

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ РОСТ СЛОЖНОСТИ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 2. СЛОЖНОСТЬ СИСТЕМ И ЭНТРОПИЯ

Грибков Андрей Армович

доктор технических наук, главный научный сотрудник,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
andarmo@yandex.ru

EVOLUTIONARY GROWTH OF COMPLEXITY OF SYSTEMS. PART 2. COMPLEXITY OF SYSTEMS AND ENTROPY

A. Gribkov

Summary: This article is the second part of the study of the problem of evolutionary growth of complexity of systems. The author suggests the mechanism of local entropy decrease in the isolated system instead of the entropy decrease in the open system. The author explains the phenomenon of local entropy decrease by the presence of entropy fluctuations (dispersion). If the entropy of a system is initially high enough, then the system formed as a result of negative entropy fluctuations retains variability (i.e. a significant level of entropy fluctuations) and is able to evolve, further reducing its entropy. The author describes the described evolution property as the property of local entropy reduction in a system with high entropy. The article also describes the author's methodology for determining the complexity of systems. This methodology simultaneously corresponds to algorithmic and theoretical-information concepts. The author also considers the applied methodology corresponding to the theoretical-multiple concept. This applied methodology was used by the author (with co-authors) in determining the complexity of the control object as part of solving the problem of determining the feasibility of a control system for an industrial robot, CNC machine or mechatronic system.

Keywords: evolution, gradualness, structure formation, complexity, entropy.

Аннотация: Статья представляет собой вторую часть исследования проблематики эволюционного роста сложности систем. В данной статье рассматривается механизм локального убывания энтропии в изолированной системе, предлагаемый автором вместо убывания энтропии в открытой системе. Феномен локального убывания энтропии автор объясняет наличием флуктуаций (дисперсии) энтропии. Если энтропия системы изначально достаточно высока, то образующаяся в результате отрицательной флуктуации энтропии система сохраняет изменчивость (т.е. существенный уровень флуктуаций энтропии) и способна эволюционировать, далее снижая свою энтропию. Описанное свойство эволюции автор называет свойством локального уменьшения энтропии в системе с высокой энтропией. Также в статье излагается авторская методология определения сложности систем, одновременно соответствующая алгоритмической и теоретически-информационной концепциям, и прикладная методология, формируемая в рамках теоретико-множественной концепции, которая была использована автором (с соавторами) при определении сложности объекта управления в рамках решения задачи определения реализуемости системы управления промышленным роботом, станком с ЧПУ или мехатронной системой.

Ключевые слова: эволюция, поэтапность, структурообразование, сложность, энтропия.

Введение

В первой части данного исследования [1] мы показали, что одним из повсеместно встречающихся свойств эволюции (понимаемой как процесс изменения, развития в природе, обществе и любых других естественных и искусственных системах) на различных уровнях мироздания является ступенчатость изменений, реализацией которой является поэтапный характер структурообразования. Под структурообразованием мы понимаем процесс изменения системы при вхождении в нее новых элементов и образовании в ней новых связей. Поэтапное структурообразование с закреплением (т.е. приобретением устойчивости) на каждом из уровней, делает процесс структурообразования намного более вероятным. Во многих случаях поэтапность с закреплением является безальтернативным, обязательным для обеспечения реализуемости развития условием.

В данной (второй) части нашего исследования мы рассмотрим еще одно свойство эволюции мироздания, связанное с наблюдаемым при развитии систем (и соответствующем увеличением их сложности) убыванием энтропии.

Механизм локального убывания энтропии

Наиболее общим (пригодным для описания как термодинамических, так и информационных систем) представлением энтропии системы является ее определение как величины, зависящей от числа вариантов реализации данного состояния системы [2]. Обычно энтропия равна некоторой постоянной величине (для энтропии Гиббса в термодинамике – постоянной Больцмана), помноженной на логарифм числа вариантов, или, что тоже самое, логарифму от числа вариантов, возведенного в заданную постоянную степень.

Отправной точкой любого исследования, связанного

с изменениями энтропии, является установление изолированности или открытости системы, энтропия которой рассматривается.

Для изолированных систем действует закон неубывания энтропии, который устанавливает невозможность устойчивой тенденции понижения энтропии такой системы. Это означает, что изолированные системы самопроизвольно стремятся переходить в менее упорядоченное, хаотическое состояние. На языке энтропии это соответствует переходу в состояния, имеющие большее число вариантов, а, следовательно, и большую вероятность. Эволюция изолированных физических систем со временем приводит к равновесному (хаотическому состоянию), соответствующему максимуму энтропии.

Для нефизических систем (например, живых систем) возможно устойчивое неравновесие [3, с. 32], вследствие чего для них эволюционные процессы не ведут к равновесному состоянию и повышению энтропии. При этом, в рамках анализа устойчивости живых систем также необходимо учитывать, являются ли они в полной мере изолированными или, другими словами, способна ли живая система существовать изолированно.

Для открытых систем возможны два класса эволюционных изменений [4]: «временная эволюция к неравновесному стационарному состоянию», либо «процесс эволюции через последовательность неравновесных стационарных состояний открытой системы». Для обоих классов эволюции достигаемая в результате энтропия не является максимальной, причем для второго класса эволюционных изменений она может последовательно снижаться.

По мнению автора данной статьи, разделение систем на изолированные и открытые, допустимое с точки зрения эпистемологии для упрощения решения отдельных аналитических задач, онтологически не является обоснованным, поскольку не соответствует достоверному представлению бытия. Для любой системы существует надсистема, в пределах которой ограничено ее существование: все прочие системы, элементы и т.д., находящиеся за пределами этой надсистемы, не оказывают на систему существенного влияния. Это значит, что объектом достоверного анализа с точки зрения онтологии должна быть эта надсистема, которую следует считать изолированной, а исследуемую систему рассматривать как локальную область надсистемы.

В данной интерпретации, исследуя примеры убывания энтропии в процессе эволюционных изменений, следует говорить не об убывании энтропии в открытой системе, а о локальном убывании энтропии в изолированной системе. Последнее описание является более точным и полным, в том числе потому, что в его рамках возможно установить требование неубывания энтропии для всей изолированной системы.

Для объективности анализа в связи с последним замечанием необходимо обратить внимание на одно важное обстоятельство, которое обычно упускается. Вторым законом термодинамики (представляющий собой формулировку закона неубывания энтропии в изолированной системе для физических систем) справедлив только при условии сохранения средней энергии системы постоянной. Между тем, достоверных доказательств, что средняя энергия изолированной системы (по крайней мере на некотором уровне организации, определяющем взаимодействия в системе) не может убывать, не существует. Еще более неопределенной является ситуация с информационной энтропией изолированной системы, неубывание которой в условиях возможного сокращения объема информации, очевидно, не обеспечивается. С другой стороны, в ряде работ «выдвигается тезис, суть которого в том, что диссипация (рассеяние) информации в «чистом виде», т.е. в проявлениях, свойственных физическим системам, в информационных системах существовать не может» [5, с. 237].

Проблема однозначного разделения открытых и изолированных (закрытых) систем проявлялась уже в общей теории систем Л. фон Берталанфи. Объектом исследования у него являются системы открытого типа, но строгое определение дается лишь для изолированных систем [6]. Практическое исследование поведения открытых систем у Л. фон Берталанфи возможно только при их представлении в виде эквивалентных систем, т.е. «систем, которые способны достигать заранее определенного конечного состояния независимо от изменения начальных условий, т.е. из различных начальных состояний и различными путями» [7, с. 14]. В этой связи описание открытых систем как локальных областей изолированных систем представляется оправданным и существенно упрощающим анализ их поведения.

Феномен локального снижения энтропии может быть объяснен наличием флуктуаций (дисперсии) энтропии. Любые изменения системы (сближения элементов, объединения, образования связей и т.д.) влекут за собой изменения ее энтропии. Эти изменения в большинстве случаев со временем нивелируются, однако в некоторых отдельных случаях, при определенных условиях флуктуация энтропии может привести к ее необратимому уменьшению, что, в частности, происходит при структурообразовании.

Итак, в изолированной системе может иметь место локальное уменьшение энтропии. При этом, если энтропия системы изначально достаточно высока, то образующаяся система сохраняет изменчивость (т.е. существенный уровень флуктуаций энтропии) и способна эволюционировать, далее снижая свою энтропию. Описанное свойство эволюции мы назовем свойством локального уменьшения энтропии в системе с высокой энтропией. Это важнейшее свойство развития мирозда-

ния. Благодаря ему с высокой вероятностью происходит формирование сложных систем.

Эволюционное свойство локального уменьшения энтропии по своему смыслу близко к одному из базовых законов общей теории систем — закону необходимого разнообразия (в интерпретации Грегори Бейтсона): «... никакая система (ни компьютер, ни организм) не может произвести ничего нового, если не имеет в своём составе некоторый источник случайного...» [8, с. 166].

С констатированным нами свойством локального уменьшения энтропии в системе с высокой энтропией также хорошо согласуется S-теорема Ю.Л. Климонтовича, согласно которой «отрицательная энтропия» (упорядоченность) «порождается, сочетанием случайного изменения состояния системы с последующим необходимым (избирательным) запоминанием результатов изменения» [9, с. 108].

Сложность систем

Существующие методологические подходы к определению сложности систем, можно, согласно А.И. Уемову, представить в виде четырех типов концепций [10, с. 200]: логической (определяются меры некоторых свойств отношений, которые считаются упрощающими); теоретически-информационной (в рамках которой сложность отождествляется с энтропией); алгоритмической (сложность определяется длиной алгоритма, необходимого для определения исследуемого объекта); теоретико-множественной (сложность связывается с мощностью множества элементов, из которых состоит изучаемый объект).

Первая из указанных концепций сложности системы — логическая концепция. Ее первоначальную версию (в виде аксиоматической теории измерения простоты-сложности) предложил американский логик Нельсон Гудман [11], далее его идеи получили развитие в работах Дж. Кемени [12]. С точки зрения Н. Гудмена, проблема измерения простоты-сложности должна ставиться в логическом разрезе. Например, простота-сложность предиката, по Н. Гудмену, зависит от таких его логических свойств, как симметричность, рефлексивность и самополнота [13]. По мнению автора данной статьи, в рамках логической концепции определения сложности систем крайне затруднительно обеспечить достоверность оценки сложности, поскольку результат оценки полностью зависит от выбора используемых логических свойств, значимость которых для сложности системы не может быть верифицирована. Поэтому логическая концепция не может быть использована как универсальный подход к оценке сложности систем.

Попробуем сформулировать собственный методологический подход к определению сложности систем и посмотрим, как он соотносится с теоретически-информационной, алгоритмической и теоретико-множественной концепциями.

Для решения задачи определение сложности системы необходимо ответить на несколько вопросов, характеризующих содержание понятия «сложность системы»: во-первых, необходимо понять, является ли сложность системы понятием онтологическим или эпистемологическим, во-вторых, выявить связи между сложностью системы и ее эволюцией (структурообразованием); в-третьих, сформулировать, какие свойства системы формируют ее сложность.

На первый взгляд ответ на первый вопрос более или менее очевиден: сложность системы – понятие эпистемологическое, связанное с оценкой сложности познания системы [14]. Однако, с другой стороны, сложность системы является отражением результатов ее эволюции (структурообразования), т.е. имеет выраженное онтологическое содержание. Поскольку применительно к сложным объектам, процессам, законам онтологическое описание практически невыполнимо (мы вынужденно оперируем обобщенными понятиями, внутренний смысл которых в большинстве случаев не детерминирован однозначно), то опорным описанием сложности систем является эпистемологическое, а возможность онтологического описания лишь подразумевается.

Отвечая на второй вопрос (о связи между сложностью системы и ее эволюцией) необходимо сразу уточнить, что речь идет об «организованной сложности», т.е. сложности, определяемой с учетом внутренних связей и структуры системы [15, с. 169]. Такая сложность системы формируется в процессе структурообразования: «Сложность и многообразие элементов, связей и отношений объекта как системы обуславливают иерархическое строение системы — упорядоченную последовательность ее различных компонентов и уровней взаимосвязи между ними» [15, с. 19].

Если рассматривать процесс роста сложности систем как результат структурообразования, то можно представить следующий подход к оценке сложности. Система, как совокупность элементов, может быть описана как система выражений (равенств, неравенств, сложных условий и т.д.), связывающих параметры элементов системы. Чем больше таких выражений, тем больше в системе связей и тем система сложнее. При структурообразовании растет число элементов, появляются дополнительные связи, число выражений, связывающих параметры элементов системы растет — система усложняется.

Важной дополнительной характеристикой роста сложности системы является уменьшение ее энтропии. Система выражений, связывающих параметры элементов системы, — это ограничения, определяющие сокращение числа вариантов состояния, в которых может

находиться система (при этом множество состояний системы не обязательно является дискретным). Чем больше выражений и связей, тем меньше диапазон или число вариантов, в которых система может находиться. При структурообразовании, когда формируются новые связи и число выражений, определяющих состояние системы, растет, диапазон или число вариантов, в которых она может находиться, уменьшается. Это соответствует уменьшению энтропии системы.

Таким образом сложность системы можно определять, как число связей между параметрами формирующих ее элементов. Для определения изменения сложности системы можно (наряду с очевидным определением через изменение числа связей элементов) также использовать определение через изменение энтропии. Согласно такому определению, при увеличении сложности системы имеет место снижение ее энтропии, соответствующее сокращению диапазона или числа вариантов состояний системы вследствие увеличения в ней числа связей между параметрами элементов.

Оценивая сформулированные нами определения сложности систем, можно констатировать их соответствие алгоритмической и теоретически-информационной концепциям, которые оказываются неразрывно связанными и взаимодополняющими.

Прикладное количественное определение сложности системы представляет собой нетривиальную задачу, решение которой в значительной степени зависит от специфики анализируемой системы. В ряде случаев наиболее практичной оказывается методология, формируемая в рамках теоретико-множественной концепции [16].

Автором данной статьи с соавторами в рамках решения задачи определения реализуемости систем управления движением промышленных роботов, станков с ЧПУ и мехатронных систем была разработана методология определения сложности объекта управления, соответствующая теоретико-множественной концепции, согласно которой бесконечное множество состояний управляемого объекта сводится к счетному множеству дискретных состояний контролируемых параметров.

В данной методологии сложность Ω объекта управления определяется следующим образом [17]:

$$\Omega = n \cdot m^{1/2} \cdot q \cdot g^{1/2} \cdot p \cdot s^{1/2}. \quad (1)$$

где n и m – число типов элементов и среднее количество элементов одного типа в системе (общее количество элементов $N = n \cdot m$); q и g – число типов связей и среднее количество связей одного типа в системе (среднее количество значимых для управления связей элемента объекта управления $Q = q \cdot g$); p – среднее число контролируемых параметров, посредством которых

описывается состояние отдельного элемента системы; s – среднее число отслеживаемых состояний контролируемого параметра.

В рамках данной методологии сложность рассматривается как обобщенная характеристика элементов системы и отражает сложность состава, структуры и свойств системы. При этом «... сложность состава ... является функцией либо числа элементов, входящих в систему, либо их разнообразия. Сложность структуры системы — это функция числа связей либо их разнообразия. ... сложность свойств системы — функция числа свойств либо их разнообразия» [18, с. 88].

Определение связи между изменением сложности системы, определенной в рамках теоретико-множественной концепции, с изменением энтропии, не так однозначно, как для алгоритмической сложности. При этом оно наглядно проявляется в процессе существования систем. Например, в рамках решения задачи обеспечения реализуемости системы управления движением (робота, станка с ЧПУ или другой мехатронной системы) наблюдается сокращение времени выхода (при отсутствии управления) контролируемых параметров объекта управления (например, позиционирования рабочего органа или скорости его движения) за пределы допустимых отклонений, в результате чего по мере повышения сложности объекта управления требуется все большее быстроедействие системы управления. Формула (1) задает сложность объекта управления равной числу его состояний, каждое из которых должно быть воспроизводимым с заданной точностью. Понятно, что чем выше заданная таким образом сложность объекта управления, тем ниже его энтропия (поскольку задано большее число ограничений) и тем быстрее начинает расти его энтропия в отсутствие управляющего воздействия.

Заключение

На основании приведенных выше исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. При рассмотрении эволюционных процессов, сопровождающихся ростом сложности систем целесообразно говорить не об убывании энтропии в открытых системах, а о локальном убывании энтропии в изолированных системах.
2. Одним из важнейших свойств развития мироздания является свойство локального уменьшения энтропии в системе с высокой энтропией. Это свойство заключается в том, что в изолированной системе может иметь место локальное уменьшение энтропии. При этом, если энтропия системы изначально достаточно высока, то образующаяся система сохраняет изменчивость (т.е. существенный уровень флуктуаций энтропии) и способна эволюционировать, далее снижая свою энтропию.
3. Известны четыре типа концепций определения

сложности системы: логическая, теоретически-информационная, алгоритмическая и теоретико-множественная. Все эти концепции тесно связаны, в частности в рамках предлагаемой автором данной статьи методологии алгоритмическая и теоретически-информационная концепции являются взаимодополняющими. Также при решении задачи определения сложности практическим может быть использование теоретико-множественной концепции.

Обобщая содержание первой и второй частей данного исследования необходимо констатировать следующие результаты:

1. Базовыми свойствами, определяющими эволюцию и формирование всего многообразия форм и законов бытия, являются поэтапный характер структурообразования и локальное убывание энтропии в системах с высокой энтропией.
2. Эволюция системы, в частности, увеличение сложности в результате структурообразования, инициируется ее случайным, обратимым или необратимым переходом в менее хаотическое (или более упорядоченное) состояние. Такой переход представляет собой отрицательную флуктуацию эн-

тропии. При этом не всякая отрицательная флуктуация энтропии системы является необратимой, т.е. закрепляется в виде изменения системы. Такие закрепляемые изменения происходят ступенчато, при определенных количественных изменениях свойств системы. Эти ступенчатые (поэтапные) изменения связаны с появлением в системе новых качеств (например, новой структуры или нового типа связей параметров элементов системы), благодаря которым система приобретает новые механизмы устойчивости. Именно поэтому становится возможным закрепление изменений системы.

3. Известные парные понятия «устойчивость и свобода» [19], определяющие сохранение мироздания в процессе его развития, в контексте роста сложности систем предстают в виде парных свойств эволюции мироздания: «поэтапное структурообразование» (за счет закрепления изменений) и «локальное убывание энтропии» (за счет ее флуктуаций). При этом роль этой пары свойств заключается в сохранении устойчивости мироздания в процессе поэтапного структурообразования, сопровождающегося неуклонным ростом сложности формирующих мироздание систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грибков А.А. Эволюционный рост сложности систем. Часть 1. Поэтапное структурообразование // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Познание», 2023, №6, с. 63-67.
2. Кочетков А.В., Федотов П.В. О различных смыслах понятия «энтропия» // Интернет-журнал «Науковедение», 2015, том 7, №6
3. Бауэр Э.С. Теоретическая биология // М.-Л., Изд. ВИЭМ, 1935. 151 с.
4. Климонтович Ю.Л., Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем // УФН, 1996, том 166, №11. С 1231-1243
5. Андрианова Е.Г., Мельников С.В., Раев В.К. Диссипация и энтропия в физических и информационных системах // Фундаментальные исследования, 2015, №8. С. 233-238.
6. Рапопорт А. Различные подходы к общей теории систем / в сборн. «Системные исследования. Ежегодник 1969». М.: Наука, 1969. 204 с. С. 55-79.
7. Блауберг И.В., Садовский В.Н., Юдин Э.Г. Системные исследования и общая теория систем / в сборн. «Системные исследования. Ежегодник 1969». М.: Наука, 1969. 204 с. С. 7-29.
8. Бейтсон Г. Разум и природа / А. И. Фет. Собрание переводов. Philosophical arkiv. Nyköping, Sweden, 214 с.
9. Марков А.В. Рождение сложности. Эволюционная биология сегодня: неожиданные открытия и новые вопросы. «Corpus (ACT)», 2015. 322 с.
10. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. М.: «Мысль», 1978. 272 с.
11. Goodman N. Axiomatic Measurement of Simplicity // The Journal of Philosophy, 1955, vol. 52, №24, pp. 709-722.
12. Kemeny J.G. Two Measures of Complexity // The Journal of Philosophy, 1955, 52, №24, pp. 722-733.
13. Савусін М.П. Категоріальний теоретико-системні засади концепції простоти-складності // Наукове пізнання: методологія та технологія, 2015, №1(34). С. 151-167.
14. Думов А.В. Понятие сложность в философских контекстах: семантическая и прагматическая специфика // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки, 2021, т. 5, № 4(20). С. 328-337.
15. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. М.: «Наука», 1974. 280 с.
16. Эшби У.Р. Теоретико-множественный подход к механизму и гомеостазису / в сборн. «Исследования по общей теории систем. Сборник переводов». М.: «Прогресс», 1969. 520 с. с. 398-441.
17. Зеленский А.А., Кузнецов А.П., Илюхин Ю.В., Грибков А.А. Реализуемость управления движением промышленных роботов, станков с ЧПУ и мехатронных систем. Часть 1 // Вестник машиностроения, 2022, №11. С. 43-51.
18. Горский Ю.М. О некоторых возможностях исчисления организованности при системном анализе / в сборн. «Системные исследования. Ежегодник 1974». М.: Наука, 1974. 230 с. С. 87-99.
19. Грибков А.А. Паттерны общей теории систем. Часть 2. Паттерны устойчивости систем // Контекст и рефлексия: философия о мире и человеке, 2022, №6. С. 5-15.

© Грибков Андрей Армович (andarmo@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»