

СЛОЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Цветков Виктор Яковлевич,

*заместитель руководителя центра стратегического анализа и развития,
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС),
Москва, Россия
e-mail: cvj2@mail.ru*

Статья анализирует сложную техническую систему. Исследуется понятие сложной технической системы. Показано, что в современном понимании сложная техническая система является информационно-технической системой. Проводится сравнение сложной системы и сети. Показано сходство и различие между сложной технической системой и сетью. Описан аутопойезис сложной технической системы. Раскрываются аспекты теории социальных систем Лумана применительно к сложной технической системе. Показана приемлемость теории Лумана к описанию сложной технической системы. Описаны принципы и свойства сложной технической системы. Статья доказывает, что общая теория систем не пригодна для полного описания сложных систем. Для описания сложных технических систем необходима новая теория сложных систем.

Ключевые слова: сложность, сложная техническая система, аутопойезис, сетевая система, блоки системы, энтропия

Введение

Сложными техническими системами называют системы, поведение которых сложно моделировать из-за сложных зависимостей между их частями или из-за сложных взаимодействий между данной системой и окружающей средой [1; 2]. Системы, которые называют «сложными», имеют специфические свойства, такие как нелинейность, гетерогенность, частичная стохастичность, неопределенность, петли обратной связи (циклы) и другие [3–5]. Такие системы применяют в разных областях [6], поэтому можно выделять общие характеристики таких систем и частные характеристики. Соответственно разделяют общее направление исследования систем и специальные направления. Общие характеристики являются специальной темой исследований, которая связана с системным анализом и теорией систем. Специальные характеристики служат основой изучения систем применительно к предметной области или специфическому взаимодействию системы и среды. Сложные системы используются в качестве обобщающего термина, охватывающего многие дисциплины, включая транспорт, физику, нелинейную динамику, биологию, информатику, астрономию, социологию, экономику и прочее. Следует подчеркнуть различие между современными сложными техническими системами (СТС) и сложными техническими системами, существовавшими в «докомпьютерный период». Проведем параллель, современные информационные технологии отличаются от докомпьютерных информационных технологий (телефония, телеграф). Точно также современные СТС отличаются от ранее существовавших СТС, включением информационной компьютерной и телекоммуникационной компонент. Поэтому современные СТС можно обозначить термином «сложные информационно-технические системы», что по сути соответствует этим системам, но такой термин не нашел широкого применения. Поэтому будем говорить о СТС, имея в виду наличие информационной составляющей в этих системах как основной. В целом исследование сложных технических систем имеет междисциплинарное значение.

Сложные системы и сложные сети

Термины сложные системы и сложные технические системы (СТС) изучают с использованием подхода, который исследует, как отношения между частями системы приводят к ее общему поведению и изменению состояния системы. Этот подход включает исследование того как система взаимодействует с внешней средой [1; 7]. Этот подход включает исследование того, как система изменяет внутренние отношения между частями и внешние отношения со средой. Изучение сложных систем включает изу-

чение коллективного или общесистемного поведения. Важную роль в этом играет структурный анализ [8] и структурное моделирование [9].

Следует отметить принципиальное различие между системным анализом и теорией сложных систем. Системный анализ исследует сложные системы как некую абстракцию одинаковую для разных предметных областей. Он исключает особенности сложных технических систем, сводя их к абстрактной и упрощенной модели сложной системы. По существу системный анализ исключает «сложность системы» и рассматривает системы упрощенно.

Теория сложных систем направлена на изучение сложности как главной характеристики сложных систем и сложных технических систем. Соответственно, эта теория изучает все факторы, которые влияют и создают сложность системы. Рассмотрение СТС как сложной системы приводит к понятию распределенная система как к примеру сложной системы. В свою очередь, изучение распределенной системы приводит к понятию сети или сетевой системы. Поэтому можно говорить о сходстве СТС с сетевой системой или сетью.

Если структура сети или системы имеет большое количество узлов, то это является признаком сложности и дает основание применять теорию работы с «большими графами» [10]. Для больших сетей (и соответственно СТС) возникает проблема анализа структуры и выделения в ней «над структуры», как наиболее важной части структуры. Как правило, такая «над структура» является скрытой, или латентной характеристикой. Выявление латентной структуры, скрытой в масштабных сетях, является важной задачей, решение которой необходимо для качественной оценки сложных сетей, а также для анализа сложных систем. Сложные системы содержат множество компонентов (блоков), которые имеют определенные функции.

Различие между сложными системами и сложной сетью в том, что сеть, прежде всего, отражает простую структуру связей между узлами и взаимодействие между узлами. Сеть структурно характеризует либо состояние объекта, либо переход объекта из одной точки сети в другую. В сети может находиться множество объектов, и она является характеристикой множества объектов. Отсюда для сети важной характеристикой являются переходы между узлами сети. Сеть отражает структуру связей между узлами и взаимодействие между узлами.

Сложные системы чаще структурно характеризуют один объект. Структура СТС характеризует отношение между компонентами системы и взаимодействие СТС с внешней средой. Сложные системы имеют по отношению к сети дополнительные свойства: целостность, эмерджентность, инегративность [11], многоуровневость структуры, а также наличие отношений, которые не являются связями, но влияют на функционирование системы.

Сеть является более простым объектом в сравнении со сложной системой [12]. В силу этого представление сложной системы и сложной сети не эквивалентны, хотя имеют общие признаки. Этими общими признаками являются блоки или компоненты системы и сети. В сети и в СТС можно выделить блоки, которые имеют внешние и внутренние связи. В представлении сети блоки (компоненты системы) являются совокупностью вершин с высокой плотностью внутренних связей и низкой плотностью внешних связей. Это является основным критерием группировки (кластеризации) и генерализации сетей и переходе от простой сети к блочному представлению. Таким образом, генерализация сети в графовом представлении означает переход от простого узлового представления сети к сложному блочному представлению. Такое представление является формальным. В когнитивном управлении этот механизм лежит в основе построения когнитивных карт [13].

В представлении сложной системы блоки или компоненты являются объединениями элементов по общему функциональному назначению. Такое представление является физическим, поскольку компоненты или блоки системы можно представить как малые системы, имеющие общий вход и выход.

Различие между сетью и СТС прослеживается при анализе энтропии этих объектов. Для сети перемещение объекта может быть рассмотрено как случайная величина X , которая переходит из одного состояния (узла) в другой с частотами p_i . Это определяет энтропию сети $H_N(X)$ по множеству узлов и переходов между ними.

$$H_N(X) = -\sum p_i \log(p_i). \quad (1)$$

Здесь $i=1 \dots n$, n – количество узлов в сети.

Сеть физически состоит только из узлов, поэтому выражение (1) описывает такую простую модель.

Энтропия сложной системы определяется на основе того что СТС физически состоит из компонент (подсистем, частей, блоков), которые включают элементы (аналоги узлов сети). Это определяет энтропию $H_s(X)$ сложной технической системы как покомпонентную энтропию (первый член в выражении (2)) и внутри компонентную энтропию (второй член в выражении (2)).

$$H_s(X) = -\sum q_i \log(q_i) + \sum H_{ci}. \quad (2)$$

Здесь $i=1 \dots m$, m – количество компонентов в системе $m < n$. H_{ci} – энтропия компонента системы. Сравнение (1) и (2) дает основание прийти к выводу

$$H_N(X) \gg H_s(X). \quad (3)$$

Энтропия сети, характеризующая неопределенность и непредсказуемость сети на много больше, чем энтропия СТС. Сложная техническая система более устойчивая и предсказуемая по сравнению с сетью. Причина этого кроется в меньшем числе переходов или связей при том же количестве элементов. С ростом числа узлов количество связей в плоской сети растет пропорционально $(n^2/2)$ квадрату узлов в сети. В сложной системе таких переходов значительно меньше $(m^2/2)$. Косвенно из этого следует вывод, что для устойчивости и определенности любой системы ее необходимо разбивать на блоки с уменьшением количества переходов между ними.

Аутопойезис сложной технической системы

При исследовании этого вопроса придерживаемся точки зрения, что современная СТС является информационно-технической и включает элементы искусственного и естественного интеллекта. Только для таких систем применимо понятие аутопойезис. Термин «аутопойезис» введен социологом Никласом Луманом в его теории социальных систем, которая основана на трех концепциях, связанных воедино в его работе [14]. Это следующие концепции: теория систем как теория общества; теория коммуникации; теория эволюции. Эти положения развиты в его работе [15]. Основные категории, которые лежат в основе теории систем Лумана следующие: комплексность, редукция, рефлексия, аутопойезис, функциональная дифференциация. Следует отметить качественное отличие теории систем Лумана от большинства теорий систем других авторов [3–8]. Классические теории систем базируются на абстрактных моделях, привязанных к логике и математике. Теория систем Лумана базируется на аналогиях развития биосистем и социальных систем.

Различие целого (системы) и части (блока системы) в теории Лумана трансформировано на различие системы и окружающей среды. Это является новым по отношению к классической теории сложных систем, поскольку сложные системы часто трактуются как замкнутые системы. Теория систем Лумана находится между классической теорией систем и теорией динамических систем [3]. Она с разной степенью применима к различным сложным техническим системам. На рисунке 1 даны основные принципы теории социальных систем.

Особенность схемы на рисунке 1 в том, что она включает три пары принципов и один основополагающий принцип аутопойезиса.

Первая пара сложность и редукция. Сложность, которая может быть динамической, является основополагающим принципом. Этот принцип соотносит теорию Лумана с теорией сложных систем. Сложность как отношение между системой и внешней средой трактуется Луманом как неограниченное количество возможностей, которые угрожают системе. Эта модель напоминает модель энтропии сети (1).

В паре со сложностью идет редукция. Этот принцип формально соотносит теорию Лумана с теорией систем и системным анализом. Однако в трактовке Лумана редукция означает изменение качества системы или ее подсистем не в сторону упрощения системы, а в сторону уменьшения внешних связей и внешней сложности для снижения угроз для возможности системы их отражать и при этом функционировать. Таким образом, Луман трактует редукцию не как механизм упрощения систем, а как основу рациональности поведения и фактор выживания. Такой трактовки в общей теории систем нет, но она вполне приемлема для СТС.

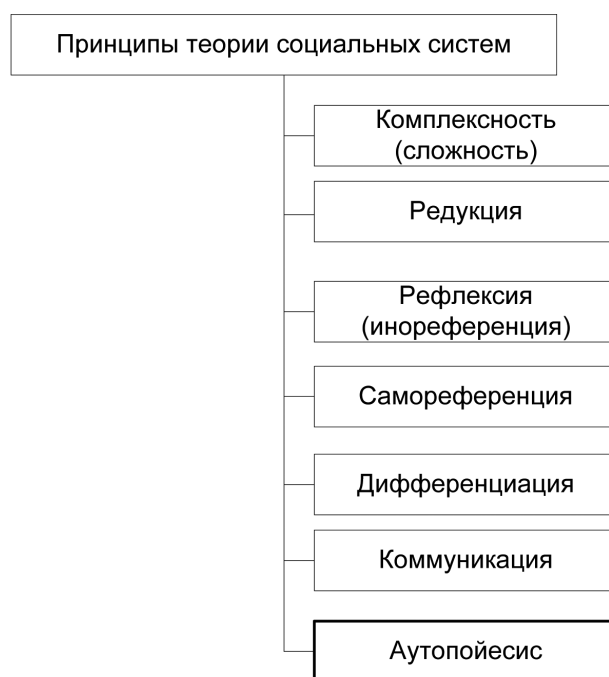


Рисунок 1 – Основные принципы теории социальных систем Лумана

Следующая пара связанных принципов рефлексия и самореференция. В общей теории систем таких категорий нет. Рефлексия в трактовке Лумана означает самоотнесение с другим, то есть взаимодействие системы с внешней средой. Самореференция несколько отличается от общепринятого значения и означает в теории Лумана самоидентификацию, то есть характеристику внутреннего взаимодействия блоков системы. Таким образом эта пара принципов связывает внутреннее и внешнее взаимодействие в СТС.

Третья пара принципов дифференциация и коммуникация. Коммуникация означает передачу и обмен информацией. Функциональная дифференциация состоит в различии и обособлении подсистем общества, что применительно к теории систем Лумана, означает дифференциацию внутренних частей системы и дифференциацию отношений между системой и внешней средой. Дифференциация является динамической характеристикой и направлена на выделение новых свойств и качеств в системе, которые происходят в процессе ее функционирования и развития.

Важнейшим не парным принципом является аутопойезис. Он объединяет все остальные принципы. Аутопойезис означает самоорганизацию и самовоспроизводство.

Луман выделяет аутопойезис как важнейший системный принцип [16]. Данный термин Луман заимствовал у нейробиологов, полагая, что сложная система должна быть аналогичной биологическим системам и способна создавать все имеющиеся части на основе собственных ресурсов. В современном синергетическом понимании это свойство называют самоорганизацией и саморазвитием. Аутопойезис является интегратором, соединяющим все принципы социальных систем и обеспечивающим функционирование системы. Все рассмотренные принципы применимы к СТС.

Особенность СТС в том, что она не является интеллектуальной системой, но содержит интеллект в отдельных блоках и в человеческом участии в работе. Поэтому аутопойезис СТС формируется на основе синтеза моделей саморазвития сложных систем и человеческого интеллекта. Аутопойезис СТС имеет следующие свойства:

- 1 Способность формировать и развивать внутреннюю модель мира.
- 2 Способность извлекать знания и производить новые знания.
- 3 Способность к моделированию.
- 4 Способность формирования собственных ресурсов.
- 5 Способность трансформации неявного знания в явное.

При наличии аутопойезиса многие блоки СТС обладают либо внешним или внутренним интеллектом. Каждый блок СТС при наличии аутопойезиса может осуществлять информационное взаимо-

действие с другими блоками. Сообщество боков может осуществлять взаимодействие с внешней средой. Интеллектуальный блок способен к саморазвитию и кооперации с другими блоками системы.

Информационное взаимодействие между блоками в пределах системы и блоками со средой различается. Информационное взаимодействие между блоками в системе основано на принципе информационного соответствия [17]. Информационное взаимодействие между элементами и средой основано на принципе редукции [14; 15].

Блоки СТС, имеющие интеллект, с течением времени накапливают системные отличия и осуществляют системную дифференциацию по Луману. При этом могут возникать новые целевые функции как результат саморазвития системы. Саморазвитие системы требует ее периодического обновления. Наличие блоков СТС с интеллектом обеспечивает адаптивность СТС и ее саморазвитие. В силу модификации и обновления блоков реакция СТС системы на одинаковое воздействие внешней среды изменяется с течением времени.

Возвращаясь к теории систем Лумана следует отметить, что аутопойезис является связующим звеном между теорией систем, теорией коммуникации и теорией эволюции. В связи с этим за рубежом выделяют класс аутопойетических систем, числу которых можно отнести СТС.

Характеристика СТС

Для сложных технических систем можно выделить определенные принципы и определенные характеристики. В основе функционирования современных СТС положены следующие системные принципы:

- принцип эмерджентности [18], который означает несводимость свойств СТС к сумме свойств составляющих ее блоков;
- принцип функциональной принадлежности каждого элемента к компоненту системы;
- принцип структурного описания системы в виде блоков;
- принцип реактивной связи СТС с воздействиями среды.

Сложная техническая система характеризуется зависимостью от когнитивного фактора.

Все блоки СТС являются управляемыми на основе собственного или внешнего интеллекта. Каждый блок системы может осуществлять информационное взаимодействие с другими, связанными с ним блоками. Каждый блок системы способен к развитию или саморазвитию. Кроме того, через каждый блок возможно воздействие на другие, связанные с ним блоки. Информационный обмен между блоками может содержать неопределенность. Вследствие этого между блоками с течением времени может накапливаться информационная асимметрия и нарушаться информационное соответствие. Наличие блоков с интеллектом обеспечивает адаптивность СТС и ее аутопойезис. Функционирование СТС протекает при возможном противодействии внешней среды. В связи с этим в СТС формируются функции противодействия внешней среде.

СТС имеет следующие основные свойства: адаптивность, ресурсность, возможность самоорганизации, устойчивость, организованность, интеллект, целостность.

Свойство адаптивности означает, что СТС и ее блоки могут находиться во множестве состояний. Состояние СТС характеризуется суммой энтропий боков и внутри блоковых энтропий. Самоорганизация СТС выражается в ее способности изменять свои свойства и возвращаться в устойчивое состояние при выходе из него под внешними воздействиями.

Целостность СТС выражается в ее способности сохранять свои системные свойства. Формальное описание сложной организационно-технической системы основывается на применяемом формализме описания и группах информационных единиц, которые служат таким языком.

В качестве элементов носителей ресурсов СТС могут рассматриваться блоки, комплементарные между собой. Комплементарность блоков и информационных ресурсов – одна из отличительных особенностей СТС. Важными для анализа и управления СТС являются ее информационная ситуация и информационная позиция.

Заключение

Сложные технические системы являются этапом в развитии сложных систем и ближе относятся к области «больших данных», «больших графов», «больших сетей», чем к области общей теории

систем. Автор не согласен с точкой зрения ряда авторов [19], согласно которой сложные системы являются «подмножеством» общей теории систем. По мнению автора для описания современных сложных систем и сложных технических систем должна быть написана теория сложных систем, которая качественно отличается от общей теории систем. Примером различия является понятие редукции. В общей теории систем редукция это механизм упрощения модели или системы как замкнутой системы. В теории сложных социальных систем редукция это механизм уменьшения внешних воздействий на систему как на открытую систему. Для теории сложных систем применимы принципы рефлексии и самореференции, коммуникации и дифференциации, которые в теории систем отсутствуют как таковые. Наконец для теории сложных систем применимо понятие и принцип аутопойезиса, который в теории систем представлен неявно и больше выражен в синергетической теории. В целом теория сложных систем ожидает дальнейшего анализа и развития. Сложные технические системы являются разновидностью систем, которые попадают в теорию сложных систем.

Список литературы

1. *Bar-Yam, Yaneer* (2002). «General Features of Complex Systems» (PDF). Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS UNESCO Publishers, Oxford, UK. Retrieved 16 September 2014.
2. *Цветков В.Я.* Сложные технические системы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 10-4. – С. 670–670.
3. *Кудж С.А.* Многоаспектность рассмотрения сложных систем // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 1. – С 38–43.
4. *Берталанфи фон Л.* Общая теория систем – критический обзор. / В кн. Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
5. *Месарович М., Такахара Н.* Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
6. *Савиных В.* Системность в диссертационных исследованиях // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. – №2 (10). – С. 92–98.
7. *Монахов С.В., Савиных В.П., Цветков В.Я.* Методология анализа и проектирования сложных информационных систем. – М.: Просвещение, 2005. – 264 с.
8. *Бутко Е.Я.* Системный подход в формировании структуры // Славянский форум. – 2017. – 2(16). – С. 25–31.
9. *Цветков В.Я.* Структурное моделирование: монография. – М.: МАКС Пресс, 2017. – 84 с. ISBN 978-5-317-05518-9.
10. *Коломейченко, М.И., Чеповский А.М.* Визуализация и анализ графов больших размеров // Бизнес-информатика. – 2014. – № 4(30). – С. 7–16.
11. *Цветков В.Я.* Ресурсность и интегративность сложной организационно технической системы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5-4. – С. 676–676.
12. *Борисенко В.В., Лахно А.П., Чеповский А.М.* Специальное представление графов и визуализация семантических сетей. // Фундаментальная и прикладная математика. – 2010. – Т. 16. – № 8. – С. 27–35.
13. *Гольдштейн А.Б., Пожарский Н. А., Лихачев Д.А.* О когнитивных картах в управлении телекоммуникационным оператором. // Информатизация и связь. – 2016. – №1. – С.11–15.
14. *Niklas Luhmann* systemtheorie, Evolutionstheorie und Kommunikations theorie // Soziologische Gids. – 1975. – 22 3. – Pp. 154–168.
15. *Луман Н.* Введение в системную теорию. – Логос, 2007. – 360 с. ISBN 5-8163-0076-8.
16. *Niklas Luhmann.* Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie, Frankfurt: Suhrkamp, 1984. (English translation: Social Systems, Stanford: Stanford University Press. – 1995.
17. *Цветков В.Я.* Информационное соответствие // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №1. – Ч. 3. – С. 454–455.
18. *Цветков В.Я.* Эмерджентизм // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 2-1. – С. 137–138.
19. *Bar-Yam, Yaneer* (2002). «General Features of Complex Systems»(PDF). Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS UNESCO Publishers, Oxford, UK. Retrieved 16 September 2014.

COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Tsvetkov V.Ya.

*Professor, Doctor of Technical Sciences. Center for strategic analysis and development, the deputy head.
Research and Design Institute of design information, automation and communication on railway transport
Moscow, Russia
e-mail: cvj2@mail.ru*

The article analyzes a complex technical system. Paper examines the concept of a complex technical system. Paper shows that in the modern understanding, a complex technical system is an information technology system. The article compares a complex system and network. Paper describes the similarity and difference between a complex technical system and a network. Paper describes the autopoiesis of a complex technical system. Paper describes aspects of the theory of social systems of Luhmann in relation to a complex technical system. Paper describes the acceptability of Luhmann's theory to describe a complex technical system. Paper describes the principles and properties of a complex technical system. The article proves that the general theory of systems is not suitable for a complete description of complex systems. The article proves that a new theory of complex systems is needed to describe complex technical systems.

Keywords: Complexity, complex technical system, autopoiesis, network system, system blocks, entropy