_{12} – коэффициент вклада отложений продуктов коррозии в номинальную толщину стенки; K_2 – коэффициент, учитывающий вклад отложений продуктов коррозии при замере минимальной толщины стенки $S_{\text{мин}}$; $K_{\text{без}}$ – коэффициент безопасности; $\Delta \tau_0$ – длительность эксплуатации элемента до даты проведения контроля...

Остаточный срок эксплуатации элемента трубопровода рассчитывается по уравнению

$$\tau = (S_{\text{мин}} - S_{\text{доп}}) / W_{\text{утн}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{доп}}$ – допускаемая толщина стенки трубопровода...

...Геометрические особенности таких элементов, как гиббы и околошовные зоны, требуют корректировки данной методики и учета фактической толщины этих элементов» [8, с. 84–85].

В результате расчетов на большом экспериментальном материале авторы статьи [8] пришли к следующему заключению в п. 5: «...Неоднозначность выводов требует использовать все результаты

для принятия решения о проведении повторного контроля при приближении к минимальному из рассчитанных времен.

И это, к примеру, для случая «расчета скорости ЭКИ и остаточного ресурса гибов по данным замеров на гихах 06-К и 16К трубопроводов питательной воды 273×16 мм АЭС «Дукованы», выполненных при эксплуатационном контроле в 1995, 1996, 2000 и 2002 гг. с большим количеством замеров на каждом элементе (от 276 до 394)» [8, с. 89, 91].

О чем все это вышеизложенное говорит: расчет остаточного ресурса объектов на основе даже большого объема статистических данных с применением детерминистического подхода требует высокой степени осторожности в оценке остаточного ресурса.

Пример 2. Расчет остаточного ресурса нефтепромысловых трубопроводов. «Среднюю скорость коррозии стенки трубопровода определяют по формуле

$$V_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ном}} - S_{\text{мин}}}{\tau}, \quad (3)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная толщина стенки; τ – время эксплуатации трубопровода в годах» [10, с. 421].

Пример 3. Расчет остаточного ресурса изоляционных покрытий промышленных трубопроводов нефти и газа.

«Зная закономерности влияния времени и комплекса основных факторов на срок службы изоляционных покрытий, можно сделать в период проектирования конкретного трубопровода оптимальный выбор изоляционных покрытий, их толщину и количество слоев.

Защитные свойства изоляционных покрытий наиболее полно характеризуются *переходным сопротивлением*, представляющим собой *интегральную оценку* защитной способности системы *труба – покрытие – грунт*.

При помощи этого показателя с достаточной степенью точности можно оценить достоинства и недостатки того или иного изоляционного материала и влияние на покрытие внешних условий. Кроме того, переходное сопротивление позволяет оценить состояние изоляционных материалов в процессе эксплуатации без нарушения целостности и вскрытия траншеи...

...В результате анализа различных методов прогнозирования изменения защитных свойств изоляционных покрытий трубопроводов выявлены три основные зависимости, описывающие изменение основного критерия оценки качества изоляции – переходного сопротивления труба – земля:

$$R_{\text{п}} = R_{\text{п.н}} e^{-\beta \tau}, \quad (4)$$

$$R_{\text{п}} = R_{\text{к}} \left(\frac{R_{\text{п.н}}}{R_{\text{к}}} \right)^{\frac{\tau_{\text{с}}}{\tau_{\text{с}} + \tau}}, \quad (5)$$

$$R_{\text{п}} - R_{\text{к}} = (R_{\text{п.н}} - R_{\text{к}}) e^{-a \tau}, \quad (6)$$

где β – показатель скорости старения изоляционного покрытия, 1/год; $\tau_{\text{с}}$ – постоянная времени старения изоляционного покрытия, лет; τ – время эксплуатации, лет; $R_{\text{п.н}}$ – начальное значение переходного сопротивления, Ом·м²; $R_{\text{к}}$ – конечное значение переходного сопротивления, Ом·м²; a – постоянный коэффициент, показатель скорости старения изоляции, 1/год...

...Результаты анализа зависимости для прогнозирования изменения переходного сопротивления изоляционных покрытий показали, что, решая обратную задачу можно определить срок службы изоляционных покрытий...

...Расчет остаточного ресурса службы изоляции можно производить по формуле [10, с. 391–395]:

$$\tau = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{R_{\text{п.н}} - R_{\text{к}}}{10^3 - R_{\text{к}}} \right). \quad (7)$$

Вероятностно-статистический метод

Пример 4. Расчет остаточного ресурса промышленных трубопроводов нефти и газа при эксплуатации.

«При прогнозировании остаточного ресурса трубопровода по изменению текущей толщины стенки и при постоянном значении допускаемого напряжения единственной характеристикой технического состояния является износ стенки... Тогда внутреннее давление P_0 , которое может выдерживать элемент трубопровода определяется по формуле [11]

$$P_0 = \frac{2SR_1}{n\alpha D_n}, \quad (8)$$

где S – толщина стенки; R_1 – расчетное сопротивление материала трубопровода; n – коэффициент перегрузки рабочего давления в трубопроводе, равный 1,2; α – коэффициент несущей способности; D_n – наружный диаметр трубопровода.

Текущая толщина стенки равна

$$S = S_{\text{ном}} - \Delta_0 - \Delta, \quad (9)$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная толщина стенки; Δ_0 – начальное технологическое изменение толщины стенки; Δ – износ стенки.

Прочность трубопровода при эксплуатации обеспечена, если допускаемое давление выше рабочего. Это условие с учетом (9) может быть записано в виде

$$P_{\text{оп}}(1 - \delta_0 - \delta) \geq P, \quad (10)$$

где $P_{\text{оп}} = \frac{2S_n R_1}{n\alpha D_n}$; $\delta_0 = \frac{\Delta_0}{S_n}$; $\delta = \frac{\Delta}{S_n}$...

...В соответствии с (10) условие прочности трубопровода в терминах относительного износа можно представить в виде

$$[\delta] \leq \delta; \quad (11)$$

$$[\delta] = 1 - \frac{S_R}{S_n} - \delta_0, \quad (12)$$

где $[\delta]$ и δ – допускаемый и текущий относительный износ стенки соответственно; δ_0 – начальное изменение толщины стенки; $\frac{S_R}{S_n} = \frac{P}{P_{\text{оп}}}$...

...Процесс износа стенки можно описать степенной зависимостью

$$\delta = a\tau^m, \quad (13)$$

где a – случайный, m – детерминированный параметры.

Естественно полагать, что параметры имеют нормальное распределение.

При $m = 1$ износ осуществляется с постоянной скоростью (линейный случай), при $m > 1$ процесс износа ускоряется, при $m < 1$ – замедляется. Параметр может быть определен по результатам статистической обработки замеров толщины стенки...

...Вероятность выполнения условия (11), т.е. вероятность безотказной работы (ВБР) на интервале времени от 0 до (времени эксплуатации трубопровода на момент диагностирования), является функцией безотказности и обозначается как

$$p(t_\alpha) = P_r \{[\delta] \leq \delta, 0 \leq \tau \leq \tau_\alpha\}, \quad (14)$$

где P_r – вероятность события.

Один из основных показателей долговечности трубопроводов – гамма-процентный ресурс – получается из решения следующего уравнения:

$$\frac{\gamma}{100} = \frac{p(t_{\alpha} + \tau_{\text{ост}})}{p(\tau_{\alpha})}, \quad (15)$$

где $\frac{\gamma}{100}$ – условная вероятность безотказной работы; $\tau_{\text{ост}}$ – гамма-процентный остаточный ресурс.

Величину % выбирают в зависимости от ответственности трубопровода в пределах от 90 до 99.

Учитывая, что параметры $[\delta]$ и δ имеют нормальное распределение, для вероятности безотказной работы на интервале от 0 до τ_{α} получается в соответствии с (15) выражение

$$p(\tau_{\alpha}) = \Phi \left(\frac{[\delta]_{\text{cp}} - a_{\text{cp}} \tau_{\alpha}^m}{\sqrt{\sigma_{[\delta]}^2 + \sigma_a^2 \tau_{\alpha}^{2m}}} \right), \quad (16)$$

где Φ – табулированная функция Лапласа.

...В условиях эксплуатации «при прогнозировании остаточного ресурса трубопровода возможна ситуация, когда данные об износе его элементов имеются не в полном объеме. Но имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования. Тогда величина общего износа равна произведению средней скорости износа V_{cp} на величину наработки к моменту диагностирования [11]

$$\Delta_{\text{cp}} = V_{\text{cp}} \tau_{\alpha} \dots \quad (17)$$

...Предположим, что условие прочности трубопровода имеет вид (12), но рассеиванием можно пренебречь, тогда формулы для определения $[\delta]$

$$[\delta] = 1 - \frac{S_R}{S_n}. \quad (18)$$

...При детерминированном параметре $[\delta]$ формула (16) для вероятности безотказной работы на момент диагностирования τ_{α} имеет вид

$$p(\tau_{\alpha}) = \Phi \left(\frac{[\delta] - a_{\text{cp}} \tau_{\alpha}}{\sigma_a \tau_{\alpha}} \right). \quad (19)$$

Опуская промежуточные выкладки, получаем выражение для расчета остаточного ресурса

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{[\delta] - \delta_{\text{cp}}}{\frac{[\delta]}{V_{1-\alpha}/V_{\gamma(1-\alpha)}} + \delta_{\text{cp}}} \tau_{\alpha}, \quad (20)$$

где $V_{1-\alpha}$ и $V_{\gamma(1-\alpha)}$ – квантили нормального распределения.

В данном выражении $[\delta]$ вычисляется по формуле (18), а

$$\delta_{\text{cp}} = a_{\text{cp}} \tau_{\alpha} = \frac{V_{\text{cp}}}{S_n} \tau_{\alpha}. \quad (21)$$

Задавая величину средней скорости износа V_{cp} по формулам (20) и (21), можно определить остаточный ресурс трубопровода. Отметим, что в расчете по данной методике не используется понятие доверительной вероятности, так как задается априорное значение скорости износа.

Описанный метод расчета по числу отказов целесообразно применять только для ориентировочных расчетов, так как учитываются лишь те отказы, которые связаны с износом трубопровода и возникшей течью. Также необходимо располагать априори данными по скорости общей коррозии.

Достоинством предлагаемого метода оценки остаточного ресурса является то, что рассеивание параметров износа можно определить по относительному числу отказов. Физическую природу этих отказов при принятых ограничениях можно пока не учитывать, поэтому метод может быть распространен и на другие типы разрушения» [10, с. 421–430].

Недостатком приведенных в п.1 и 2 литературных источников по оценке остаточного ресурса является неучет влияния изменения состояния исследуемых объектов в процессе их длительной эксплуатации.

Модели внутреннего времени

Изложенные в пп. 3.1 и 3.2 этой статьи методы оценки времени жизни сложных систем не учитывают понятие «возраст системы», т.е. в рассмотренных моделях нет анализа эффекта асимметрии времени. Поэтому необходим новый подход к оценке параметров долговечности в модусах «прошлое – настоящее – будущее».

Один из таких подходов предложен в работах научной школы И. Р. Пригожина [12] и развит в работах [1–7] авторами настоящей статьи.

Математической базой подхода оказалась теория операторов современного функционального анализа модели внутреннего времени.

Математические модели асимметрии внутреннего времени. Известно, что энтропия задает стрелу времени. Следовательно, нам необходима новая функция распределения, которая нарушала бы симметрию времени.

С этой целью использован переход к операторному языку. Учитывая, что необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе стохастичности, в работе [12] проведена тонкая классификация систем на «внутренние случайные», допускающие отображение на цепь Маркова, и «внутренние необратимые», приводящие к внутреннему различию между прошлым и будущим. С этой целью можно сопоставить системе новый тип времени – оператор времени T , который тесно связан с оператором энтропии M . Так как T – оператор, то он имеет собственные значения, каждое из которых имеет возможный возраст системы. А любое заданное начальное распределение ρ обычно может быть разложено на сумму членов, *различных по возрасту и типу эволюции*. Таким образом, возможно непротиворечивым образом включить необратимость в динамическое описание систем [13–15].

Опуская промежуточные выкладки и доказательства, приведенные в [12, с. 162–163, 220–225], можно получить следующее «соотношение между унитарным оператором $U = e^{-iLt}$ и оператором T :

$$U^T T U = T + tI, \quad (22)$$

где L – линейный оператор Лиувилля, а I – единичный оператор Лиувилля.

Соотношение (22) особенно удобно для описания дискретных отображений, например, таких как преобразование пекаря, в которых t изменяется с единичным шагом.

Физический смысл оператора времени T – это *нелокальный* оператор, порождающий новое описание классической динамики, справедливое для сильно неустойчивых систем, например, таких как описаны в пп. 1, 2 настоящей статьи.

Полная система собственных функций оператора T получается, если взять все возможные конечные произведения функций χ_n

$$\chi_n = U^n \chi_0. \quad (23)$$

Каждое такое произведение соответствует собственному значению t оператора T , где t – наибольший из индексов n функций χ_n , входящих в произведение...

Собственные функции $\varphi_{n,i}$ оператора T вместе с постоянной функцией I образуют полную систему ортогональных функций.

Каждая функция распределения состояния системы ρ допускает разложение по собственным функциям $\{I, \varphi_{n,i}\}$:

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \varphi_n, \quad (24)$$

где n – собственные значения оператора T , i – степень вырождения собственного значения n .

Обозначим через $\bar{\rho}$ избыток ρ по сравнению с равномерным равновесным распределением:

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \varphi_n. \quad (25)$$

Предположим, что функция распределения имеет нулевой возраст и соответствует χ_0 :

$$\rho = 1 + \chi_0. \quad (26)$$

В этом случае система находится в правой половине фазового пространства, но мы не располагаем никакой другой информацией относительно локализации системы. Наоборот, если известна точная локализация системы, то функция распределения ρ имеет вид δ -функции и

$$\rho = \delta_{\omega_0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \varphi_n(x_0, y_0)\varphi_n(x, y). \quad (27)$$

Все возрасты входят в (27) с равными весами. Итак, существует своего рода *дополнительность* между описанием на языке точек в фазовом пространстве и «разбиений», соответствующих различным внутренним возрастам. Следовательно, внутренний возраст дает нам новое *нелокальное* описание системы.

Если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию системы ρ мы можем приписать средний возраст $\langle T \rangle_\rho$ по формуле

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \bar{\rho}, T \bar{\rho} \rangle}{\langle \bar{\rho}, \bar{\rho} \rangle}. \quad (28)$$

Используя выражение (25) и ортонормированность функций φ_n , можно преобразовать правую часть (28) к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n^2}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \quad (29)$$

Из соотношения (22), как нетрудно проверить, следует, что

$$\langle T \rangle_{\rho_t} = \langle T \rangle_{\rho_0} + t_1, \quad (30)$$

т.е. средний возраст состояния ρ «идет в ногу» с внутренним временем или временем t , отсчитываемым по обычным часам.

Вместе с тем внутреннее время существенно отличается от внешнего времени, отсчитываемого по наручным часам. Оно скорее соответствует возрасту человека. Возраст не определяется какой-нибудь частью тела, изолированной от остального организма, а соответствует средней, глобальной оценке, относящейся ко всем частям тела [12, с. 200–202]». Причем это относится не только к биологическим системам, а и ко всем остальным окружающим нас сложным динамическим системам.

Моделирование внутреннего времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Будем исходить из кардинального вопроса: как изменяется время в триаде «прошлое – настоящее – будущее». Один из вариантов ответа на этот чрезвычайно актуальный для науки вопрос изложен в [12, с. 203–205]. Действительно, имея понятие внутреннего времени, можно «построить оператор, нарушающий симметрию преобразования Λ , который позволяет осуществить переход от унитарной группы U_t к полугруппе W_t , ведущей к равновесному состоянию при $t \rightarrow \infty$. С этой целью необходимо ввести убывающую функцию $\Lambda(T)$ внутреннего времени. Как известно,

$$T \varphi_n = n \varphi_n. \quad (31)$$

Следовательно,

$$\Lambda(T) \varphi_n = \lambda_n \varphi_n. \quad (32)$$

Поскольку $\Lambda(T)$ – убывающая функция внутреннего времени T , должны выполняться неравенства (33) [12, с. 203]»

$$0 \leq \lambda_{n+1} \leq \lambda_n. \quad (33)$$

Используя функцию Ляпунова и распределение вероятностей $\bar{\rho}$, а также (33), можно получить следующее:

$$\begin{aligned} 0 \leq \lambda_n \leq 1; \lambda_n \rightarrow 1 \text{ при } n \rightarrow -\infty, \\ \lambda_n \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow +\infty \end{aligned}$$

и

$$\frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_n} \rightarrow 0 \text{ при } n \rightarrow \infty. \quad (34)$$

Учитывая, «что Λ действительно переводит динамическую группу U_t в сжимающую полу-группу, операторы U_t сохраняют меру, так как (при $t = m$)

$$U_m \varphi_n = \varphi_{n+m}. \quad (35)$$

«Иначе ведут себя операторы W_t [12, с.195]:

$$W_m \varphi_n = \Lambda U_m \Lambda^{-1} \varphi_n = \Lambda U_m \frac{\varphi_n}{\lambda_n} = \Lambda \frac{\varphi_{n+m}}{\lambda_n} = \frac{\lambda_{n+m}}{\lambda_n} \varphi_{n+m}. \quad (36)$$

Из неравенств (33) следует, что площадь, соответствующая функции φ_n , со временем сжимается. Неравенствам (33) и (36) могут удовлетворить значения λ_n , которые можно выбрать или задать в более общем виде, например $\lambda_n = \exp[-\varphi(n)]$, где $\varphi(n)$ – любая выпуклая функция от n ».

$$\lambda_n = \frac{1}{1+a^n} = \frac{1}{1+e^{n/\tau_c}}, \quad a > 1, \ln a = 1/\tau_c. \quad (37)$$

Рассмотрим физический смысл образов $\bar{\rho}$ -состояний ($\bar{\rho} = \Lambda \rho$). И ρ , и $\bar{\rho}$ при заданном значении временного параметра t в общем случае содержат вклады, приходящие из прошлого и будущего, и интерпретируемые в смысле *внутреннего времени* T . Но если в ρ прошлое и будущее входят симметрично, то в $\bar{\rho}$ симметрия между прошлым и будущим нарушается: вклад будущих состояний «подавлен». В настоящее вносят вклад «прошлое» и лишь «ближайшее» будущее. Этим рассматриваемый случай отличается от детерминистических систем, в которых из настоящего следует как прошлое, так и будущее. Рассмотрим λ_n как функцию от n (рис. 1).

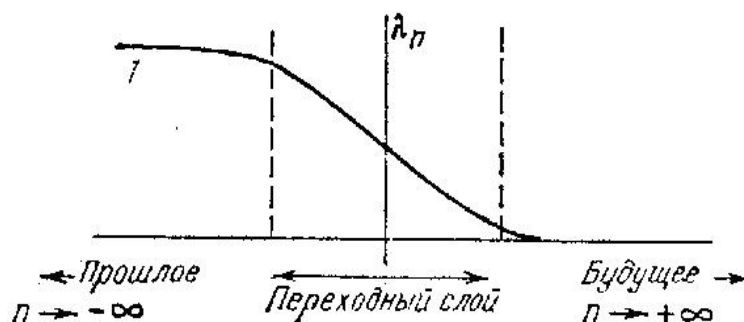


Рис. 1. Переход от прошлого ($n \rightarrow -\infty$) к будущему ($n \rightarrow +\infty$)

Из представления (37) следует, что ширина переходного слоя между прошлым и будущим по порядку величины сравнима с характерным временем τ_c . Резкий переход от прошлого к будущему возникает только в том случае, если $\tau_c \rightarrow 0$ (рис. 2).

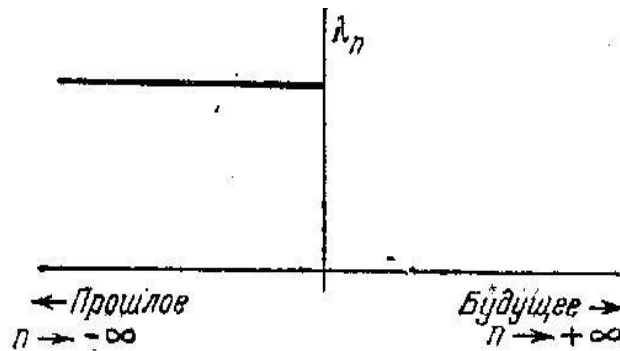


Рис. 2. Переход от прошлого ($n \rightarrow -\infty$) к будущему ($n \rightarrow +\infty$) в пределе $\tau_c \rightarrow 0$

Можно видеть, сколь сильно отличается описание внутреннего времени от традиционного представления о времени как о величине, изоморфной прямой (рис. 3), идущей из далекого прошлого ($t \rightarrow -\infty$) в далекое будущее ($t \rightarrow +\infty$) [6, 15, 16].

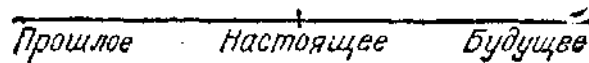


Рис. 3. Традиционное представление о времени

Настоящее в таком представлении соответствует единственной точке, отделяющей прошлое от будущего. Настоящее возникает ниоткуда и исчезает в никуда. Стянутое в точку, оно бесконечно близко и прошлому и будущему. В традиционном представлении между прошлым, настоящим и будущим нет расстояний. В нашем представлении прошлое отделено от будущего интервалом, длина которого определяется характерным временем τ_c , и настоящее обретает *продолжительность*» [12, с. 204–205].

Заключение

1. Феноменология методов оценки остаточного ресурса оборудования сложных систем на основе чисто детерминированного подхода требует большого объема статистических данных реальной эксплуатации объектов, что часто трудно выполнить. Результаты подобных расчетов показателей долговечности даже при достаточно обширных статистических данных свидетельствуют о высокой степени осторожности в оценке полученных результатов [17–18].

2. Использование вероятностно-статистических методов по числу отказов объектов несомненно повышает достоверность получаемых результатов в решении задач оценивания показателей долговечности оборудования сложных систем длительного использования. Однако эти результаты также обладают значительной степенью неопределенности из-за введения понятий доверительных интервалов.

3. Сочетание детерминированных и вероятностно-статистических методов может увеличить достоверность оценок остаточного ресурса и срока службы исследуемых систем. Однако в силу отмеченных в данной статье недостатков этих подходов их целесообразно применять только для ориентировочных расчетов.

4. Введение нового понятия «внутреннее время» играет важную роль в переходе от динамического, обратимого во времени описания функционирования систем, характерного для классической механики, к вероятностному описанию.

5. Поэтому предлагаются новые математические методы фундаментального подхода к оценке ресурса и срока службы сложных динамических систем с использованием аппарата теории операторов современного функционального анализа.

6. Авторы статьи считают целесообразным применять новые модели для развития конкретных инженерных методик теории долговечности сложных систем длительного использования с учетом эффекта асимметрии внутреннего времени.

7. Внутреннее время в корне отличается от астрономического времени, хотя оба они имеют одинаковое измерение.

8. Внутреннее время имеет совершенно иной смысл, так как возникает из-за случайного поведения траекторий, встречающегося в неустойчивых и необратимых динамических системах.

Библиографический список

1. Острейковский, В. А. Феномен «время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4. – С. 3–12.
2. Острейковский, В. А. Феномен асимметрии внутреннего времени при прогнозировании состояния сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Т. Ю. Денисова, Е. Н. Шевченко // Вестник кибернетики. – 2017. – № 4 (28). – С. 181–188.
3. Денисова, Т. Ю. Философский и научный подходы к пониманию времени: перспективы синтеза / Т. Ю. Денисова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 3 (98), ч. III. – С. 161–165.
4. Денисова, Т. Ю. Образ времени в мифологических моделях античности / Т. Ю. Денисова // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – 2017. – № 3-1 (77). – С. 58–63.
5. Муравьев, И. И. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 24–27.
6. Острейковский, В. А. Постулаты парадокса времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных систем / В. А. Острейковский // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы II Межрегион. науч.-практ. конф. (Севастополь, 13–17 сентября 2016 г.) / науч. ред. Б. В. Соколов. – Севастополь : СевГУ, 2016. – С. 105–106.
7. Муравьев, И. И. Постулаты стрелы времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. (Сочи, 1–10 октября 2016 г.). – Сочи, 2016. – С. 291–293.
8. Бараненко, В. И. Расчет скорости коррозии и остаточного ресурса элементов трубопроводов АЭС по данным контроля / В. И. Бараненко, О. М. Гулина, Н. Л. Сальников // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 83–93.
9. 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.
10. Промысловые трубопроводы и оборудование : учеб. пособие для вузов / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, А. М. Гумеров, Г. Г. Васильев, А. Д. Прохоров, О. П. Квятковский, И. Ш. Гамбург, Ю. И. Спектор. – Москва : Недра, 2004. – 662 с.
11. ОСТ 153.39.4.010–2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов. – Москва : Изд-во УГНТУ, 2002. – 57 с.
12. Пригожин, И. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках : пер. с англ. / под ред. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
13. Пригожин, И. Р. Конец определенности. Время. Хаос и новые законы природы / И. Р. Пригожин. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 208 с.
14. Белов, С. В. Парадоксы времени / С. В. Белов // Природа России. – URL: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=11383>
15. Ляпунов, А. М. Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – Москва ; Ленинград, 1956. – Т. 2. – 263 с.
16. Хакен, Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – Москва : Мир, 1985. – 415 с.
17. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovsky, E. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // Journal of Physics : Conference Series. – 2018. – Vol. 944, iss. 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085/
18. Determination of Vibrational Displacement Measurement Error Based on the Blurring Analysis of a Round Mark Image / A. Grigorev, A. Lysenko, I. Kochegarov, V. Roganov, J. Lavendels // Applied computer systems. – Vol. 23, № 2. – P. 150–160. – DOI: 10.2478/acss-2018-0019.

References

1. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4, pp. 3–12. [In Russian]
2. Ostreykovskiy V. A., Denisova T. Yu., Shevchenko E. N. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics]. 2017, no. 4 (28), pp. 181–188. [In Russian]

3. Denisova T. Yu. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of Humanities and natural Sciences]. 2017, no. 3 (98), part III, pp. 161–165. [In Russian]
4. Denisova T. Yu. *Istoricheskie, filosofskie, politicheskie i yuridicheskie nauki, kul'turologiya i iskusstvovedenie. Voprosy teorii i praktiki* [Historical, philosophical, political and legal Sciences, cultural studies and art history. Theory and practice issues]. 2017, no. 3-1 (77), pp. 58–63. [In Russian]
5. Murav'ev I. I., Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 1, pp. 24–27. [In Russian]
6. Ostreykovskiy V. A. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologiy: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sevastopol', 13–17 sentyabrya 2016 g.)* [Promising directions of development of domestic information technologies : materials II inter-region. science.-prakt. conf. (Sevastopol, 13–17 September 2016)]. Sevastopol: SevGU, 2016, pp. 105–106. [In Russian]
7. Murav'ev I. I., Ostreykovskiy V. A. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sochi, 1–10 oktyabrya 2016 g.)* [Innovative, information and communication technologies : proceedings of XIII international. science.-prakt. conf. (Sochi, 1–10 October 2016)]. Sochi, 2016, pp. 291–293. [In Russian]
8. Baranenko V. I., Gulina O. M., Sal'nikov N. L. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [News universities. Nuclear power]. 2017, no. 4, pp. 83–93. [In Russian]
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 nuclear power plant units equipment (on the example of Smolensk NPP units)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroyeniye, 2017, 536 p. [In Russian]
10. Mustafin F. M., Bykov L. I., Gumerov A. M., Vasil'ev G. G., Prokhorov A. D., Kvyatkovskiy O. P., Gamburg I. Sh., Spektor Yu. I. *Promyslovye truboprovody i oborudovanie: ucheb. posobie dlya vuzov* [Field pipelines and equipment : studies. textbook for universities]. Moscow: Nedra, 2004, 662 p. [In Russian]
11. OST 153.39.4.010–2002. *Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa neftegazopromyslovykh truboprovodov* [OST 153.39.4.010–2002. Methods of determining the residual life of oil and gas field pipelines]. Moscow: Izd-vo UGNTU, 2002, 57 p. [In Russian]
12. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu. Vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From existing to arising. Time and complexity in the physical sciences: translation from english]. 2nd ed. suppl. Moscow: Editorial URSS, 2002, 288 p. [In Russian]
13. Prigozhin I. R. *Konets opredelennosti. Vremya. Khaos i novye zakony prirody* [End of certainty. Time. Chaos and new laws of nature]. Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2000, 208 p. [In Russian]
14. Belov S. V. *Priroda Rossii* [Nature of Russia]. Available at: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=11383> [In Russian]
15. Lyapunov A. M. *Sobranie sochineniy* [Collected works]. Moscow; Leningrad, 1956, vol. 2, 263 p. [In Russian]
16. Khaken G. *Sinergetika. Ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh* [Synergetics. Hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices]. Moscow: Mir, 1985, 415 p. [In Russian]
17. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 944, iss. 1, pp. 1–10. DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085/
18. Grigorev A., Lysenko A., Kochegarov I., Roganov V., Lavendels J. *Applied computer systems*. Vol. 23, no. 2, pp. 150–160. DOI: 10.2478/acss-2018-0019.

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Лысенкова Светлана Александровна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Lysenkova Svetlana Aleksandrovna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Шевченко Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, 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 informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

УДК 519.2:621.039:1 + 517.98

Острейковский, В. А.

О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 21–34. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-3.