

УДК 517.98:519.2:621.039

DOI 10.34822/1999-7604-2020-3-46-53

О МЕТОДОЛОГИИ УЧЕТА ЭФФЕКТА АСИММЕТРИИ ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, А. В. Волков ✉
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
✉ E-mail: volk_234@mail.ru

На основании современных взглядов на эксплуатацию автоматизированных систем управления специального назначения и существующей концепции трехэшелонной системы защиты Земли от опасных космических объектов в первую очередь необходимо предусмотреть наличие подсистемы оценки их долговечности. Такие системы должны обладать ресурсом и сроком службы многие десятки, а возможно, и сотни лет. Поэтому для подобных подсистем существует проблема их функционирования в модусах асимметрии времени «прошлое – настоящее – будущее».

Целью исследования является концептуальный анализ фундаментальных основ методологии подхода к оценке показателей долговечности оборудования автоматизированных систем управления систем защиты Земли от космических угроз.

Ключевые слова: автоматизированная система, показатели долговечности, асимметрия времени.

METHODOLOGY FOR CONSIDERATION OF ASYMMETRY OF TIME EFFECT IN THE PROBLEM OF EVALUATING DURABILITY INDICATORS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF SPECIAL PURPOSE

V. A. Ostreikovskiy, S. A. Lysenkova, A. V. Volkov ✉
Surgut State University, Surgut, Russia
✉ E-mail: volk_234@mail.ru

Following modern views on the operation of automated control systems for special purposes and the existing concept of a three-echelon system for protecting the Earth from dangerous space objects, it is necessary to provide a subsystem for assessing their durability. Special automated control systems should have a long service life. Therefore, for this kind of subsystems, there is a problem of their functioning in the modes of time asymmetry “past – present – future”.

The aim of the study is a conceptual analysis of the fundamental bases of the methodology for assessing the indicators of the durability of the equipment of automated control systems for Earth protection systems from space threats.

Keywords: automated system, indicators of durability, asymmetry of time.

Введение

В нашей стране и за рубежом в настоящее время проводятся многочисленные исследования по проблемам обнаружения астероидов, комет и других опасных небесных тел (ОНТ), а также рассматриваются возможные системы защиты Земли от космических угроз (СЗКУ) с целью либо разрушения, либо отражения ОНТ путем изменения их траектории. В таблице представлены способы противодействия космическим угрозам, получившие наибольшую известность [1–4].

Таблица

Виды противодействия космической угрозе [4]

Способ	Отражение ОНТ	Разрушение ОНТ	Эшелон
Ядерный взрыв	+	+	Дальний
Передача импульса от космического аппарата к ОНТ с помощью кинетического удара	+	+	Средний, ближний
Направленное лазерное излучение	+	+	Дальний
Гравитационный буксир	-	+	Средний
Ракетные ускорители на поверхности ОНТ	-	+	Средний
Покрытие астероида специальными материалами для увеличения солнечного давления	-	+	Дальний
Торможение астероида облаками частиц	-	+	Дальний

Как уже ранее описано авторами [4], в России Институтом прикладной астрономии РАН и Государственным ракетным центром имени акад. В. П. Макеева предложены несколько вариантов эшелонов противодействия космическим угрозам: дальний, средний и ближний [1–2].

1. Дальний эшелон осуществляет защиту Земли как от хорошо известных ОНТ, так и от объектов с плохо определенными орбитами (часто неизвестными) на расстоянии от 4,2 астрономических единиц, со скоростью до 20 м/с и расчетным временем столкновения от года до нескольких десятилетий.

2. Средний эшелон должен обеспечить защиту Земли в случаях с расчетным временем столкновения не более года (так называемые малые планеты и долгопериодические кометы).

3. Ближний эшелон обеспечивает защиту в непосредственной близости от Земли и даже, возможно, в ее атмосфере (при опасности повреждения озонового слоя защиты Земли).

Средний срок службы космических аппаратов, разрабатываемых сегодня, составляет около 10–15 лет. Режим обслуживания СЗКУ в период их использования требует тщательного и своевременного планирования в связи с их спецификой: удаленностью от Земли; необходимостью безотказной работы; огромной стоимостью и высокими рисками; возможным влиянием комплексных факторов внутренней среды на состояние элементов автоматизированной системы управления (АСУ); а также максимально возможным техническим ресурсом и сроком службы. Поэтому целью настоящей статьи является концептуальный анализ фундаментальных основ методологии подхода к оценке показателей долговечности оборудования АСУ систем защиты Земли от космических угроз.

Методология должна базироваться на двух современных концепциях:

1) концепции макроскопической формулировки второго начала термодинамики как фундаментального факта;

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

1. Концепция макроскопической формулировки второго начала термодинамики как фундаментального факта.

Вторая половина XX в. ознаменована рождением новой науки – физики неравновесных процессов. Известно, что в природе все процессы подразделены на два класса: обратимые и необратимые. И если необратимые процессы являются правилом, то обратимые – исключением.

Обратимым процессам присущ строгий детерминизм, и, самое главное, в обратимых процессах время течет одинаково как при $t \rightarrow -\infty$, так и при $t \rightarrow +\infty$.

Совсем иначе ведут себя необратимые процессы, изучаемые в физике неравновесных процессов. Неравновесные процессы имеют ярко выраженную однонаправленность времени: зная их прошлое, очень трудно предсказать будущее. Эффект однонаправленного времени позволяет по-новому интерпретировать термин «необратимость».

Детерминистические симметричные во времени законы соответствуют только весьма частным случаям и верны для устойчивых динамических классических и квантовых систем.

В дополнение к динамике нельзя не сказать и о химической необратимости. Неравновесные химические реакции могут приводить к необратимости и при определенных условиях могут стать началом новых типов эволюции систем.

Можно констатировать утверждением Л. Больцмана, что «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе “стохастичности”, существующей в микроскопическом масштабе» [5, с. 131].

Известно, что классическая механика И. Ньютона для описания соотношения между силой F , массой m и ускорением ω использует зависимость

$$m\omega = F, \quad (1)$$

где различие между прошлым $t \rightarrow +\infty$ и будущим $t \rightarrow -\infty$ отсутствует [6], и таким образом уравнение (1) как фундаментальный закон (1687 г.) инвариантно отношению обращения времени.

Науке потребовалось почти 200 лет, чтобы в 1865 г. Р. Клаузиус ввел новое понятие «энтропия», или S -функция [7]. Энтропия для изолированных от внешнего мира систем монотонно возрастает во времени до тех пор, пока не достигнет в состоянии термодинамического равновесия максимального значения:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0. \quad (2)$$

Это позволило сформулировать второе начало термодинамики как фундаментальный закон, так как зависимость (2) оказалась справедливой и для систем, которые обмениваются с внешней средой веществом и энергией:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (3)$$

где $d_e S$ характеризует перенос энтропии через границы системы, а $d_i S$ определяет производство энтропии внутри системы.

При этом оказалось, что вклад в производство энтропии внутри системы делают только необратимые процессы типа химических реакций, диффузии, теплопроводности.

Таким образом, второе начало термодинамики как фундаментальный закон устанавливает, что необратимые процессы типа химических реакций, теплопроводности, диффузии и других (например, для детально описанных процессов структурно и функционально сложных систем (СФСС) [8–11]) приводят к росту энтропии и, следовательно, к односторонней направленности времени, т. е. производство энтропии порождает «стрелу времени» – энтропийное время. Это можно сформулировать и по-другому: положительное направление времени второе начало термодинамики связывает с возрастанием энтропии.

Для замкнутых систем, которые обмениваются с внешним миром энергией, но не веществом, производство энтропии определяется теплом Q , получаемым от внешней среды:

$$d_e S = \frac{dQ}{T^0}, \quad d_i S \geq 0, \quad (4)$$

где T^0 – абсолютная температура.

Для случая линейной неравновесной термодинамики Дж. Гиббс [12] обобщил основное соотношение для полного дифференциала энтропии в виде:

$$dS = \sum_j X_j J_j, \quad (5)$$

где X_j – градиенты температур, химические потенциалы и другие обобщающие силы;
 J_j – скорости множества необратимых процессов.

Следовательно, зависимость (5) является основной формулой макроскопической термодинамики необратимых процессов.

2. Концепция внутреннего времени как оператора для описания функционирования неустойчивых и необратимых процессов в сложных системах.

Развитие законов современной физики от использования для описания состояния систем траекторий, волновых функций и ансамблей привело к формулировке ансамблей, которая справедлива только для хаотических систем. Новая формулировка позволяет получить базис для синтеза свойств микромира и макромира путем введения необратимости в фундаментальное описание систем.

Динамические системы подразделяются на устойчивые и неустойчивые, крайним случаем неустойчивых систем являются «хаотические системы», для которых описание в терминах траекторий становится недостаточным, поскольку траектории, первоначально сколь угодно близкие, со временем экспоненциально расходятся. Хаос также появляется при изучении макроскопических необратимых процессов. «Негативный» аспект хаоса – невозможность определенных предсказаний вследствие экспоненциальной расходимости траекторий. Это соответствует «чувствительности к начальным условиям» – обычному определению хаоса. И это позитивные аспекты хаоса, что приводит к описанию систем вероятностными методами, как сделано Дж. В. Гиббсом и А. Эйнштейном в статической физике. Поэтому из вышеизложенного следует:

1) вероятностное описание функционирования хаотических систем в итоге приводит к применению методов современного функционального анализа и дает возможность решать задачи с учетом асимметрии времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее», что чрезвычайно важно;

2) хаос приводит к включению «стрелы времени» в фундаментальное динамическое описание;

3) хаос позволяет разрешить парадокс времени, но он делает и нечто большее: приносит вероятность в классическую динамику как наиболее признанный прототип детерминистической науки, и в данном контексте вероятность выступает не как порождение нашего незнания, а как неизбежное выражение хаоса.

Таким образом, можно сформулировать обобщающий вывод: все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, по определению считаются хаотическими, они не допускают описание в терминах отдельных траекторий, а только в терминах ансамблей траекторий. Следовательно, у всех систем, соответствующих функциональному описанию природы в терминах взаимодействующих факторов, столь широкое обобщение понятия хаоса позволяет констатировать необходимость новой формулировки законов физики.

Для описания свойства необратимости широко используется язык операторов современного функционального анализа. Исторически в классической и квантовой механике широко применяются операторы Ж. Лиувилля – L (1809–1882) и У. Р. Гамильтона (1805–1868) – H_{on} :

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L \rho \quad (6)$$

и

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H_{on} \Psi, \quad (7)$$

где $i = \sqrt{-1}$, $\rho(q_1, \dots, q_s, p_1, \dots, p_s)$ – плотность точек в ансамбле частиц с координатами q и импульсами p ; величина $\rho dq_1, \dots, dq_s, dp_1, \dots, dp_s$ – вероятность нахождения представленных точек в момент времени t в элементе объема $dq_1, \dots, dq_s, dp_1, \dots, dp_s$ фазового пространства; $\hbar$ – постоянная Планка; Ψ – волновая функция – амплитуда вероятности (квадрат ее модуля равен вероятности состояния).

Позднее, в конце XIX – начале XX в. вместо функций координат и импульсов в динамическое описание системы были введены:

- 1) оператор микроскопической энтропии М. А. Пуанкаре;
- 2) функции Ляпунова;
- 3) оператор времени Т В. Misra [13].

Кроме этого, для эргодических систем В. Misra доказал [13], что для существования оператора M необходимым условием является фактор перемешивания, а достаточным – наличие K -потока (КАМ-теория А. И. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. К. Мозера) [14]. Суть этой теории: неинтегрируемость есть новый исходный путь для построения динамики.

Основным содержанием K -потоков является анализ трех видов траекторий систем в фазовом пространстве: 1) «хороших» – детерминистических; 2) «случайных» – с резонансами бесконечного блуждания; 3) хаотических – со сложным поведением, экспоненциальным разбеганием первоначально близких траекторий и диффузией. Третий тип траекторий склонен к распределению точек при приближении к равновесному состоянию с нарушением временной симметрии «прошлое – настоящее – будущее».

В. Misra доказал [13], что в случае K -потока оператору энтропии L можно сопоставить такой сопряженный эрмитов оператор времени T , что их коммутатор равен константе:

$$-i[L, T] = -i[LT - TL] = I, \quad (8)$$

где I – единичный оператор.

Если выражение (8) принимается, то появляется возможность дополнить динамику оператором T , представляющим флуктуирующее время. Таким образом, И. Р. Пригожин в работе [15] показал осуществимость перехода от динамического описания к вероятностному с помощью оператора преобразования Λ и нового понятия времени, позволяющего рассчитывать «средний возраст» отдельных состояний системы оператором внутреннего времени T , который существенно отличается от обычного внешнего временного оператора t . С этой целью на базе зависимости (8) можно, используя оператор эволюции времени вида $U = e^{-iLT}$ и оператор λ Лиувилля, получить соотношение с оператором T в виде:

$$U_t^T T U_t = T + tI. \quad (9)$$

Таким образом, в [15] доказано, что:

- 1) физический смысл нового оператора внутреннего времени T – это нелокальный оператор, порождающий новое описание классической динамики для сильно неустойчивых систем;
- 2) если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию неустойчивой системы ρ будет соответствовать средний возраст $\langle T \rangle_\rho$ по формуле:

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \underline{\rho}, T \underline{\rho} \rangle}{(\underline{\rho}, \underline{\rho})}, \quad (10)$$

где каждая функция распределения системы ρ допускает разложение по собственным функциям $\{1, \varphi_{n,i}\}$; $\varphi_{n,i}$ – это полный набор собственных функций оператора внутреннего времени T ; индекс n – собственное значение оператора T ; индекс i – степень вырождения собственного значения n :

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n, \quad (11)$$

а C_n – коэффициенты разложения собственных функций.

Тогда

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n^2}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \quad (12)$$

Из (8) следует:

$$\langle T \rangle_{\rho t} = \langle T \rangle_{\rho_0} + t, \quad (13)$$

и средний возраст состояния системы ρ «идет эквидистантно» с внутренним временем или временем t , отсчитываемым по обычным часам. При этом можно показать, что

$$d \langle \delta T^2 \rangle = 0, \quad (14)$$

где $\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2$, т. е. дисперсия внутреннего времени остается постоянной.

Из приведенных сведений следуют важные выводы:

1. Среднее значение «возраста» систем соответствует средним значениям ресурса, срока службы и их остаточным значениям как основным показателям долговечности отдельных элементов оборудования и СФСС в целом.

2. Зная аналитические выражения реальных необратимых процессов, существующих при применении конструктивных элементов, блоков и подсистем по назначению, и их изменение под комплексным воздействием внутренних и внешних факторов на микроскопическом и макроскопическом уровнях (например, детально изложенных в [8, 9, 11] для таких сложных и чрезвычайно опасных объектов, как ядерные энергетические установки), возможно объективно оценивать показатели долговечности СФСС в соответствии с современными достижениями теории необратимых процессов динамических систем [16–19].

Заключение и выводы

Одно из основных свойств теории надежности, безопасности и эффективности СФСС – долговечность. Это свойство неразрывно связано как со свойством необратимости, так и со свойством старения. Несмотря на обилие работ в области классической физики, динамики и термодинамики, на наш взгляд, понятия «старение» и «долговечность» в инженерных науках объективно дополняют друг друга. Мы разделяем точку зрения, высказанную И. Р. Пригожиным, что «тела состоят из атомов, которые бессмертны во времени, а меняется лишь отношение между атомами и молекулами» [15, с. 173]. В этом смысле временная шкала старения характеризует свойство популяций, которые всегда состоят из индивидов.

Из содержания статьи следуют выводы:

1. Необратимость – объективная форма существования устойчивых флуктуирующих динамических систем, она играет важную конструктивную роль в процессах в абсолютно различных областях науки – от биологии до космологии.

2. Необратимые процессы имеют свои закономерности на трех уровнях описания систем: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. В конечном итоге такие микроскопические процессы, как химические реакции, диффузия, адсорбция, распад твердых растворов, изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел и др., являются причиной более сложных деградационных макропроцессов: коррозии, эрозии, износа, ползучести, усталости, деформации и др. Причем такого рода необратимые процессы развиваются под воздействием комплекса эксплуатационных факторов в СФСС: динамических и статических механических нагрузок, термогидравлических и тепловых ударов, переноса и осаждения продуктов коррозии, примесей и т. д. Поэтому необратимые процессы приводят к глубоким изменениям на самом фундаментальном уровне описания природы – уровне пространственно-временного континуума.

3. Энтропийное время всегда направлено в одну сторону и не совпадает с ходом времени, отсчитываемым по обычным часам, поэтому всегда эволюционирует в модусах «прошлое – настоящее – будущее», причем существует множество типов эволюции времени.

4. Авторы статьи выражают полное согласие с позицией Ю. Л. Климонтовича, редактора русского перевода работы И. Р. Пригожина [15]:

а) с точки зрения решения динамических задач надежности, безопасности и эффективности сложных критически важных СЗКУ на статистическом уровне с помощью функции распределения состояния систем исследование обязательно должно прежде всего включать спектральное представление операторов: эволюции, микроскопической энтропии, преобразования, внутреннего времени;

б) чрезвычайно важным вопросом является описание непрерывных во времени функций распределения, связанных с незатухающими взаимодействиями, что приводит к появлению сингулярных функций, а это свидетельствует о выходе исследования из гильбертова пространства с «хорошими» функциями и переходе к обобщенным пространствам типа пространства Гельфанда.

Литература

1. Дегтярь В. Г., Калашников С. Т., Сайтгараев С. С. Возможности ракетно-космических комплексов для уменьшения астероидно-кометной опасности // Астероиды и кометы. Челябинские события и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль : тр. Междунар. науч.-практич. конф., г. Чебаркуль, Челяб. обл., 21–22 июня 2013 г. Челябинск : Край Ра, 2013. 168 с.
2. Минаков Е. П., Соколов Б. В. Исследования характеристик размещения и вариантов применения моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов // Тр. СПИИРАН. 2016. № 5. С. 182–197.
3. Шустов Б. М., Рыхлова Л. В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. 384 с.
4. Волков А. В., Острейковский В. А. Обзор современных подходов к защите Земли от космических угроз // Вестник кибернетики. 2019. № 4. С. 17–25.
5. Больцман Л. Избранные труды. М. : Наука, 1984. 590 с.
6. Крылов А. Н. Собрание трудов академика А. Н. Крылова. Т. 7. И. Ньютон. Математические начала натуральной философии / пер. с лат. с примеч. и пояснениями А. Н. Крылова. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1936. 696 с.
7. Claysius R. I. Uber verschiedene fur die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Warmetheorie // Ann. Phys. Folge 2. 1865. Bd. 125. S. 353–400.
8. Острейковский В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М. : Энергоатомиздат, 1994. 288 с.
9. 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.
10. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Необратимость процессов как важнейшее свойство модусов внутреннего времени сложных систем // Региональная информатика (РИ-2018) : материалы XV Санкт-Петербург. междунар. конф. Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г. СПб : СПОИСУ, 2018. С. 252–254.
11. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС). М. : Инновац. машиностроение, 2017. 536 с.
12. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М. : Наука, 1982. 584 с.
13. Misra B. Nonequilibrium Entropy, Lyapounov Variables, and Ergodic Properties of Classical Systems // Proc Natl Acad Sci USA. 1978. No. 75 (4). P. 1627–1631. DOI 10.1073/pnas.75.4.1627.

14. Колмогоров А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1938. № 5. С. 5–41.
15. Пригожин И. Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках ; пер. с англ. / под ред., с предисл. и послесловием Ю. Л. Климонтовича. Изд. 2-е, доп. М. : Едиториал УРСС, 2002. 288 с.
16. Острейковский В. А. Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем : моногр. Сургут : Печатный мир, 2017. 268 с.
17. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Операторы энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности сложных систем // Фундаментальные и прикладные проблемы науки : материалы XIV Междунар. симпозиума. М. : РАН, 2019. С. 91–98.
18. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. Феномен асимметрии внутреннего времени с учетом неустойчивости и необратимости процессов в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1 (25). С. 3–10.
19. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.