

$$\begin{aligned} & \beta(t) \int_0^1 g_i(\lambda) u(\lambda) d\lambda + \int_0^1 \int_{-\infty}^t e^{\tau} A_i^{(t)}(\lambda, \tau) \beta(\tau) u(\lambda) d\lambda d\tau = \\ & = (\beta(t) - \int_{-\infty}^t B(t-\tau) \beta(\tau) d\tau) \cdot \int_0^1 g_i(\lambda) u(\lambda) d\lambda. \end{aligned}$$

или, после упрощения,

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_{-\infty}^t e^{\tau} A_i^{(t)}(\lambda, \tau) \beta(\tau) u(\lambda) d\lambda d\tau = \\ & = - \int_0^1 g_i(\lambda) u(\lambda) d\lambda \cdot \int_{-\infty}^t B(t-\tau) \beta(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Теорема Фубини позволяет переписать это равенство в виде

$$\int_0^1 u(\lambda) \left(\int_{-\infty}^t \beta(\tau) (e^{\tau} A_i^{(t)}(\lambda, \tau) + g_i(\lambda) B(t-\tau)) d\tau \right) d\lambda = 0.$$

Рассуждая так же, как и при доказательстве теоремы 5.1, из последнего равенства можно заключить, что

$$e^{\tau} A_i^{(t)}(\lambda, \tau) + g_i(\lambda) B(t-\tau) = 0.$$

Поэтому равенство (7.73) можно переписать в виде (7.46). Теорема 7.3 доказана.

Поступила в редколлегию 12.05.99

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Левыкин В.М.

Бондаренко Михаил Федорович, д-р техн. наук, профессор, академик АН ВШ, ректор ХТУРЭ. Научные интересы: информатика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 43-30-53.

Шабанов-Кушнарченко Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры ПО ЭВМ ХТУРЭ. Научные интересы: идентификация механизмов интеллекта человека. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-46.

УДК 536

К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ ИЕРАРХИЙ В СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ* СИСТЕМАХ

Я возношу молитву, твердо зная,
Что не предаст природа никогда
Ее так любящего сердца.

Уордсворт [39]

СКЛЯРОВ А.Я.

Рассматривается проблема формирования отношений в синергетических системах, которые принято называть иерархическими, построенными на основе принципа подчинения. Дается анализ основных понятий теории развития и самосовершенствования. Предлагаются базовые принципы создания эволюционной теории иерархических систем.

1. Введение

Одной из важных тенденций в развитии современной науки является то обстоятельство, что объектом ее исследований становятся все более и более сложные системы. Это связано с тем, что, с одной стороны, развитие человеческого общества по технократическому пути требует значительного совершенствования средств обеспечения жизнедеятельности, создание которых неразрывно связано с дальнейшим их усложнением; с другой стороны – логика развития науки для более полного познания

объективных законов организации природы** требует принимать во внимание те эффекты, которыми раньше пренебрегали, что также связано с весьма существенным усложнением формальных представлений о реальных объектах и явлениях.

Изучение механизма и причин усложнения объектов “живой” и “неживой” природы требует не только совершенствования существующих методов исследования, но и создания новых, более мощных, в основе которых лежат фундаментальные законы, вытекающие из общих законов сохранения и принципа минимального действия, справедливых для всех форм существования материи и являющихся инвариантами в тех предметных областях, к которым относится конкретный объект исследования [1, 2].

Попытка осознания этой ситуации, с одной стороны, и широкие исследования в области оснований теории синергетических систем [2, 3, 6–13, 21] – с другой привели к тому, что к середине семидесятых годов проблема уточнения общего понятия сложности стала “носиться в воздухе”. Ныне нет по существу ни одной области знаний, не использующей понятия сложности, структуры, динамики, иерархии, которые выражают строение, внутреннюю форму организации и динамическое поведение системы в границах допустимых степеней свободы.

Сознавая, однако, невозможность сколь-нибудь полного охвата относящейся к понятию сложности проблематики, мы решили ограничиться лишь некоторыми, наиболее важными аспектами, разъясняющими это понятие и обладающими многими достоинствами как принципиальными, так и методического плана.

*Синергетика – от греческого “synergeia” – совместное, кооперативное действие; как научный термин введен английским физиологом Шеррингтоном [6].

**Понятие “природа” здесь следует понимать в обобщенном смысле. Оно может включать физические, химические, биологические, психофизиологические, социальные и другие законы и закономерности, определяющие состав, структуру и динамику конкретной исследуемой системы [3].

2. Понятие “сложность”: естественнонаучный аспект содержания и экспликации

Начнем с нескольких общих замечаний и обсуждения того, что мы будем понимать под сложными системами.

Системы могут быть сложными не только потому, что состоят из большого числа динамически взаимодействующих частей, но и из-за обладания свойством реализовывать чрезвычайно сложное поведение (сложную динамику). Таким образом, система может быть сложной на структурном или/и на функциональном уровне. Структурная сложность (сложность “аппаратурной реализации” [9, 10]) возрастает с увеличением числа взаимодействующих элементов, количества и способов связи между ними и изменения плотности вероятности интенсивности взаимодействия между отдельными элементами системы.

Функциональная сложность (процедурная [16], сложность “программного обеспечения” [9, 10]) определяется минимальной длиной алгоритма, с помощью которого можно восстановить все возможное поведение системы (всю динамику). Собственно говоря, современное определение сложной системы опирается на понятие алгебраической сложности, которое позволяет судить не только о качественных аспектах сложности, но и оценить сложность системы количественно [20, 28, 32, 33, 35, 38].

В связи со сказанным выше возникает вопрос о динамике и пределах сложности системы; о причинах, служащих основанием самопроизвольного усложнения систем в процессе их эволюционного развития несмотря на то, что это противоречит законам термодинамики. Поставленный вопрос в последнее время поднимается довольно часто в научной литературе разных направлений в связи с повышением интереса к качественному анализу стабилизационных свойств как искусственных, так и природных систем. Действительно, чем сложнее система, тем более многочисленны типы флуктуаций, угрожающих ее устойчивости.

Как показывают исследования [4, 5, 16, 19, 20], устойчивость обеспечивается стабилизирующим влиянием связей между частями системы, а также влиянием процессов диффузии. Между устойчивостью, обеспечиваемой связью, и неустойчивостью из-за флуктуаций имеется конкуренция [7–9, 24]. От исхода этой конкуренции зависит целостность системы и порог ее устойчивости. В этой связи возникает вопрос о типах и свойствах структурных связей элементов, обеспечивающих максимальный запас устойчивости системы на время “до следующей бифуркации” [32].

С достаточно интересной ситуацией мы встречаемся в моделях, в которых размеры системы входят в качестве параметра бифуркации [6, 32]: рост (производство новых элементов), происходящий необратимо во времени, приводит к необратимой

эволюции всей системы. Таким образом, структурная устойчивость понимается здесь, как реакция системы на введение новых элементов, способных к самовоспроизведению и способных вовлекать во взаимодействие различные процессы, протекающие в системе и окружающей среде. Проблема устойчивости системы относительно изменений такого типа сводится к следующему. Вводимые в небольших количествах в систему новые составляющие приводят к возникновению новой сети отношений между ее компонентами. Новая сеть отношений начинает конкурировать со старым способом функционирования системы. Если система структурно устойчива относительно вторжения новых элементов, то новый режим функционирования не устанавливается, а сами новые элементы погибают или теряют свою индивидуальность в результате влияния предшествующих их внедрению свойств всей системы. Но если структурные флуктуации успешно “приживаются” (например, если новые элементы воспроизводятся достаточно быстро и успевают “захватить” систему до того, как погибнут или утратят свою индивидуальность), то вся система перестраивается на новый режим функционирования: ее активность подчиняется новому “синтаксису” [3]. Кроме того, система должна обеспечивать достаточный диапазон выбора динамического поведения в соответствии с принципом максимального разнообразия. Отсюда можно сделать заключение – структурная и процедурная сложность взаимосвязаны и определяют запас устойчивости сложной системы.

На сегодняшний день практически никто не сомневается в том, что сложные системы в подавляющем большинстве обладают общими свойствами, которые являются инвариантами относительно эволюционных преобразований, происходящих в них. Поэтому одним из наиболее общих и эффективных путей исследования принципов построения сложных систем является переход к изучению качественных свойств, определяющихся не столько свойствами динамики составляющих элементов, сколько свойствами связей их в единое целое. Таким образом, на первый план выдвигаются задачи обнаружения принципов, управляющих возникновением самоорганизующихся пространственных, временных и функциональных структур безотносительно к природе элементов, из которых они образованы.

Целью настоящего исследования является отыскание на основании постулата о фундаментальной инвариантности [22] законов формирования структур и динамики сложных систем, обеспечивающих определенный уровень устойчивости и достаточно продолжительный жизненный цикл для осуществления эволюционного приспособления к изменяющимся условиям внешней среды.

В прикладном плане перед исследователями сложных систем стоит задача обнаружения таких способов связи минимального числа компонент системы,

которые обеспечивают заранее заданное динамическое поведение и достижение компромисса в конфликте между сложностью и устойчивостью. Кроме того, необходимо создать методы анализа эволюции сложных систем вдоль фазовых траекторий и обнаружения точек изменения (потери устойчивости) при обмене энергией, веществом и информацией с окружающей средой.

Исследования структурных особенностей сложных систем различной природы показывают, что обмен энергией и веществом с внешней средой не накладывает особых требований к структурным свойствам отношений между элементами системы. Однако для образования коллективных свойств и их проявления необходимы коммуникативные связи для обеспечения обмена информацией, которые должны осуществляться через посредство образования особых уровней, выполняющих функцию формирования селективной сигнальной информации о динамике элементов системы. Эта информация воспринимается участниками организации как параметры порядка [8], определяющие направление самоорганизации и достижения целевой функции всей системы при обеспечении целостности и определенного запаса устойчивости.

Анализ многочисленных научных публикаций [14, 17 – 21 и др.] показал, что вопросам анализа структур уделяется значительно больше внимания, нежели вопросам исследования динамики образования коллективных функций компонентов, их обнаружения, распознавания и влияния на эволюцию структуры сложных систем, приводящую к самопроизвольному образованию новых свойств и способов их проявлений, разрешая при этом конфликт между сложностью и устойчивостью системы. При этом уместно спросить: почему многие системы так сложны и какие руководящие принципы и способы организации лежат в основе их эволюции?

Решение проблемы теоретического описания организации и развития сложных систем потребовало введения понятия иерархия. Выдержав испытание временем и доказав свою жизнеспособность, оно наряду с понятиями сложность и устойчивость прочно вошло в научный обиход современной теории сложных самоорганизующихся систем; обладает многими достоинствами как принципиального, так и методического плана; оказалось плодотворным и удобным благодаря высокой степени изобразительных средств, которыми оно располагает.

Таким образом, потребность в категории иерархия стала ощущаться уже давно. Она еще больше возросла, когда возникла необходимость отразить некоторые новые появившиеся в приложениях эволюционной теории сложных систем подходы и результаты, не нашедшие в свое время отражения в ряде классических теорий.

Рассмотрение эволюции сложных систем с учетом их исторического развития, по-видимому, позволит подойти к пониманию процессов прогрессирующей дифференциации, специализации, возникновению коммуникативных связей, увеличению сложности, степени организации, надежности и, в конечном счете, возникновению иерархически организованных систем, обладающих свойством моделировать не только окружающую среду, но воспроизводить самих себя и способных к познанию (когнитивных) [3, 12].

В связи с тем, что эволюционные процессы происходят на значительных интервалах времени, для их понимания необходимо обратиться к естественным природным системам, которые в том или ином виде содержат всю информацию о своем эволюционном развитии и механизмах совершенствования [12, 15].

Естественные природные системы, в отличие от созданных искусственно, обладают целым рядом весьма необычных, с точки зрения современной теории сложных систем, свойств. Например, для естественных природных систем не существует “проблемы размерности”, которая на практике приводит к существенным, а в случае нелинейных систем и к принципиальным трудностям в выделении существенных переменных для описания конкретной практической задачи. Спасением от “проклятия размерности” служит интуитивный выбор разумного уровня детализации явления и отражение в моделях свойств лишь этого уровня [12].

При построении моделей обычно имеется неполная информация о целом, его частях и о связях между ними, но, тем не менее, необходимо найти целое. Аналитического решения в общем случае такая задача не имеет. Ее решение “в лоб” при построении имитационных моделей может дать метод перебора. Перебор вариантов есть следствие недостаточности информации. Критерием решения является совпадение следствий из имитационной модели со свойствами реальной системы. Однако при исследовании систем без наличия правил, ограничивающих перебор, такой метод оказывается малоэффективным. При этом основной задачей исследования становится борьба с перебором, т.е. поиск правил, ограничивающих перебор. Ограниченность информации о свойствах реальной системы не позволяет однозначно выяснить ее организацию [12].

При исследовании сложных систем не всегда удается выделить границы системы так, чтобы гарантировать изоляцию ее от влияния внешней среды. Кроме того, сила связей между элементами сложных систем часто носит динамический характер, поэтому представляется затруднительным локализовать подсистемы и элементы. Следует заметить, что границы (по вертикали — от одного иерархического уровня к другому и по горизонтали — внутри одного уровня) также не являются жесткими и зависят от внутренней энергии среды и разнообразия набора свойств нижележащего уровня в функ-

циях элементов вышележащего уровня. Изменение энергии внешней среды меняет свойства системы [12].

3. Самоорганизация, как средство эволюции сложных систем

Природные системы, подчиняясь принципу дополненности и развития [2], реализуют свою структуру и динамику на макроуровне через самоорганизацию элементов на микроуровне. Самоорганизация в системе может возникнуть в точках потери устойчивости в результате появления коллективных свойств, названных в [6,7] параметрами порядка, действующих на систему в соответствии с принципом подчинения. Примерами процессов самоорганизации в природных системах являются [2, 3, 6 – 10]:

в физике – образование сложных структур в гидродинамических системах, когерентные колебания в лазерах, упорядоченные состояния в плазме, эффект мультистабильности в физике твердого тела;

в технике – макроскопические изменения внешних параметров, например явление флаттера, резкие деформации оболочек;

в электро- и радиотехнике – когерентные электромагнитные колебания в различных осцилляторах, появление комбинационных частот в генераторах;

в химии – образование регулярных макроструктур типа реакции Белоусова-Жаботинского;

в биологии – процесс образования высокоупорядоченных, кооперативных структур морфогенеза, т.е. дифференциации клеток путем обмена информацией между собой для последующего образования жизненно важных структур; динамика популяций и эволюция видов как образование макроскопических структур, подчиняющихся принципам сохранения и минимального действия.

Следует отметить, что особое место в формировании самоорганизующихся процессов занимает живая природа, прошедшая довольно значительный путь эволюционного развития. “Живые” системы отличаются тем, что качество их функционирования повышается при расширении разнообразия входящих в них подсистем, разброса параметров и, зачастую, способствует повышению устойчивости и живучести системы за счет стабилизации соотношений между переменными состояниями [2].

Например, любой живой организм представляет собой иерархию до некоторой степени автономных самоорганизующихся систем, в которых исходящая от верхнего уровня сигнальная информация не имеет характера жестких команд, подчиняющих себе активность всех индивидуальных элементов более низких уровней. Вместо этого от высших уровней иерархии поступают лишь сигналы, которые влияют на процессы самоорганизации, протекающие на более низких уровнях, и предопределя-

ют переходы от одного устойчивого режима функционирования подсистемы к другому. Иерархическое построение сложных живых систем, которые представляют собой ансамбль слабо связанных самоорганизующихся подсистем более простого строения, позволяет избежать неустойчивостей и хаотизации динамики, которые неизбежно возникают в сложных системах с жестким централизованным управлением.

Рассмотрим свойства “живых” организмов, которые обеспечивают эволюционное развитие и взаимосвязь прошлого, настоящего и будущего в динамическом изменении и совершенствовании своей структуры и состояний.

Трудно решить, что играет для “живых” систем большую роль – прошлое, настоящее или будущее (ставшее, осуществившееся, становящееся или возможное в будущем). Сегодня с уверенностью можно сказать лишь о том, что все три составляющие в системе присутствуют и оказывают определенное влияние на ее существование. Прошлое присутствует в “жизни” системы в виде накопленного опыта, включающего сжатое описание (“познание”) господствующих в мире закономерностей и причинных связей. Настоящее – как источник сигнальной информации о состоянии среды и системы в данный момент времени. И, наконец, будущее – в виде целей, намечаемых системой как желательные или непрменные элементы будущего (основой формирования цели является принцип сохранения). Намеченная цель обуславливает последующий расчет, выработку на основе опыта и выявленных закономерностей, сигнальной информации о состоянии среды и системы ряда действий, обеспечивающих ее достижение. Таким образом, через усилия, направленные на достижение цели, система изменяет настоящее и устанавливает определенную кросс-корреляцию состояний в данный момент времени с состояниями в будущем.

Особо нужно подчеркнуть, что для “живых” систем существует иерархия целей, определяемая степенью важности. Наивысший приоритет в биологическом смысле имеет потребность в сохранении жизни. Эта главная цель обеспечивается способностью “живой” системы удачно использовать “полезные” факторы и противостоять “вредным”. Таким образом, основная цель – сохранение – достигается стратегией поведения, которая выражается в стремлении к “полезным” факторам и защитными реакциями на “вредные”.

Для выработки стратегии поведения, обеспечивающей выживание, “живая” система должна иметь, как минимум, контактные органы приема сигнальной информации. Такие органы чувств вырабатывают сигналы опасности только при контакте организма с фактором влияния. В связи с инерционностью организма этот сигнальный канал может быть эффективным только при малых и медленно нарастающих по уровню воздействиях.

Для обеспечения большего запаса времени на защитную реакцию организм должен быть наделен органами чувств, которые контролируют некоторую зону безопасности и позволяют осуществлять защитные действия с некоторым упреждением до возникновения контакта. Возможности этого вида защиты выше, нежели контактного, однако он также не гарантирует безопасности организма. В общем случае рассматриваемый механизм контроля зоны безопасности в “чистом” виде может быть и бесполезным, если он не подкреплён свойством сжатия получаемой информации о состоянии окружающей среды.

Более совершенный механизм защиты основан на предвидении вероятного. Он должен включать механизм, обеспечивающий использование информации о происходящем сейчас и случившемся в прошлом, позволять устанавливать кросс-корреляционные связи и с некоторой вероятностью судить об исходе тех или иных состояний или событий, которые представляют интерес для организма. Такую способность “живых” организмов к экстраполяции опыта, выражающуюся в способности моделировать будущее, называют “опережающим отражением” [11]. При этом имеется в виду способность умозрительного синтеза будущего, т.е. моделирования вероятных исходов задуманных, зародившихся или уже развивающихся ситуаций. Это наводит на мысль о существовании принципов естественного самопроизвольного формирования системы, обладающей свойствами обеспечения эффективной и целесообразной защиты в целях выживания.

Из сказанного ясно, что знание основных закономерностей самоорганизации в “живой” природе позволяет перейти к целенаправленному созданию искусственных систем, которые по своим характеристикам не уступали бы системам, прошедшим путь эволюционного развития в борьбе за выживание. Эволюционное изменение здесь понимается как каскад “почти дискретных” событий – бифуркаций, каждое из которых приводит к появлению более сложного или более абстрактного иерархического уровня в данной динамической системе.

Таким образом, общая задача, решение которой приблизит нас к пониманию процессов прогрессирующей дифференциации и образования иерархической упорядоченности при усложнении динамических систем, состоит в исследовании условий, при которых возможно спонтанное возникновение дальней пространственной и/или временной когерентности среди элементов системы и среды, в которую они погружены, и условий сохранения устойчивости когерентного поведения в течение достаточного интервала времени.

Кооперативное поведение большого количества составляющих систему элементов возможно лишь благодаря их активности, обеспечиваемой притоком энергии (и информации) или вещества из внешних источников и динамикой их внутренней

организации. По-видимому, для обеспечения кооперативной динамики элементов системы необходимо, чтобы они обладали свойством формирования символьных взаимодействий; могли образовывать соответствующие коммуникативные связи, которые понимаются как средство моделирования поведения окружения (соседних элементов и состояния среды) в целях предсказания их поведения и использования в соответствии с принципами сохранения и минимального действия.

Известно [9], что локализованный элемент системы способен моделировать другие элементы и среду только в том случае, если он способен воспринимать сигналы, распространяющиеся по коммуникативным связям от участников организации, и строить из принятого временного ряда конечной длины сжатое их описание (структуру и динамику), т.е. выполнять функцию “компрессии” информации [3]. Сжатое описание рассматривается нами, как правило или закон, описывающий свойство рассматриваемой системы и остающийся всегда тем же самым в потоке частных событий. В простейшем случае берется свойство, инвариантное относительно множества преобразований, которым подвергается система. Так мы приходим к понятиям преобразования, группы преобразований и инварианта.

Кроме этого, локализованный элемент должен обладать свойством информатора [8], формирующего (порождающего) и передающего информацию в среду для задания значений параметров порядка [6,7], обеспечивающих подчиненность и самоорганизацию в виде коллективного поведения множества элементов в течение определенного временного интервала, так как только долговечность является необходимой предпосылкой возникновения все более и более сложных структур и, в конечном счете, форм жизни с все возрастающим числом иерархических уровней, как структурных, так и когнитивных.

Поэтому, на наш взгляд, локализованный элемент, способный к коллективному поведению, может быть представлен в виде, как минимум, двухуровневой структуры, состоящей из уровня “аппаратурной реализации” и “процедурного” уровня. Этот элемент должен обладать способностью установления коммуникативных связей, возникающих в процессе эволюционного развития, которые, в свою очередь, обеспечивают возрастающую со временем дифференциацию, специализацию и сложность организации.

В [9] показано, что для обмена энергией между двумя элементами (подсистемами) не обязательно, чтобы их отношения строились по принципу иерархической упорядоченности. Однако для коммуникативной связи такое упорядочение необходимо (один иерархический уровень требуется для установления кросс-корреляции, а другой, более высокий, для “осознания” ее). Только при иерархической форме коммуникативной связи появляется возможность эффективного обнаружения законо-

мерностей в принимаемых временных информационных рядах и использование полученных сжатых отображений (моделей) для прогнозирования своей динамики и путей совершенствования организации.

Здесь уровни понимаются в смысле Фон Неймана [16], где самовоспроизводящийся конструктор представляет собой аппаратную реализацию (нижний уровень) с присоединенной программой (верхний уровень), которая реализует алгоритм самовоспроизведения. Для реализации самовоспроизведения он должен быть помещен в среду элементов, из которых можно собрать свою копию. При этом конструктор должен иметь свойства, позволяющие распознавать нужные элементы, захватывать и соединять их в единую конструкцию. После того, как получена аппаратная реализация, новому автомату переписывается программа. Такая схема моделирования самого себя по своей сути является тавтологией и исключает эволюционные изменения, порождающие процесс саморазвития.

В нашем же случае задачей “процедурного” уровня является анализ и моделирование свойств, возникших в результате ряда кросс-корреляций или сверток между внутренней динамикой аппаратного уровня и принятым временным рядом из внешней среды, а также передача символьного описания своей “аппаратурной реализации” в окружающую среду. Кроме того, процедурный уровень обеспечивает формирование значений параметров порядка и передачу их на уровень “аппаратурной реализации” для задания условий самоорганизации (приспособления к изменяющимся характеристикам среды). В результате указанных взаимодействий из микроскопических свойств и поведения элементов появляются новые коллективные свойства системы на макроскопическом уровне.

Одной из наиболее важных проблем в эволюционной теории сложных систем является возникающая в итоге обратная связь между макроскопическими и микроскопическими событиями: макроскопические структуры, возникая из микроскопических событий, должны были бы в свою очередь приводить к изменениям в микроскопических механизмах. Такие взаимосвязанные процессы порождают очень сложные ситуации, и это обстоятельство необходимо осознавать, приступая к их моделированию [3].

В качестве примера можно привести следующее. В природных самоорганизующихся системах процесс развития часто ограничивается не внешними причинами, а внутренними свойствами объекта: морфогенетические процессы заканчиваются после того, как восстановлено целое, а не по причине отсутствия питания или из-за других внешних факторов [13]. По-видимому, целое в данном случае относительно процесса становления обладает значительно большим запасом устойчивости и приобретает свойства, тормозящие и, в конечном счете, прекращающие количественный рост. Такой режим развития можно объяснить наличием меха-

низмов переключения положительной и отрицательной обратной связи.

Появление указанных макроскопических свойств в биологических системах при надлежащей интерпретации можно рассматривать как самозарождение смысла [8]. При этом следует отметить, что одной из наиболее поразительных особенностей любой биологической системы является чрезвычайно высокая степень координации между ее отдельными частями. Совершенно очевидно, что все высококоординированные и когерентные процессы формирования и функционирования организма становятся возможными только при обеспечении обмена информацией. При этом она должна быть произведена, передана, принята, обработана, преобразована в новые формы и должна принять участие в обмене информацией между различными частями системы, принадлежащими как одному, так и различным иерархическим уровням.

Как известно, понятие информации достаточно сложное и неоднозначное [4-6, 11]. В каждом конкретном случае его использования требуется прояснить те или иные аспекты. В нашем исследовании информация понимается не только с позиций пропускной способности канала, как это принято в [5] (Шеннон), или с точки зрения команд, отдаваемых центральным регулятором отдельным элементам, как в [4] (Винер). Мы придерживаемся взглядов, высказанных в [8] (Хакен), где информация рассматривается еще и как некоторая совокупность свойств элемента системы, порождающих многокомпонентные некоммутирующие обобщенные калибровочные поля Вейля-Утиямы [40], способные устанавливать взаимно-однозначное соответствие между различными точками фазового пространства; поддерживаются эти поля отдельными элементами системы и воспринимаются ими средствами коммуникационной связи для обеспечения когерентного (кооперативного) поведения. Именно на этом уровне понимания можно говорить о семантике информации и ее роли в формировании организации системы, самозарождении смысла, выражающегося в самопорождении компонент информационного поля, которые сопутствуют взаимосвязанным компонентам свойств элементов системы.

Для продвижения в понимании принципов организации сложных иерархических систем, на наш взгляд, необходимо создать систематическую теорию, математическую и логическую по форме, которая упорядочила бы понятия и принципы, касающиеся структуры и организации естественных и искусственных систем, их устойчивости, роли языка и информации в таких системах, программирования и управления сложными системами; позволила бы выявить внутренние механизмы взаимосвязи сложности и устойчивости, подчиняющихся в своем эволюционном развитии принципам сохранения, минимального действия и максимума разнообразия. Другими словами: необходи-

мо открыть объективные инвариантные законы зарождения и развития организации сложных систем, способных к самоусложнению, самовоспроизведению, самосознанию на основе принципов самоорганизации.

Однако цель настоящих исследований куда скромнее: мы хотим лишь показать несколько непереносимых свойств элементов (подсистем), которые могут обеспечить эволюционную реорганизацию системы, ее усложнение, достаточное разнообразие динамики и устойчивость на определенном интервале времени.

4. Иерархия в природном и искусственном

Решение прагматической на первый взгляд задачи построения рациональной иерархии при организации сложных систем требует глубокого понимания сущности понятия иерархия и прежде всего причин, обуславливающих появление отношений между элементами системы или в коллективном динамическом поведении, которые мы понимаем как иерархические (построенные на основе принципов подчинения).

Понятие иерархия неразрывно связано с понятиями развитие, усложнение, устойчивость. Поэтому одним из основных признаков сложности системы является ее способность к развитию и совершенствованию в соответствии с принципами сохранения и минимального действия в самом широком смысле их понимания. Развитие, в свою очередь, предполагает как количественные (увеличение числа компонентов), так и качественные изменения (появление значительного разнообразия типов связей и динамики) в системе, что с необходимостью влечет за собой значительное увеличение степеней свободы элементов, а это, в конечном счете, приводит к увеличению неопределенности в динамике на микроуровне (уровне элементов). Как известно [3, 6, 9, 10, 34], такие системы допускают появление коллективных свойств, которые не могут быть выведены из гамильтоновой динамики компонент и требуют для их описания значительно меньшее количество макропеременных или статистических моментов функции плотности вероятности, заменяющих микроскопическую динамику. Коллективные свойства (а в модели параметры) здесь чаще всего выступают в качестве параметров порядка, подчиняющих динамику компонентов системы таким образом, чтобы сохранять устойчивость в течение определенного интервала времени.

Мы считаем, что практически единственной объективной причиной появления иерархической упорядоченности в сложных системах является обеспечение механизма самоорганизации и устойчивости динамики в эволюционном процессе развития. Возможно, что высказанная гипотеза имеет предварительный и временный характер, тем не менее, она, на наш взгляд, скорее полезная, чем препятствующая поиску правильной интерпретации исследуемого понятия.

В последнее время возрос интерес к иерархическим многоуровневым системам, расширился диапазон их применения в разнообразных сферах человеческой деятельности, а также увеличился объем информации об их широкой распространенности в “живой” и “неживой” природе. Достаточно отметить распространенность иерархических систем лишь в областях, которые перечислим ниже.

В “живой” природе достаточно определенно выявлен ряд уровней: молекулярный и клеточный, уровни тканей и органов [30], на каждом из которых, в свою очередь, обнаружено многоуровневое строение, в частности:

трехуровневая временная организация клетки [25, 26];

многоуровневые системы управления движением глаз в процессе слежения за объектами наблюдения [26];

системы управления процессом мышечной активности при построении движения [8];

системы управления регуляцией водно-электролитного баланса у млекопитающих [27];

системы управления регуляцией сердечно-сосудистой системой в различных живых организмах [16, 26] и т. д.

В организационно-технологических системах только иерархическое их построение обеспечивает согласованное функционирование элементов и достижение общей цели с минимальными затратами. На важность формы организации в социальных системах указывал Эрроу: “Среди всех творений человека использование организации для осуществления его целей — одно из самых великих и самых ранних его изобретений. Даже при отсутствии других свидетельств было бы ясно, что осуществление таких грандиозных строительных программ, как возведение четко распланированных городов вроде Нара и Киото или таких монументов, как египетские пирамиды, было бы невозможно без создания сложных организаций” [14].

В последнее время в связи с возросшим воздействием человека на окружающую среду большая потребность в теории иерархических систем возникла в экологических исследованиях, направленных на оптимизацию взаимодействия человека с окружающей средой. Особое значение приобретает задача выявления горизонтальных связей внутри локализованного уровня, их свойств, а также исследования межуровневых взаимодействий с целью определить граничные условия устойчивости и целостности экологических систем.

Первые публикации по математической теории иерархических систем относятся к началу шестидесятых годов [14, 17, 18]. Современное состояние теории можно охарактеризовать так, как это сделано в предисловии к работе [14]: “В настоящее время хорошо развита только теория одноцелевых, одно-

уровневых решений, в целом слабее развита и значительно меньше применяется теория многоцелевых одноуровневых решений (теория игр), и лишь совсем недавно стала развиваться теория многоцелевых, многоуровневых решений и соответственно теория иерархических систем управления”. К сожалению, многие теоретические работы часто строятся на столь высоком уровне общности, что трудно говорить о получении конструктивных решений для сколько-нибудь реальных систем, т.е. теория далека от завершения и практического применения достигнутых результатов. В этой связи разработка конкретных процедур математического моделирования иерархических систем управления с приложением к различным областям применений представляет в настоящее время большую ценность.

Следует подчеркнуть, что успешное применение математической теории иерархических систем в значительной степени зависит от правильного учета основных принципов организации систем различной физической природы, ибо учет этих принципов и открытых законов позволит найти эффективные пути в борьбе со сложностью и неустойчивостью при исследовании и разработке искусственно создаваемых систем, не уступающих по своим характеристикам природным системам, прошедшим значительный путь эволюционного развития.

Проблема теоретического описания развития сложных систем, возникновения иерархического расчленения и динамики иерархической организации в последнее время все чаще и чаще рассматривается во многих работах. Всех, кто занимается исследованием сложных многокомпонентных нелинейных систем, не покидает желание разработать общий научный подход и математический аппарат для их анализа и синтеза, который бы давал достоверный прогноз структурной динамики, вскрывал механизмы самоусложнения, регенерации и эволюционного самосовершенствования.

На наш взгляд, необходимо поставить и решить отнюдь не очевидный вопрос о том, какого рода логическая организация системы достаточна для того, чтобы она могла быть способной к самосовершенствованию и быть инвариантной относительно свойств элементов, из которых она состоит. При этом уместно спросить: почему многие системы так сложны и какие руководящие принципы лежат в основе их эволюции?

По-видимому, необходимо направить усилия на то, чтобы открыть объективные законы построения сложных систем, выявить удобные для восприятия понятия, широко приложимые принципы и построить общую теорию, математическую и логическую по форме, которая упорядочила бы понятия и принципы, касающиеся структуры и организации естественных и искусственных систем.

В задачу теории, в частности, должно входить освещение проблемы появления иерархической

упорядоченности сложных систем в ее генезисе; теория должна раскрыть сам принцип и причину появления отношений в системе, которые понимаются как отношения подчиненности; поставить проблему формирования уровней иерархии на четкие количественные основания с указанием методов достижения этой цели; подчеркнуть центральную роль адекватности математического аппарата при построении различных моделей сложных систем с иерархической организацией; предложить новый подход к выявлению устойчивых состояний самоорганизующихся систем и причин, их обеспечивающих; показать, что формирование очередного уровня иерархии есть по существу последовательная смена строго определенных инвариантов, приводящих к самоусовершенствованию системы в потоке ее движения по “эволюционной лестнице природы”.

В приведенных выше рассуждениях мы исходили из предположения о том, что в процессе эволюции системы от простой к более сложной одной из причин появления иерархических отношений в структуре и динамике сложных эволюционирующих систем являются противоречия между устойчивостью и сложностью, которые разрешаются посредством формирования новых взаимоотношений и соответствующих им иерархических уровней.

5. Какой должна быть теория, объясняющая иерархии и их роль в синергетических системах

Приступая к анализу взаимозависимости устойчивости и сложности систем, необходимо начать с задач, которые уже ясно сформулированы, касаются обычных явлений и приводят к хорошо известным результатам: строгая теория, объясняющая эти результаты, может стать основой дальнейшего продвижения в исследованиях. Однако задача систематического изложения синергетической теории иерархий ставит перед любым берущимся за ее решение автором ряд трудных проблем как принципиального, так и методического характера.

Не вдаваясь в подробный разбор всей возникающей здесь проблематики, мы все же отметим, что в процессе разработки теории придется так или иначе решить вопрос о том, в каких терминах будут излагаться основные понятия теории, какой математический аппарат при этом будет привлекаться, какие он будет допускать способы умозаключений и, наконец, методологические средства каких надежных и апробированных теорий будут привлечены.

Поэтому при выборе средств, с помощью которых необходимо строить синергетическую теорию иерархических систем, естественно проявлять максимальную сдержанность. Принимая сказанное во внимание, мы считаем, что методологической основой и используемыми средствами математического аппарата должны быть: теория устойчивости Ляпунова [24]; теория Марковских процессов [29, 37];

теория игр; теория диссипативных систем Пригожина [23] и динамического хаоса [10, 34]; синергетика Хакена [6-8]; теория самовоспроизводящихся автоматов Неймана [16]; теория информации и передачи сигналов [4, 5, 10, 36]. При этом необходимо позаботиться о том, чтобы всегда при формировании тех или иных высказываний и умозаключений опираться на фундаментальные принципы сохранения минимального действия и максимума разнообразия, что позволит оставаться в рамках конструктивных процессов и конструктивно приемлемых способов рассуждений.

Такой подход к построению синергетической теории иерархических систем делает ее слабо зависимой от традиционных теорий: общей теории систем [17], теории управления сложными системами [1, 4, 5, 18, 31], теории иерархических многоуровневых систем [14, 19, 30] или даже лучше сказать – от традиционного учения об “управлении и связи в животном и машине” [4]. И, может быть, со временем это обстоятельство, а также накапливающийся в процессе реализации такого подхода опыт будут содействовать перерастанию упомянутого учения в настоящую синергетическую теорию иерархических систем с точным, а не вводимым интуитивно на примерах определением одного из основных понятий – иерархия. Это станет еще одним шагом вперед на пути к проникновению в самую суть механизма самоорганизации природы, который становится теперь не только предметом описания, но и объектом прямого исследования – теоретического и экспериментального.

Литература: 1. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика, 1990. №11. С. 3-28. 2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 343 с. 3. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ./ Общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича и Ю.В. Сачкова. М.: Прогресс, 1986. 432 с. 4. Винер Н. Кибернетика: или управление и связь в животном и машине. М.: Сов. радио, 1968. 326 с. 5. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике: Пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова, с предисловием А.Н. Колмогорова. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, 829 с. 6. Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 23 с. 7. Хакен Г. Синергетика: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 404 с. 8. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 240 с. 9. Николлис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление: Пер. с англ. /Предисл. Б.Б. Кадомцева. М.: Мир, 1989. 488 с. 10. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику: Учеб. руководство. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 272 с. 11. Штанько В.И. Информация. Мышление. Целостность. Харьков: Типография ХВВКИУРВ, 1992. 144 с. 12. Иваницкий Г.Р. Ритмы развивающихся сложных систем. М.: Знание, 1988. 48 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. “Математика, кибернетика”; № 9). 13. Галактионов В.А., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика - теория самоорганизации. Идеи, методы, перспективы. М.: Знание, 1983. 64 с. (Новое в

жизни, науке, технике. Сер. “Математика, кибернетика”; № 2). 14. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с. 15. Пуанкаре А. О науке: Пер. с франц. М.: Наука, 1983. 560 с. 16. Фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов: Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 382 с. 17. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы.: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 311 с. 18. Лэддон Л. Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975. 532 с. 19. Крон Г. Исследование сложных систем по частям: Диакоптика. М.: Наука, 1972. 542 с. 20. Немировский А.С., Юдин Д.Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации. М.: Наука, 1979. 383 с. 21. Исследования по теории структур. Сборник научных трудов / Под ред. М.А. Айзермана, Э.Р. Каянелло. М.: Наука, 1988. 203 с. 22. Гельмгольц Г. О сохранении силы. 2-е изд. Л.: ЛГТИ, 1934, с. 32-33. 23. Николлис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядочению через флуктуации. М.: Мир, 1979. 317 с. 24. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. М.: Главполиграфиздат, 1952. 431 с. 25. Гудвин Б. Временная организация клетки. М.: Мир, 1966. 251 с. 26. Хьюбел Д., Стивенс Ч., Кэндел Э. Мозг: Пер. с англ. /Перевод Алексеенко Н.Ю.; Под ред. и с предисловием П.В.Симонова. М.: Мир, 1984. 280 с. 27. Мари Д. Временная иерархия в регуляции водно-электролитного баланса у млекопитающих. В кн. Динамические системы и управление. М.: Мир, 1973. С. 9-14. 28. Николлис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 284 с. 29. Четаев А.Н. Нейронные сети и цепи Маркова. М.: Наука, 1985. 128 с. 30. Чернышев М.К., Гаджиев М.Ю. Математическое моделирование иерархических систем с приложениями к биологии и экономике. М.: Наука, 1983. 191 с. 31. Справочник по теории автоматического управления /Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 711 с. 32. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967. 488 с. 33. Солодовников В.В., Турмакин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. М.: Наука, 1990. 162 с. 34. Куффер С., Николс Дж. От нейрона к мозгу. М.: Мир, 1979. 439 с. 35. Схрейвер А. Теория линейного и целочисленного программирования: Пер. с англ. / Под ред. Л.Г.Хачияна. М.: Мир, 1991. 360 с. 36. Стратонович Р.Л. Теория информации. М.: Сов. радио, 1985. 486 с. 37. Марков А.А. Избранные труды: Теория чисел. Теория вероятностей / Под ред. Ю.В.Линника. М.: Изд. Академии наук СССР, 1951. 717 с. 38. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. М.: Наука, 1990. 458 с. 39. Клайн М. Математика. Утрата определенности: Пер. с англ. / Под ред., с предисл. и примеч. И.М.Янглома. М.: Мир, 1984. 434 с. 40. Утияма Р. К чему пришла физика (От теории относительности к теории калибровочных полей). Пер. с япон. Предисл. акад. В.Л.Гинзбурга. М.: Знание, 1986. 224 с.

Поступила в редколлегию 14.09.2000

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Шабанов-Кушнаренко Ю.П.

Скляров Александр Яковлевич, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных управляющих систем ХТУРЭ. Научные интересы: законы самоорганизации в природном и искусственном. Хобби: история науки и “поиск знаний не только в книгах, но и в самих вещах”. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел 40-94-51.