

Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий



А.О. Жуков

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Часть 1

Философско-методологические аспекты

Учебное пособие

Москва
ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)
2022

УДК 303.732
ББК 32.965я73
Ж85

Допущено Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве учебного пособия для курсантов, студентов и слушателей образовательных организаций МЧС России.

Рецензенты:

В. А. Акимов — д. т. н., проф. (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ))

В. Н. Липский — д. филос. н., проф. (Академия ГПС МЧС России)

Р. А. Дурнев — д. т. н., доц. (РАРАН)

Жуков А. О.

Ж85 Системный анализ. Часть 1. Философско-методологические аспекты: Учебное пособие / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. 168 с.

ISBN 978-5-93970-266-9

Учебное пособие подготовлено на основе курса лекций, разработанных и прочитанных автором в соответствии с рабочей программой дисциплины «Системный анализ» (72 часа), аспирантам, обучающимся в аспирантуре ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) по направлению подготовки 56.06.01 «Военные науки», профилю подготовки 20.02.24 «Гражданская оборона. Местная оборона»; по направлению подготовки 20.06.01 «Техносферная безопасность», профилю подготовки 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях», в двух частях.

Учебное пособие может быть использовано при подготовке кадров высшей квалификации, обучающихся по различным формам и направлениям подготовки магистратуры и аспирантуры, а также по многим специальностям специалитета.

В части 1 учебного пособия излагаются основы системного анализа в контексте философско-методологических аспектов как одной из его важнейших составляющих. Раскрывается понятийно-категориальный аппарат системного анализа, рассматриваются наиболее важные составляющие системного мышления, обсуждаются базовые принципы и свойства системной методологии.

УДК 303.732
ББК 32.965я73

ISBN 978-5-93970-266-9

© А.О. Жуков, 2022

© МЧС России, 2022

© ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА КАК ОБЩЕНАУЧНОЙ МЕТОДОЛОГИИ РЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ПРОБЛЕМ	
1.1. Системный анализ и смежные научные дисциплины	10
1.2. Система как фундаментальная категория системного анализа	14
1.3. Фундаментальные научные предпосылки формирования идей системности и системного мышления	22
1.4. Основные этапы развития системного анализа как универсальной прикладной научной методологии	24
Контрольные вопросы	36
Литература	36
2. СЛОЖНОСТЬ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ КАТЕГОРИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	
2.1. Многогранность категории «сложность»	37
2.2. Понятие спектра сложности	43
2.3. Понятие энтропии	47
2.4. Принцип несовместимости и принцип рациональности	49
2.5. Подходы к оценке сложности систем	54
2.6. Трансвычислительная сложность	57
2.7. Основные классы алгоритмической сложности	60
2.8. Пути преодоления трансвычислительной сложности	67
Контрольные вопросы	71
Литература	72
3. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК ПРИКЛАДНАЯ НАУЧНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ	
3.1. Системность как всеобщее свойство реальности	73
3.2. Подходы к классификации систем и их математических моделей	76
3.3. Некоторые общие системные свойства	78
3.4. Системный взгляд на объект исследования	80
3.5. Краткая характеристика системного мышления	82
3.6. Трансдисциплинарность системного анализа	91
3.7. Основные отличия задач системного анализа от задач традиционных научных дисциплин	93
3.8. Системный анализ как общенаучная методология	67

Контрольные вопросы	99
Литература	100
4. НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	
4.1. Объект научного познания как философская категория	101
4.2. Уточнение традиционного понимания понятия «объект» в системном анализе	101
4.3. Классификация объектов по Дж. Клиру	104
4.4. Система как объект моделирования	105
4.5. Подход Дж. Клира к моделированию систем	111
4.6. Кибернетический подход к моделированию сложных открытых систем в форме «чёрного ящика»	113
4.7. Целенаправленные и целеустремлённые системы	119
4.8. Проблема выбора границы системы	122
Контрольные вопросы	124
Литература	125
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ, СВОЙСТВА И БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОЙ МЕТОДОЛОГИИ	
5.1. Понятие системной задачи	126
5.2. Основные свойства системной методологии	131
5.3. Основные принципы системной методологии и их практическая реализация	132
5.4. Краткий обзор методов системного анализа	139
Контрольные вопросы	150
Литература	151
6. СИСТЕМНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСНОВНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР В КОНЦЕПТУАЛЬНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ	
6.1. Первое концептуально-функциональное пространство	152
6.2. Пространство условий функционирования системы	155
6.3. Пространство свойств системы	156
6.4. Основные аналитические процедуры в концептуально- функциональных пространствах	157
Контрольные вопросы	162
Литература	162
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	165

Введение

В процессе научно-технического развития цивилизации, постепенного накопления, обобщения знаний и практического опыта в различных теоретических и прикладных научных дисциплинах и сферах практической деятельности человека ещё в XX веке была осознана высочайшая сложность системной организации реальности. Фундаментальные научные открытия, в частности учение Вернадского о ноосфере, достижения квантовой механики, астрофизики, молекулярной генетики, информатики и другие, подтвердили теснейшую взаимосвязь процессов развития техносферы и биосферы, а также тот факт, что все эти процессы неразрывно связаны не только между собой, но и являются лишь малой частью единого процесса эволюции глобальной суперсистемы, которую общепринято называть Вселенной.

В процессе эволюционного развития реальность неизбежно усложняется. Тенденция роста сложности проявляется на всех уровнях системной организации материи как объективной реальности. В этот процесс неизбежно вовлекаются развитие науки и высоких технологий, а также все остальные сферы жизни и деятельности человека, в частности его субъективная реальность.

Более того, в последнее время наблюдается существенное ускорение темпов роста сложности. Ярким свидетельством тому являются значительные успехи в освоении космоса, развитие биомедицинских наук, создание искусственного интеллекта, нейрокомпьютеров и так далее.

Так или иначе, но ещё с середины XX века в технике, экономике, медицине, экологии и других сферах практической деятельности человека возникают сложные прикладные задачи, имеющие комплексный, междисциплинарный характер. К ним относятся, в частности, создание и управление сложными техническими и экономико-организационными системами, комплексная оптимизация и повышение эффективности их функционирования, обеспечение комплексной безопасности стратегически важных объектов инфраструктуры в мирное и военное время и ряд других актуальных системных проблем.

Успешное решение сложных прикладных системных задач принципиально невозможно в узких рамках отдельных традиционных научных дисциплин, так как предполагает согласованное взаимодействие специалистов разных предметных областей современной науки, раскрытие множества факторов неопределённости и рисков, которые также неизбежно возрастают в силу усложнения реальности.

Сложный междисциплинарный характер прикладных системных проблем требовал создания адекватного им нового системного подхода, основанного на целостном, то есть комплексном представлении об объекте исследования как о сложной многоуровневой иерархической системе, активно взаимодействующей с внешней средой в разных режимах функционирования, на разных стадиях жизненного цикла, в условиях действия множества противоречивых целей, факторов неопределённости и рисков реализации угроз различного характера, в частности чрезвычайных ситуаций, стихийных бедствий и катастроф.

Междисциплинарные системные исследования актуализируют практическую необходимость разработки приёмов, принципов, методов целостного анализа разных по своей природе объектов, причём не только с позиции общности типов объектов и их свойств, но также с позиции общности типов отношений между объектами. В частности, ещё Людвиг фон Берталанфи обратил внимание на так называемый изоморфизм математических моделей, позволяющий описывать системы разной природы одинаковыми по форме уравнениями.

На основе этих и ряда других идей постепенно сформировались контуры общей теории систем, ставшей вскоре фундаментом новой научной дисциплины – системного анализа, как активно развивающейся и до сих пор находящейся в процессе становления общенаучной методологии исследования сложных систем разной природы и решения сложных междисциплинарных проблем в условиях действия множества противоречивых целей, факторов неопределённости и рисков.

Системный анализ как наука связан с целостным исследованием сложных систем разной природы и решением сложных междисциплинарных проблем (системных задач) моделирования, управления, прогнозирования, оптимизации и др.

Таким образом, в отличие от традиционных научных дисциплин, предоставляющих исследователю лишь частную картину отдельных аспектов исследуемого объекта, системный анализ позволяет

исследовать объект как бы «сверху», что обеспечивает целостное представление об объекте исследования с позиции достижения целей, преследуемых аналитиком в процессе решения прикладной системной задачи.

Вполне подходящей метафорой, проясняющей смысл данного утверждения, является полёт на самолёте: поднимаясь в воздух, человек обретает возможность увидеть местность и её ландшафт целиком и сформировать в результате полёта целостное представление о местности, прежде недоступное его сознанию в принципе.

Аналогично и в науке, применение системного анализа позволяет исследователям увидеть целостность в сложном хитросплетении многомерного разнообразия систем разной природы, постепенно выстраивать качественно новую, более целостную, картину мира, и, как следствие, получать качественно новые результаты исследований, принципиально недостижимые путём применения разрозненных мозаичных знаний лишь отдельных традиционных научных дисциплин и их простой совокупности, что особенно важно в междисциплинарных исследованиях.

Во избежание возможных недоразумений, связанных с буквальным пониманием смысла слов, отметим следующие базовые понятия предмета.

Анализ – это декомпозиция, то есть разложение целого на части. В методологии науки анализу противопоставляется **синтез**, то есть агрегирование частей в единое целое.

Вместе с тем нельзя ставить знак равенства между такими словосочетаниями, как «системный анализ» и «анализ систем», то есть нельзя редуцировать системный анализ в буквальном смысле к анализу систем.

Системный анализ означает **целостный** анализ объекта (системы) с позиции достижения поставленных **целей** исследования в заданных **условиях** (с учётом имеющихся ресурсных ограничений и действующих факторов неопределённости и рисков, актуальных для конкретной стадии жизненного цикла объекта и конкретного состояния окружающей среды, в которой функционирует объект).

Системный анализ не является окончательно сформированной научной дисциплиной, а находится в процессе развития, что обусловлено

широким разнообразием систем разной природы, многообразием, сложностью и новизной многих прикладных системных проблем.

Движущей силой такого развития является диалектическое противоречие между сложностью возникающих в практической деятельности человека новых системных задач и недостаточно эффективным текущим уровнем развития методологии системных исследований для их решения.

Сложность прикладных системных задач определяют такие факторы, как:

- конфликт противоречивых целей;
- ограниченные ресурсы;
- неопределённость и риски;
- лишь частичная формализуемость;
- решение сопряжено с обработкой очень большого количества информации, нередко превышающего предел Бремермана.

Объект исследования системного анализа – сложные системы разной природы и сложные прикладные проблемы (междисциплинарные прикладные системные задачи).

Предмет исследования системного анализа – подходы, приёмы, принципы, методы рационального упрощения повышенной сложности описания (моделирования) систем и решения системных задач.

Миссия системного анализа – достижение целостного представления объекта и системных задач с точки зрения целей исследования.

В отличие от традиционных учебных дисциплин системный анализ не канонизирован, находится в процессе постоянного развития и совершенствования; по многим, в том числе основополагающим, понятиям и категориям системного анализа продолжается научная дискуссия с целью их уточнения. Множество методов системного анализа слишком широкое и не может быть чётко ограничено (очерчено чёткими рамками). Поэтому в рамках данного курса мы вынуждены ограничиться рассмотрением научно-философских основ системной методологии и простейших, но в то же время фундаментальных аспектов математических методов прикладного системного анализа.

Цель курса «Системный анализ» – помочь аспирантам сформировать основные, наиболее общие трансдисциплинарные представления о сложных системах разной природы, подходах к их моделированию и соответствующих сложных междисциплинарных проблемах, то есть

системных задачах, неизбежно возникающих в процессах управления, прогнозирования, оптимизации и принятия решений в сложных проблемных ситуациях, характеризующихся конфликтом множества противоречивых целей, ограниченностью ресурсов, а также многофакторной неопределённостью и рисками.

В первой части курса рассматриваются наиболее актуальные философско-методологические аспекты системного анализа. Данный курс способствует развитию навыков системного мышления и, как следствие, формированию более целостной картины мира, то есть более целостного представления об исследуемых проблемах, которое позволяет подходить к рациональному упрощению и решению сложных системных задач с позиции принципа целостности как наиболее основного принципа системного анализа.

1. Основные этапы развития системного анализа как общенаучной методологии решения сложных междисциплинарных проблем

1.1. Системный анализ и смежные научные дисциплины

Системный анализ как научная дисциплина связан с комплексным исследованием и решением сложных, как правило, междисциплинарных, проблем разной природы, в частности, с исследованием, моделированием, прогнозированием, управлением, проектированием и оптимизацией сложных систем разной природы.

К сожалению, в последние 10 лет наметилась и всё ярче наблюдается тенденция многих работодателей и специалистов узких предметных областей к ошибочному, редуцированному пониманию системного анализа исключительно как отрасли ИТ.

Действительно, существует целый ряд профессий, иллюстрирующих широкие возможности применения системного анализа в сфере ИТ, на что указывают, например, следующие распространённые профессии:

- системный программист;
- системный администратор;
- бизнес-аналитик;
- аналитик баз данных;
- web-аналитик.

На самом же деле сфера применения системного анализа гораздо шире и не сводится только к ИТ, которые являются лишь одной из сфер приложения системного анализа и которые, строго говоря, лишь предоставляют прикладным системным аналитикам инструментальные возможности многофакторного компьютерного моделирования при решении сложных прикладных проблем, связанных, в частности, с принятием решений и научным обоснованием рациональности, то есть практической целесообразности выбора приемлемого по сложности решения и дальнейшей реализации выбранного решения в условиях

имеющихся ресурсных ограничений (материальных, финансовых, временных и других), конфликта противоречивых целей, а также действия множества других факторов неопределённости и риска.

В частности, такие проблемы возникают в научно-исследовательской, проектно-конструкторской деятельности, а также в сфере обеспечения комплексной безопасности населения и территории Российской Федерации, потенциально опасных и критически важных объектов техносферы.

Примеры. Космический мониторинг, экологический мониторинг и другие прикладные научные задачи требуют комплексного, системно-согласованного участия специалистов разных направлений деятельности.

Таким образом, прикладные задачи системного анализа характеризуются повышенной сложностью, обусловленной, в частности, междисциплинарным характером системных исследований.

В развитии системного анализа принимают участие специалисты самых разных научных направлений.

Философы науки, методологи – в части, касающейся развития методологии проведения наукоёмких системных исследований.

Математики различных специализаций разрабатывают теоретические положения теории систем и прикладные аналитические модели, создаваемые в целях исследования, оптимизации, управления, прогнозирования, принятия решений в сложных системах, актуальных в государственном управлении, обороне, технике, экономике и других сферах практической деятельности человека.

В частности, при решении системных задач наиболее актуальными являются методы следующих математических дисциплин:

- дифференциальные и разностные уравнения (моделирование динамики сложных систем разной природы);
- теория вероятностей и математическая статистика (методы стохастического моделирования);
- кибернетика (теория управления сложными системами разной природы);
- теория принятия решений (прикладные методы оптимизации, исследование операций, математическое программирование – в смысле оптимального планирования);
- теория графов и сетей (моделирование потоков на графах и другие сложные прикладные задачи).

Физики развивают термодинамические принципы, имеющие важное значение в теории систем, в частности разделение динамических систем на два класса – консервативные и диссипативные, закон сохранения энергии (для консервативных систем), второе начало термодинамики и так далее.

Прикладные физики, конструкторы и инженеры принимают активное участие в создании новых систем, то есть решают изобретательские задачи системного синтеза.

Программисты и специалисты по компьютерному моделированию проводят вычислительные эксперименты с математическими моделями, а также развивают концептуальное моделирование (технологии UML, ARIS и др.), динамическое многофакторное имитационное моделирование (Anylogic и др.), что особенно востребовано в задачах бизнес-анализа (реинжиниринг предприятий и т.д.).

Специалисты различных естественных наук, в частности, химии, биологи и другие, также принимают участие, обобщая и привнося в системный анализ знания о специфических частных системных закономерностях.

Однако наиболее важными фундаментальными аспектами системного анализа являются философско-методологический и математический (рис. 1).

Помимо системного анализа, конечно, существует целый ряд смежных дисциплин, внешне похожих на системный анализ, например: классическая оптимизация, исследование операций, теория принятия решений, теория игр, теория оптимального управления и другие. В связи с этим вполне закономерно возникает вопрос о необходимости применения новой дисциплины – системного анализа.

Дело в том, что задачи указанных традиционных смежных дисциплин, связанные с выбором наилучшей (оптимальной) в некотором смысле альтернативы в заданных условиях, как правило, полностью формализованы в виде конкретных математических моделей, заданных исследователю полностью. В этих моделях представлена полностью вся исходная информация, описывающая цель решения задачи, параметры альтернатив, действующие ресурсные ограничения и так далее.

В то же время прикладные задачи системного анализа, обладая повышенной сложностью, обусловленной их междисциплинарным характером и рядом других факторов, как правило, допускают в принципе

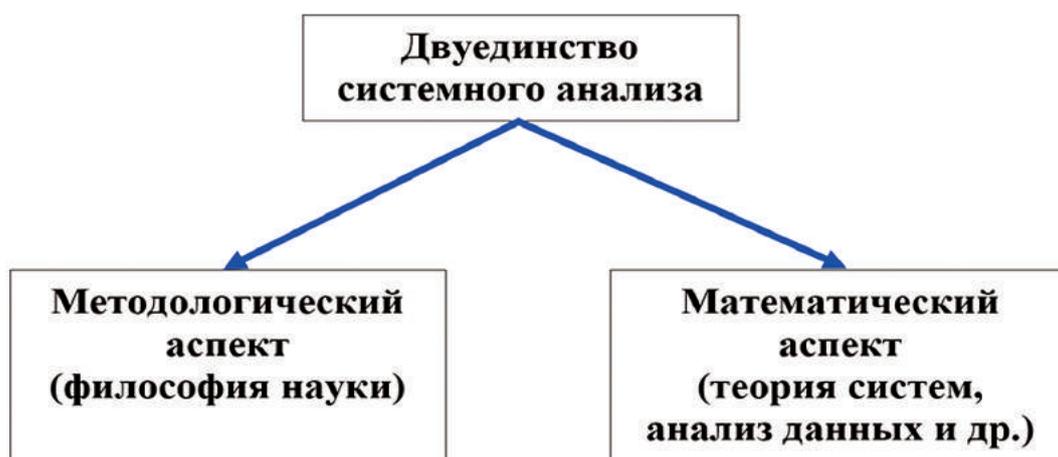


Рис. 1. Фундаментальные составляющие системного анализа

лишь частичную формализацию. Например, процедура формирования целевых критериев оптимальности, то есть показателей эффективности принимаемых решений (выбираемых альтернатив), и процедура определения перечня параметров альтернатив, определяющих значения этих критериев, во многих сложных прикладных задачах принятия решений нередко являются субъективными и, как следствие, не формализуемыми в принципе.

Так, проблема защиты стратегически важного объекта, рассматриваемая в условиях военного времени, обладает рядом особенностей.

Во-первых, для эффективного (надёжного) решения данной задачи необходимо собрать, обобщить и структурировать большие информационные массивы исходных неструктурированных данных разной природы.

Во-вторых, на разработку и принятие наилучшего решения, безусловно, требуется время. Однако неизбежно остаётся всё меньше времени до момента принятия и практической реализации принятого решения. Так, в условиях военного времени объект может быть разрушен противником и тогда решение задачи его защиты утрачивает всякий смысл.

Более того, обработка чрезмерного количества информации истощает психические и физические ресурсы лица, принимающего решения (далее – ЛПР).

В силу ограниченности времени принятия решения, выбор менее обоснованного и худшего, но, тем не менее, рационального, то есть целесообразного, с практической точки зрения, решения, часто в конкретной ситуации даёт гораздо лучший результат, чем поиск и реализация оптимального решения.

Кроме того, в процессе поиска рационального решения сложных проблемных ситуаций (системных задач) математические модели, описывающие формализуемые подзадачи исходной задачи, как правило, уточняются и трансформируются, так как поступает новая информация, динамически изменяется обстановка, переключаются режимы функционирования и стадии жизненного цикла объекта (системы), меняются условия внешней среды и так далее.

Необходимость же корректировать модели принятия решений в задачах традиционных дисциплин не возникает в принципе.

Таким образом, в силу повышенной сложности, многие проблемные ситуации принятия решений в реальной жизни обладают характерными свойствами сложных систем и, как следствие, не вписываются в узкие рамки формальных моделей традиционных задач, исследуемых в рамках этих дисциплин. А рациональное, то есть практически целесообразное, решение сложных прикладных системных задач в принципе невозможно без привлечения целостного, то есть системного, подхода, на основе которого строится системный анализ, что и обуславливает практическую необходимость изучения данной научной дисциплины.

Хотя основные фундаментальные понятия, категории и основополагающие принципы системного анализа как междисциплинарной методологии в наиболее общих чертах сформировались ещё во II половине XX века, однако, вплоть до настоящего времени, системный анализ находится в процессе дальнейшего развития и уточнения содержания известных понятий и категорий.

Это касается и понятия «система», которое является центральной категорией системного анализа.

1.2. Система как фундаментальная категория системного анализа

В философии науки, которую не следует путать с наукой философией и донаучной философией, термин «категория» обозначает универсальное, всеобщее понятие.

И для системного анализа первичная фундаментальная категория обозначается научным термином «Система».

Реальность характеризуется сложным бесконечным разнообразием систем разной природы, что не позволяет дать чёткое исчерпывающее

определение понятию «система» как фундаментальной категории теории систем и системного анализа. Кроме того, как отмечали многие исследователи, мир не делится на отдельные системы и среду.

Поэтому, строго говоря, термин «система» следует рассматривать как базовое неопределяемое понятие системного анализа, подобно тому, как точка, прямая и плоскость являются базовыми неопределяемыми понятиями в геометрии, пространство и время – в физике, и т.п.

Тем не менее, в результате богатого опыта, накопленного человечеством в процессе поиска путей решения сложных междисциплинарных теоретических и прикладных системных проблем, к настоящему времени в современной науке о системах сформировался ряд представлений, которые вполне обоснованно можно считать характеристическими признаками любой системы.

В соответствии с современными научными представлениями термин «система» является многоаспектной научной категорией.

Выделим три наиболее важных аспекта.

Аспект 1. Любая система есть **целостная часть реальности**, выделяемая человеком (учёным, аналитиком, исследователем) из реальности и рассматриваемая им как единое целое в соответствии с **целями**, определяемыми принципом рациональности, практической целесообразности и субъективным замыслом решения конкретной системной задачи.

При этом целостная Вселенная не делится на системы и среду. Поэтому границы системы на практике всегда устанавливаются в соответствии с целями, стоящими перед исследователем в контексте поставленной задачи.

Аспект 2. Каждая система характеризуется наличием **структурной связанности**.

Структура системы представляет собой множество частей (структурных компонент системы), то есть подсистем и элементов, образующих систему, выделенных и рассматриваемых исследователем совместно с множеством взаимосвязей, взаимодействий, взаимовлияний между структурными компонентами.

Таким образом, структура системы декомпозируется на подсистемы, взаимодействующие между собой, в составе целостной структуры исследуемой системы.

Декомпозиция позволяет упростить анализ исследуемой системы. Забегая вперёд, отметим, что декомпозиция одной и той же системы может быть выполнена по-разному, в зависимости от целей системного

анализа и других субъективных факторов, определяющих характер взаимодействия человека с объектом исследования.

Однако наиболее общая рекомендация для проведения процедуры (процесса) системной декомпозиции состоит в расщеплении системы по наиболее слабым связям.

Подсистема представляет собой структурную часть системы, обладающую относительной автономностью и всеми аспектами, позволяющими аналитику характеризовать эту часть как систему.

Пример. Функциональные и территориальные подсистемы РСЧС.

Элемент является подсистемой атомарного, то есть **условно** неделимого типа, декомпозиция которой невозможна либо нецелесообразна, то есть бессмысленна с практической точки зрения, обусловленной **целями** системного анализа конкретной прикладной проблемы. Однако надо понимать, что в данном определении речь идёт лишь об условной неделимости элементов, поскольку в реальности декомпозиция элементов, как и атомов, теоретически возможна до бесконечности.

Агрегирование есть процесс, обратный по отношению к декомпозиции. При агрегировании подсистем создаётся новая система, которую, по аналогии с термином «подсистема», называют **надсистемой** либо **суперсистемой**.

Если принять соглашение о том, что каждая система является подсистемой самой себя, то декомпозиция системы формально порождает бинарное отношение **теоретико-системного включения**^{*}, обозначаемого символом « \preceq » и обладающего тремя фундаментальными свойствами нестрогого порядка: рефлексивностью, антисимметричностью и транзитивностью. Математически эти свойства записываются, соответственно, следующим образом.

Рефлексивность означает, что каждая система S_A является подсистемой для самой себя:

$$(S_A \preceq S_A). \quad (1)$$

Антисимметричность означает тот факт, что, если система S_A является подсистемой для системы S_B , которая, в свою очередь, является

* Термин предложен автором.

подсистемой для системы S_A , то обе эти системы представляют одну и ту же систему, то есть совпадают:

$$\left((S_A \preceq S_B) \wedge (S_B \preceq S_A) \right) \Rightarrow (S_A = S_B). \quad (2)$$

Транзитивность означает тот факт, что, если система S_A является подсистемой для системы S_B , которая, в свою очередь, является подсистемой для системы S_C , то система S_A является подсистемой для системы S_C , то есть:

$$\left((S_A \preceq S_B) \wedge (S_B \preceq S_C) \right) \Rightarrow (S_A \preceq S_C). \quad (3)$$

В окружающем нас мире существует огромное разнообразие самых разных структур.

Простейшей является **линейная структура**. В качестве примера можно рассмотреть поезд, состоящий из сцепленных друг за другом вагонов. Другим примером линейной структуры являются слова того или иного языка, представляющие линейно упорядоченную последовательность букв, то есть символов соответствующего алфавита. В частности, линейная структура является первичной для каждой из двух полинуклеотидных цепей молекулы ДНК либо для полипептидных цепей белковых молекул.

Нелинейные структуры гораздо более разнообразны. В частности, топологическая, то есть пространственная, структура молекулярных и супрамолекулярных систем является нелинейной.

Наглядными примерами таких структур являются: летальный фактор токсина сибирской язвы (рис. 2), фермент гиразы (рис. 3), а также ряд других супрамолекулярных систем.

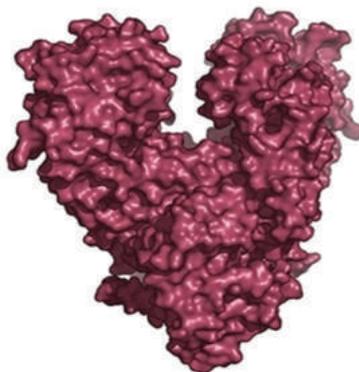


Рис. 2. Летальный фактор токсина сибирской язвы

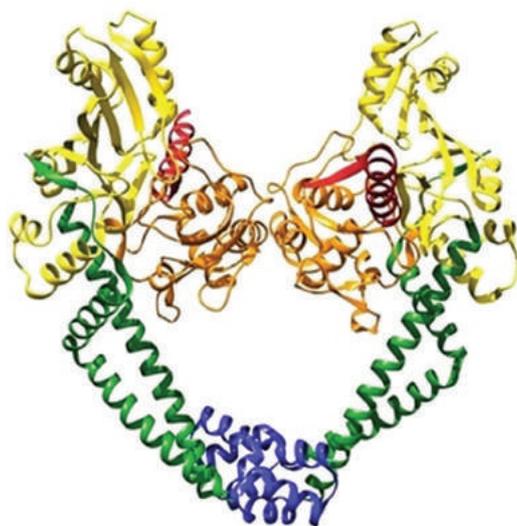


Рис. 3. Фермент «гираза»

В других сферах жизни нелинейные структуры также распространены. Например, к таким структурам относится матричная структура того или иного предприятия.

В кибернетике, то есть теории управления сложными системами разной природы, важную роль играют системы, структура которых содержит **обратные связи**, обеспечивающие замкнутый контур управления.

В системном анализе наиболее важное прикладное значение играют древовидные, особенно **многоуровневые иерархические структуры**, а также **сетевые структуры с обратной связью**.

Пример. Система государственного управления во многих странах мира имеет многоуровневую иерархическую структуру.

Пример. Организм человека – сложная система, в иерархической структуре которой выделяют следующие иерархические уровни:

- уровень целостного организма;
- уровень систем органов;
- уровень органов;
- уровень тканей;
- уровень клеток;
- уровень молекул.

Сложность (качественное разнообразие структур и функций) головного мозга существенно превышает сложность органов, работу которых он координирует.

Примечание. Интересно, что фактически мозг решает задачи управления, не имея при этом никакой математической модели объекта управления.

Пример. Дорожно-транспортные сети, торговые сети, интернет-сеть представляют собой примеры систем с сетевой структурой.

Пример. МЧС России является сложной системой.

Пример. Многие прикладные проблемы можно описать в виде формальной системы, обладающей многоуровневой иерархической структурой.

Структура же подавляющего числа сложных систем, как правило, является **комбинированной**, то есть объединяет в себе структуры разных типов.

Кроме того, наряду с **пространственной структурой** системы как объекта выделяют также **временную структуру** процессов, протекающих в системе.

Например, в медицине временная структура болезней характеризуется их стадиями.

Аспект 3. Люди, не знакомые с основами общей теории систем и системного анализа, как правило, рассматривают понятия «система» и «структура» как тождественные, то есть как синонимы.

Однако ещё Аристотель говорил о том, что **целое больше суммы своих частей**. Этот постулат является наиболее важным аспектом, позволяющим характеризовать исследуемый объект как систему.

Поэтому, в соответствии с современными системными представлениями понимание термина «система» исключительно как «структура» является слишком упрощённым, редуцированным и, строго говоря, методологически не верным.

Указанный постулат Аристотеля следует считать началом истории системного анализа. В современной научной формулировке постулат Аристотеля трансформировался в **принцип супераддитивности (эмерджентности)**, в соответствии с которым свойства целого не сводятся к совокупности свойств частей.

То есть система как единое целое, хотя и состоит из частей, но не сводится (не редуцируется) ни к отдельным частям, ни к их совокупности. Система обладает качественно новыми **системными** свойствами, которые называют **эмерджентными** (эмергентными) свойствами.

В литературе принцип супераддитивности называют также **системным эффектом**.

Пример. Самолёт как целостная система обладает эмерджентным свойством – способностью летать. Это свойство отсутствует как у

любой части, входящей в состав самолёта, так и у обычной совокупности, то есть множества этих частей.

Пример. МЧС России как система обладает важным эмерджентным свойством, которым не обладает ни одно из отдельно взятых структурных подразделений МЧС России (его подсистем), ни их простая совокупность, – способностью реализовывать государственную программу «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» (утв. постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 года № 300).

Пример. Любая чрезвычайная ситуация или катастрофа возникает, как правило, в результате системного взаимодействия и наложения различных причин (факторов), представляя таким образом яркий пример деструктивного проявления эмерджентного эффекта, что вполне соответствует смыслу английского слова *emergency*.

Отметим, что системный анализ чрезвычайных ситуаций и катастроф требует применения очень сложных разделов современной математики, в частности математической теории катастроф Арнольда и синергетики, то есть теории самоорганизующихся нелинейных систем. Поэтому моделирование и прогнозирование чрезвычайных ситуаций и катастроф является сложной системной задачей.

Следует понимать, что эти качественно новые системные свойства возникают не из «неоткуда», а лишь благодаря межсистемным связям, системно согласованному взаимодействию и взаимовлиянию частей друг на друга. Такое системно согласованное взаимодействие частей в структуре системы называют **синергией**.

В частности, целенаправленное поведение сложных систем возникает благодаря системно согласованному взаимодействию подсистем. В организационных системах, таких как МЧС России, целенаправленное поведение обеспечивает успешное решение поставленных задач.

Супераддитивность (эмерджентность, синергия, системный эффект) часто проявляется в химии, искусстве, экономике, науке, технике и других сферах практической деятельности человека.

Особенно ярко выглядит проявление эмерджентности в биологических системах и процессах развития.

Интересно, что в таких системах взаимодействие частей, образующих систему, часто оказывается столь сложным, что объяснить процесс

формирования эмерджентных свойств оказывается весьма затруднительно или даже принципиально невозможно.

В частности, к таким не разрешённым до конца проблемам относится **психофизическая проблема**, формулировка которой отражает основной вопрос философии о первичности и вторичности материи (категория объективной реальности) и сознания (субъективной реальности бытия человека).

Супераддитивность находит самое разное практическое применение в изобретательской, проектно-конструкторской и инновационной деятельности человека, поскольку процесс создания систем, обладающих качественно новыми свойствами, как правило, реализуется путём агрегирования уже существующих систем.

Различают **положительную** и **отрицательную** эмерджентность.

Положительные эмерджентные свойства – это качественно новые свойства, возникающие при агрегировании частей в систему. Например, художественная выразительность музыкального произведения, состоящего из частей, связанных между собой во времени.

Отрицательные эмерджентные свойства – это свойства, которые исчезают при агрегировании частей в систему. Ярким примером является потеря некоторых химических свойств, которыми обладают отдельные атомы при объединении в молекулу.

Пример. Явление «дефект массы» в атомной физике.

Пример. Рассмотрим куб, построенный из шести тонких квадратных листов металла.

Если исследователя-аналитика интересует свойство «объём», то куб окажется для него системой, так как объём куба существенно превышает сумму объёмов листов, образующих грани куба, а значит объём является качественно новым свойством куба.

Если же исследователя интересуют такие свойства, как «масса» либо «площадь поверхности», то тот же куб будет для него лишь структурой, но не системой, так как эти свойства присущи и граням куба, то есть не являются качественно новыми.

Таким образом, следует обратить внимание, что в прикладных задачах ответ на вопрос о том, является ли конкретная структура системой или нет, во многом зависит от цели исследователя, а, точнее, от того важным или не важным для него является то или иное свойство в контексте решаемой системной задачи.

Разумеется, перечисленные три аспекта, определяющие категорию «система», не охватывают всего множества аспектов систем, выделяемых современными аналитиками. В частности, не приведены: функциональный аспект; целевой аспект; правила поведения элементов в структуре системы. Однако это ни в коей мере не умаляет общности изложения в силу того, что здесь выделен минимальный список аспектов, достаточный для того, чтобы объект можно было охарактеризовать как систему. Кроме того, функционирование системы, её цель и поведение определяются структурой и могут быть объяснены в терминах эмерджентных свойств.

Наряду с понятием «система» в литературе также встречается термин «сложная система».

Сложная система – это система, в составе которой можно выделить подсистемы, обладающие качественно-разнотипными свойствами.

Любая сложная система обладает многоуровневой иерархической структурой, состоящей из подсистем первого уровня, в структуре которых, в свою очередь, могут быть выделены подсистемы второго уровня и так далее, вплоть до подсистем нижнего уровня иерархии, то есть до элементов, условно считающихся неделимыми в контексте рассматриваемой исследователем-аналитиком системной задачи (проблемы).

Формально выделение подсистем в иерархической структуре системы возможно до бесконечности. Однако именно **рациональность**, то есть **практическая целесообразность**, является главным фактором, определяющим глубину иерархической декомпозиции исследуемой системы.

1.3. Фундаментальные научные предпосылки формирования идей системности и системного мышления

История системного анализа начинается с рассмотренного нами при определении категории «система» постулата Аристотеля: «Целое больше суммы своих частей».

Н.Н. Моисеев выделяет **три основные ступени** научного познания окружающего мира [1], ставшие основополагающими предпосылками развития идей системности и системного мышления:

1. Создание основ современной физики.
 2. Создание основ дарвинизма.
 3. Выявление единства всех эволюционных процессов.
- Рассмотрим кратко суть каждого из названных этапов.

Первая ступень – создание основ современной физики. В основе данного этапа развития научной мысли лежит **идея движения**, заимствованная из учений древнегреческих философов. Эта идея была строго математически формализована и нашла практическое применение в **ньютонической механике**.

Механическое движение – это процесс изменения во времени пространственных координат движущегося тела.

Благодаря фундаментальным физико-математическим открытиям И. Ньютона, Г. Галилея, М.В. Ломоносова, А. Пуанкаре, А. Эйнштейна идея движения была обобщена, став началом нового этапа в развитии естественных наук, а именно: заложив **основы многофакторного анализа состояния и развития эволюционных физических процессов и явлений**.

Таким образом, первая ступень развития науки послужила основой создания всей **современной техносферы**.

Вторая ступень – создание основ дарвинизма. Если прежде идея движения понималась в буквальном смысле этого слова как механическое движение тела в пространстве, то на данном этапе развития науки было реализовано **новое понимание идеи движения – как непрерывной изменчивости**, и эта идея была перенесена в область живой материи.

В свою очередь, были сформированы **качественно новые представления о развитии живой природы**. Важнейшей сутью этих представлений является **качественное изменение во времени свойств развивающихся систем, что принципиально отличает процессы развития от всех других динамических процессов**.

Кроме того, такие фундаментальные научные идеи в понимании эволюции, как наследственность, изменчивость и отбор, послужили основой современных научных представлений о закономерностях развития живого, сформировали исходный фундамент методологии биохимических и физиологических исследований, заложили **основы многофакторного анализа состояния и эволюционных процессов современной биосферы**.

Третья ступень – выявление единства всех эволюционных процессов. На рубеже XIX и XX веков В.И. Вернадский выявил и научно обосновал **системность** взаимосвязи различных эволюционных процессов **в масштабах Земли** (геофизических, геохимических, биологических и социальных), их **системную взаимосвязь и взаимозависимость от процессов Вселенной.**

В результате уже в 1920-х годах его система взглядов превратилась в стройное **«учение о ноосфере»**, в соответствии с которым все происходящие на Земле процессы являются всего лишь составляющей единого глобального процесса эволюции космоса и неотделимы от процессов Вселенной.

В связи с этим необходимо гармонизировать отношения, возникающие между человеком, техносферой и биосферой.

Таким образом, первые две ступени развития науки подготовили фундамент для третьей ступени – системного понимания явлений, происходящих на Земле, как составной части процессов эволюции Вселенной.

Основные утверждения и выводы учения В.И. Вернадского о ноосфере впервые ставят вопросы о системности процессов Вселенной, определяют потребность в системном осмыслении развития цивилизации и эволюции Земли, формулируют сложные, глобальные прикладные системные проблемы, такие как ограниченность ресурсов, глобальное изменение климата и так далее.

В связи с этим **созданное В.И. Вернадским учение о ноосфере вполне обоснованно можно считать первоисточником прикладного системного мышления.**

1.4. Основные этапы развития системного анализа как универсальной прикладной научной методологии

Системный подход в своём становлении и развитии прошёл длинный и сложный путь.

Следуя представлениям Згуровского М.З. и Панкратовой Н.Д. [2], ограничимся рассмотрением истории развития системного анализа, начиная с XX века, и выделим **четыре основных этапа** становления и

развития системного анализа как универсальной прикладной научной методологии:

1. Формирование теоретического базиса системного мышления (1900 – 1930).

2. Эмпирическое формирование системной методологии (1930–1945).

3. Синхронное развитие теории системного анализа и практики системных исследований (1945–1980).

4. Глобализация системной проблематики (1980 – по настоящее время).

Вместе с тем отметим, что глобальные события, произошедшие в мире в 2020-2022 годах, убедительно свидетельствуют о необходимости ограничения четвёртого этапа 2020 годом и формирования качественно нового, пятого этапа развития системного анализа, начинающегося ориентировочно с 2020 года и продолжающегося до настоящего времени.

Однако в силу неполной сформированности и отсутствия общепринятого названия пятого этапа охарактеризуем кратко лишь приведенные выше четыре этапа.

Этап 1. Формирование теоретического базиса системного мышления. Данный этап характеризуется независимым появлением разнесённых во времени публикаций философских и методологических идей, принципов, подходов, которые позднее стали основой нового научного направления, получившего название «системный анализ».

Наиболее важными являются следующие научные труды:

- Владимир Иванович Вернадский – «Учение о биосфере и её постепенном переходе в ноосферу»;

- Александр Александрович Богданов – «Всеобщая организационная наука, или тектология»;

- Людвиг фон Берталанфи – «Общая теория систем»;

- Норберт Винер – «Кибернетика или управление и связь в животном и машине»;

- Тадеуш Котарбинский – «Праксеология».

Важнейшая роль и прикладное значение фундаментальных работ Людвиг фон Берталанфи и Норберта Винера в становлении и развитии системного мышления общепризнаны в мире.

Интересно отметить, что в указанных работах авторы независимо друг от друга предложили **новую идею**, суть которой состоит в переходе к исследованию **общих свойств**, характерных для различных типов систем.

Причём **Людвиг фон Бергаланфи** научно обосновывает эту идею с позиции **общности** принципов построения и **структурных свойств** различных типов систем, в то время как **Норберт Винер** подходит к ней с позиции **общности** принципов и **свойств управления** различными типами сложных систем, в частности, биологических и технических систем.

Хотя оба эти подхода длительное время развивались независимо друг от друга, они имеют непосредственное, одинаково важное отношение к междисциплинарным системным исследованиям.

Пример. При разработке сложных технических систем одинаково важно создать рациональную многоуровневую иерархическую структуру изделия и обеспечить системно-согласованное управление как на стадии проектирования, производства, испытания изделия, так и на стадии рационального управления созданной системой в процессе её доработки и эксплуатации.

При этом задачу формирования структуры и внешнего облика изделия и задачу обоснования целей и функций управления требуется рассматривать в такой системной постановке, которая учитывает взаимосвязь, взаимозависимость и взаимодействие в замкнутой структуре целостного объекта исследования (рис. 4).

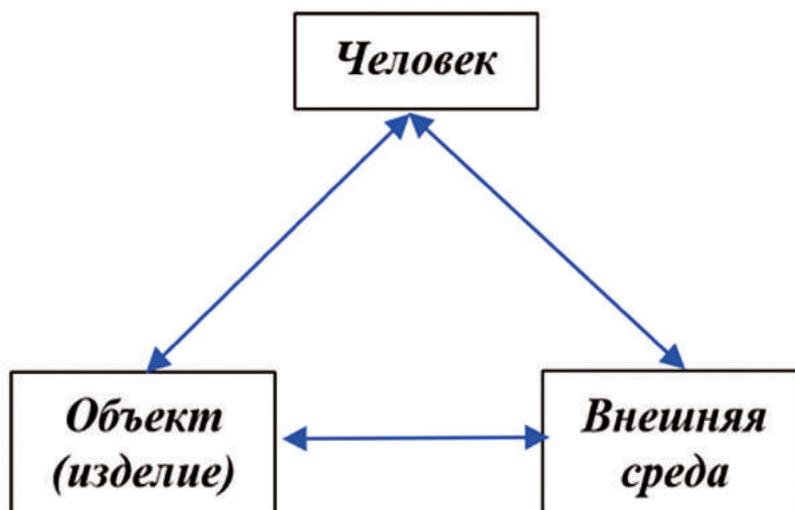


Рис. 4. Целостное представление объекта системных исследований

Теоретическая целесообразность и практическая необходимость формирования такой структуры обусловлены тем, что внешняя среда определяет условия эксплуатации изделия, в то время как человек является разработчиком, производителем и, наконец, пользователем изделия. Отсюда следует практическая необходимость системного согласования решения соответствующих задач на стадии концептуального (логического) проектирования изделия. Системная согласованность по целям, ресурсам, срокам и ожидаемым результатам должна обеспечиваться на основе взаимного, рационального компромисса противоречивых целей разработки изделия.

Таким образом, приведенное на рисунке целостное представление объекта системного исследования в полной мере соответствует идее В.И. Вернадского о системности взаимодействия, взаимосвязи и взаимозависимости процессов разной природы на Земле.

Выполненные независимо друг от друга, основополагающие исследования В.И. Вернадского, Людвиг фон Бергаланфи и Норберта Винера создали единую целостную идейную базу для формирования принципиально новой фундаментальной парадигмы в науке, концептуальная новизна которой заключается в переходе:

- от исследования конкретных свойств систем определённого типа (физических, химических, биологических, экономических, экологических и др.) к исследованию общих универсальных, свойств, инвариантных по отношению к природе системы;
- от исследования свойств и особенностей процессов определённого типа к исследованию структуры, свойств и особенностей взаимосвязи, взаимозависимости и взаимодействия качественно разнородных процессов;
- от исследования свойств отдельных систем определённого типа к исследованию свойств и структуры взаимосвязи, взаимозависимости и взаимодействия разнотипных систем.

Все эти аспекты новизны позднее в определённой степени были реализованы в форме основных принципов теории системного анализа, в связи с чем рассматриваемую парадигму можно характеризовать как **теоретическую парадигму системной методологии**.

Что же касается основных научных идей, изложенных в монографиях А.А. Богданова и Т. Котарбинского, то они также не были забыты и нашли своё практическое применение при решении системных проблем организационного управления и в других областях.

Этап 2. Эмпирическое формирование системной методологии.

Данный этап формировался в период чрезвычайных условий нарастающей военной угрозы 1930-х годов, и почти глобального театра боевых действий Второй мировой войны. В то время во многих странах актуальной стала необходимость оперативного решения сложнейших междисциплинарных задач повышения обороноспособности.

Этот этап характеризуется качественно новыми свойствами решаемых задач, таких как:

- стратегическая важность;
- концептуальная неопределённость, которая дополнялась таким важнейшим фактором, как неопределённость и непредсказуемость возможного активного противодействия противника;
- неструктурируемость;
- NP-сложность;
- высокая цена ошибочного или недостаточно обоснованного решения, соответствующего катастрофическим последствиям стратегического уровня;
- наличие неустранимого, априори неизвестного, порогового ограничения времени на цикл формирования и реализации стратегических решений, наличие которого может иметь катастрофические последствия государственного масштаба.

В свою очередь, указанные факторы определили следующие принципиально важные **особенности и условия решения системных задач**:

- необходимость обеспечения системной согласованности по целям, срокам и ожидаемым результатам процедур формализации и процедур решения междисциплинарных задач на всех стадиях жизненного цикла проектируемого изделия, в условиях наличия множества взаимосвязей, взаимозависимостей и взаимодействий качественно разнотипных факторов из качественно различных областей практической деятельности;
- обострение противоречий между необходимостью исследования большого количества факторов и требованием сокращения времени на формирование и реализацию решений на всех стадиях жизненного цикла изделия;
- резкое повышение величины риска принятия недостаточно обоснованных или ошибочных решений на различных стадиях жизненного цикла изделия.

Обмен опытом был исключён условиями военного времени. В сложившихся условиях возникла острая практическая потребность формирования системного инструментария, который позволил бы обеспечить возможность оперативного решения реальных системных задач государственной важности в практически приемлемые сроки с практически допустимой погрешностью, в условиях концептуальной неопределённости и повышенного риска.

Для реализации указанной возможности инструментарий должен был формироваться на основе системы взаимно согласованных по целям, срокам и ожидаемым результатам следующих множеств методологических средств:

- множества предположений, допущений, условий, подходов, приёмов и других средств формализации системных задач;
- множества показателей, критериев, приёмов и других средств оценивания качества и эффективности решения системных задач;
- множества подходов, методов, методик, алгоритмов, программ и других средств решения системных задач.

К сожалению, разработанные и апробированные на практике в отраслях военно-промышленного комплекса методологические средства решения сложнейших организационных и технических системных задач известны только узкому кругу специалистов. Условия военного времени исключали возможность открытых публикаций оригинальных теоретических результатов и научно-технических достижений. Поэтому накопленный в те годы опыт не стал достоянием широких масс специалистов и учёных различных отраслей науки и техники.

Вместе с тем определённый опыт системных аналитиков, основные идеи и принципы апробированных эмпирических средств в дальнейшем были обобщены в единый метод, получивший в дальнейшем название «**метод программно-целевого планирования**», который активно использовался при разработке государственных пятилетних планов, а также государственных и ведомственных целевых программ.

И сегодня мир, правительства государств и органы государственной власти, в том числе МЧС России, ориентируются на стратегическое планирование, основой которого являются: целеполагание, прогнозирование, планирование и программирование.

Этап 3. Синхронное развитие теории системного анализа и практики системных исследований. Этот период принципиально отличается

от предыдущих качественно новых задач принципиальными общественно-политическими изменениями в мире после окончания Второй мировой войны, уникальными научно-техническими достижениями.

В течение первого десятилетия послевоенного периода для многих стран мира главной целью было оперативное решение сложнейших междисциплинарных задач по ликвидации тяжёлых последствий войны и коренной переориентации экономики военного назначения на решение качественно новых задач мирного времени.

Системность и сложность этих задач определяются рядом факторов, в частности:

- принципиальным отличием и новизной целей, задач и ожидаемых результатов;
- ограниченностью финансовых и других видов ресурсов;
- дефицитом квалифицированных кадров.

Среди важнейших общественно-политических изменений в мире особо необходимо выделить создание международных организаций ООН (1945 год) и ЮНЕСКО (1946 год), что открыло принципиально новые возможности международного сотрудничества стран мира в сферах образования, науки и культуры.

В частности, эти годы можно полагать **началом консолидации науки отдельных стран в единую мировую науку**. Рассматриваемый период насыщен уникальными научно-техническими достижениями.

В частности, год окончания Второй мировой войны стал первым годом использования **ядерной энергии**.

Следующим важнейшим достижением, хронологически более поздним по сравнению с ядерной энергетикой, но первым в истории по уровню неизвестности, непрогнозируемости, непредвиденности проблемных ситуаций, является **освоение космоса**.

Необходимо особо отметить, что при освоении космоса потребовалось решение задач, равных которым по многообразию, сложности, неопределённости, системности взаимосвязей качественно разнотипных факторов и условий не было в истории цивилизации. В процессе решения соответствующих системных задач активно использовались достижения фундаментальных теоретических и прикладных наук: от астрономии до ядерной физики.

Следующим важнейшим достижением человечества, способствовавшим развитию инструментария системного анализа и решению

актуальных системных задач в разных сферах жизнедеятельности стало **создание вычислительной техники**.

Но одновременно возникла потребность решения качественно новых задач в различных научных направлениях. В частности, в новых условиях потребовалось определить предмет исследования, выработать терминологию, описать проблематику, разработать методологию и в конечном счёте создать новые науки – теорию алгоритмов, теорию программирования, теорию вычислительных систем и ряда других. Поэтому развитие технического базиса и теоретических основ вычислительной техники, математического обеспечения и программирования осуществлялось параллельно.

В создание теории системного анализа и системной методологии весомый вклад внесли учёные разных стран мира. Особо следует отметить труды К. Боулдинга, Дж. Клира, М. Месаровича, Т. Саати, Г. Саймона, А. Холла, У.Р. Эшби.

Методологический кризис системного анализа. К концу третьего периода развития системного анализа появились глобальные системные проблемы, которые оказались неразрешимы на основе арсенала математических и методологических средств системного анализа, имевшихся в то время.

Сложившийся кризис был связан с рядом общих особенностей развития системного анализа.

Во-первых, в процессе развития цивилизации постоянно появлялись сложные и практически важные проблемы, которые невозможно было разрешить на основе существовавшего в то время арсенала теоретических и технических средств науки, в том числе средств системного анализа.

И такое положение вполне объяснимо: если нет научного предвидения соответствующей проблемной ситуации, то невозможно заранее готовить средства для её разрешения. В таких случаях поиск средств решения начинается только после появления проблемы.

Во-вторых, развитие системного анализа вовсе не походило на «триумфальное шествие» в форме последовательного победного освоения всё новых и новых системных задач.

Наряду со значительными успехами явно проявились и определённые трудности в практической реализации системного подхода,

прежде всего в слабоструктурированных предметных областях: сфере социального управления, экологии, экономике и так далее.

К концу 1970-х годов была накоплена критическая масса неудачных попыток применения системного подхода и системной методологии к разным проблемам, что дало повод критикам системного анализа характеризовать его как сумму методов, имеющих узкоограниченную область применения, и говорить о несостоятельности его претензий на статус общенаучной методологии.

На самом же деле возникшие трудности были вызваны тем, что математические и методологические средства системного анализа, успешно применяемые при решении задач, относящихся к системам одного типа, пытались механически использовать в задачах, относящихся к системам качественно другого типа.

Другой важной причиной сложившейся ситуации была недоступность для широкого применения арсенала математических, методологических и вычислительных методов системного анализа, который разрабатывался и успешно использовался в оборонных отраслях, а также в космонавтике и ядерной энергетике.

Кроме того, одной из важнейших причин рассматриваемого кризиса было **слишком быстрое увеличение темпа роста сложности и масштаба реальных системных проблем, обусловленное глобализацией мировых процессов.** В таких условиях сложные, качественно разнотипные взаимосвязи, взаимозависимости и взаимодействия экономических, социальных, экологических и других глобальных и региональных процессов становились определяющими факторами мирового развития.

В результате появился **качественно новый эффект развития**, который французский экономист М. Годе чётко и полно охарактеризовал короткой, но ёмкой фразой «**Будущее перестало походить на прошлое**».

Глобальные процессы мировой системы оказались под воздействием сложноструктурированного, многоуровневого иерархического множества почти непрогнозируемых, непрерывно изменяющихся взаимосвязей, взаимозависимостей и взаимодействий. Результатами такого состояния становились **последствия, непредвиденные и неприятные.**

Этап 4. Глобализация системной проблематики. Этот этап качественно отличается от предыдущего нового свойства глобализацией

мировых процессов и угроз. В связи с глобальными изменениями в мире непрерывно обостряется четыре категории угроз:

1) **непосредственные угрозы существованию человека** – голод, болезни, радиация, терроризм, чрезвычайные ситуации, стихийные бедствия и другие;

2) **угрозы большим регионам и территориям** – опустынивание, подъём уровня океана, глобальное изменение климата, трансграничный перенос загрязнений, изъятие стока рек странами, расположенными в верхнем течении рек, и другие;

3) **угрозы экологическим системам**;

4) **угрозы экономическому развитию** – дефицит природных ресурсов, нарастающее глобальное неравенство, в том числе, информационное обеспечение, неравномерность экономического положения и развития стран, нестабильность финансовой системы и рынков и другие.

Известный итальянский экономист и общественный деятель, инициатор создания международной научной организации – аналитического центра «**Римский клуб**» (1972 год), **Аурелио Печчеи** доказывал: «Нет больше экономических, технических или социальных проблем, существующих отдельно, независимо друг от друга, которые можно было бы обсуждать в пределах одной специальной терминологии и решать неспеша, по отдельности, одну за другой. В нашем искусственно созданном мире буквально всё достигло небывалых размеров и масштабов: скорости, энергия, сложность – и наши проблемы тоже. Они теперь одновременно и психологические, и социальные, и экономические, и технические, и вдобавок ещё и политические; более того, тесно переплетаясь и взаимодействуя, они пускают корни и дают ростки в смежных и отдалённых областях».

В связи с этим «Римский клуб» принял **парадигму органического роста и холистического развития**, в рамках которой заслуживают внимания следующие положения:

- развитие должно быть систематическим, многоаспектным и взаимозависимым, когда ни один элемент системы не может расти за счёт других;

- непротиворечивость мира должна гарантироваться координацией целей;

- главный аспект должен быть сосредоточен на качестве развития с целью роста благосостояния человеческой личности.

За четверть века своего существования «Римский клуб» сделал многое для понимания состояния и процессов развития глобальной проблематики и возможных отрицательных последствий.

За этот период под воздействием результатов деятельности клуба созданы другие международные организации, в том числе **МИПСА – Международный институт прикладного системного анализа** (Люксембург, Австрия), который выполнил, в частности, ряд важных программ по экологии и рискам.

Вместе с тем, продолжая исследовать современное состояние мира, в котором за последние 20 лет произошли фундаментальные изменения, «Римский клуб» вынужден признать, что **положение в глобальной проблематике не только не улучшилось, но и продолжает ухудшаться.**

Имеется много разных причин, в том числе: политических, экономических, социальных и других, которые препятствуют разработке и реализации рациональных стратегий совместных действий всего человечества для предотвращения надвигающейся глобальной катастрофы.

Одной из важнейших методологических причин является **несоответствие современной методологии системного анализа сложной, глобальной, многоуровневой, иерархической, многодисциплинарной структуре разнородных, многофакторных, многофункциональных взаимосвязей, взаимозависимостей и взаимодействий объектов исследования.**

Существующая методология системного анализа недостаточно использует потенциальные возможности глобальной, многоуровневой, иерархической системы информационных компьютерных систем и сетей, банков данных, которые являются потенциальным инструментарием исследования глобальной проблематики.

Одним из путей преодоления этого недостатка является комплексная, последовательная разработка концепций, стратегий и программ исследования наиболее важных проблем современности, таких как:

- предвидение качественных и количественных изменений в различных сферах практической деятельности;
- управление рисками и безопасностью сложных технических систем, техногенно и экологически опасных процессов;
- развитие интеллектуальных информационных технологий и сетей поддержки научных исследований;

- прогнозирование последствий взаимоотношений природы и общества на основе глобального экологического мониторинга, оценивание тенденции развития мировой экологической системы и др.

Таким образом, **определяющим принципом системных исследований в XXI веке становится глобальное видение исследуемых проблем с учётом быстровозрастающей сложности взаимосвязей и взаимозависимостей всех стран и народов мира.**

Главной целью системных исследований становится достижение такого системно согласованного, взаимозависимого развития всех компонентов цивилизации, при котором ни один элемент мировой системы не может расти за счёт других.

Для достижения этой цели необходимо сосредоточить усилия на ускорении преодоления методологического кризиса, проявившегося в конце 1970-х годов.

Целесообразно расширить диапазон формирования структуры методологии современного системного анализа, обеспечив её системное, функциональное согласование с иерархической структурой взаимосвязей, взаимозависимостей и взаимодействий объектов исследования, а также с иерархической структурой информационных компьютерных систем и сетей как инструментальной основы её реализации, соответственно.

Существуют разные подходы к системному анализу глобальных процессов. В частности, одним из примеров применения системного подхода к анализу процессов развития цивилизации является **глобальное моделирование** – направление системных исследований, начало которому положил **Джей Форрестер** в своей фундаментальной работе «**Мировая динамика**» [3].

Другим характерным примером может служить **исследование научно-технических инноваций**. В 80-е годы XX века, наряду с традиционными для этой области проблемами инновационной политики фирм и компаний, начинает широко обсуждаться влияние инноваций на долгосрочные тенденции экономического развития, их роль в формировании так называемых больших циклов.

В частности, особо важная роль в столь сложных исследованиях отводится **технологическому предвидению** и достижению **целей устойчивого развития**.

В завершение данного раздела отметим также, что **основой современной общенаучной картины мира**, наряду с системным анализом,

является **синергетика** как междисциплинарное направление научных исследований, в рамках которого изучаются общие закономерности процессов перехода от хаоса к порядку и обратно в открытых нелинейных системах. При этом **системный анализ** изучает процессы организации систем, а **синергетика** – процессы их самоорганизации.

Контрольные вопросы

1. Тожественны ли понятия «система» и «структура»? Какими основными признаками должна обладать любая система?
2. Дайте определение структуры системы.
3. В чем различие между понятиями «подсистема» и «элемент»?
4. Приведите примеры систем с линейной и нелинейной структурой.
5. Раскройте суть принципа супераддитивности.
6. Приведите примеры положительных и отрицательных эмерджентных свойств систем разной природы.
7. Является ли системой полый тетраэдр, построенный из четырех тонких треугольных металлических пластин?
8. Какие основные события в развитии науки послужили предпосылками становления идей системности и системного мышления?
9. Какие основные этапы характеризуют развитие системного анализа в XX веке?
10. В чем суть методологического кризиса системного анализа и каковы возможные пути его преодоления?

Литература

1. *Моисеев Н.Н.* Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998. 480 с.
2. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011, 729 с.
3. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 167 с.

2. Сложность как фундаментальная категория теории систем и системного анализа

2.1. Многогранность категории «сложность»

В силу неограниченного качественного разнообразия сложных систем разной природы на всех уровнях системной организации реальности категория «сложность», как и «система», не может быть определена исчерпывающе и однозначно.

Выделим следующие наиболее важные аспекты сложности.

Аспект 1. Большое число частей. Чем больше число частей (подсистем и элементов), составляющих структуру системы, тем выше сложность системы.

Аспект 2. Большое число взаимосвязей. Увеличение числа частей, образующих структуру системы, существенно увеличивает число взаимосвязей, взаимодействий и взаимовлияний этих частей друг на друга и в результате усложняет систему.

Аспект 3. Качественная разнотипность. Чем выше качественное разнообразие свойств частей, взаимодействующих в структуре системы и, соответственно, качественное разнообразие свойств их связей между собой, тем сложнее система.

Аспект 4. Большая размерность системы. Размерность системы – это число параметров, описывающих состояние системы. Увеличение размерности системы повышает её сложность.

Аспект 5. Наличие обратных связей. Наличие петель (замкнутых контуров) обратной связи необходимо для реализации управления, но усложняет систему.

Аспект 6. Сложность процессов развития. Процессы развития являются особенно сложными, поскольку такие процессы выделяются из всего многообразия динамических процессов по следующим критериям:

- развитие предполагает появление качественно новых частей целого с качественно новыми свойствами и качественное их изменение;
- не являются полностью детерминированными;

- характеризуются ограниченным горизонтом прогнозирования.

Аспект 7. Фундаментальность. Известный системный аналитик **Джордж Клир** говорит о том, что **понятие сложности является столь же фундаментальным понятием науки о системах, сколь фундаментально понятие энергии в естественных науках** [1].

Известный английский психиатр, специалист по кибернетике XX века, **Уильям Росс Эшби** также поддерживает эту мысль: «**Термин «сложность» в применении к системам имеет много смыслов**». Согласно его представлениям **сложность системы** характеризуется её **разнообразием**, то есть количеством возможных состояний, в которых может находиться система. При этом число состояний сложной системы может стремиться к бесконечности.

У.Р. Эшби сформулировал и доказал важный в кибернетике (теории управления) **принцип необходимого разнообразия**: разнообразие системы управления должно превосходить или, по крайней мере, соответствовать разнообразию объекта управления [2].

Отсюда следует, что, например, сложность головного мозга превышает сложность остальных подсистем человеческого организма. Отметим, что, как и в данном примере, размеры системы управления, несмотря на её повышенную сложность, как правило, существенно меньше размеров управляемого объекта.

Краткая формулировка данного принципа имеет вид: только разнообразие может разрушить разнообразие. Ограничение разнообразия в поведении управляемого объекта достигается только за счёт расширения разнообразия органа управления. Сложность и качество управления должны соответствовать сложности системы.

Краткое обоснование данного принципа сводится к следующим рассуждениям. При создании проблеморазрешающей системы необходимо, чтобы эта система имела большее разнообразие, чем разнообразие решаемой проблемы, или была способна создать такое разнообразие.

То есть, система должна обладать возможностью изменять своё состояние в ответ на возможное возмущение; разнообразие возмущений требует соответствующего ему разнообразия возможных состояний. В противном случае такая система не сможет отвечать задачам управления, выдвигаемым внешней средой, и будет малоэффективной.

Отсутствие или недостаточность разнообразия может свидетельствовать о нарушении целостности подсистем, образующих данную систему.

Пример. Чем шире видовое разнообразие, тем устойчивее любая экологическая система и биосфера в целом; видовое разнообразие – основное условие устойчивости любой экосистемы и биосферы в целом.

Вместе с тем **В.И. Арнольд** в рамках созданной им математической теории катастроф сформулировал общий **принцип хрупкости хорошего**: всё хорошее, например, устойчивость, более хрупко, чем плохое [3].

Ранее **А.А. Богданов** сформулировал аналогичный **принцип минимума**: поведение системы определяется самым слабым её звеном [4].

Например, скорость эскадры определяется самым тихоходным кораблём.

Отсюда следует практическая рекомендация для консультантов: часто имеет смысл начинать заниматься не самым ответственным элементом системы, а самым «отстающим».

В.И. Левантовский сформулировал **принцип хрупкости хорошего** в следующем виде:

- чем разнообразнее система, тем она сложнее;
- чем сложнее система, тем она более неустойчива и менее управляема.

Характерной особенностью окружающего мира является **возрастающая сложность** и взаимозависимость его составляющих, на что неоднократно ещё во II половине XX века обращали внимание Аурелио Печчеи, Томас Саати, Джордж Клир и другие учёные, многие общественные деятели и политики.

На рис. 5 представлена схема, отражающая **три важнейшие составляющие сложности как наиболее фундаментальной категории системного анализа**:

- сложность систем;
- динамическая сложность среды;
- сложность задач и методов их решения.

Установлено, что **проблемы**, будь то социальные, политические или экономические, **не существуют изолированно друг от друга**. Они не могут быть выделены из некоей целостной среды, решены и



Рис. 5. Три составляющих сложности

объяснены по отдельности, а затем вновь интегрированы для объяснения этой целостной среды.

Более того, среда, в которой возникают эти проблемы, сама по себе не обладает постоянными свойствами целостности. Она динамична, всегда изменяется, подвергаясь как внешним, так и внутренним воздействиям. **Среда меняется вместе со своими проблемами и их решениями в физическом и концептуальном пространствах.**

Например, в результате технологического прогресса также изменяются и отбираются отношения между элементами данного процесса посредством сугубо конкретных интерпретирующих структур. Среда также изменяется во времени, поскольку на неё заметно влияют различные события и изменение условий.

В общей теории систем **сложность** есть общее свойство некоторого множества различных объектов, структурно взаимосвязанных и функционально взаимодействующих.

Для задач системного анализа это определение целесообразно дополнить и изложить в следующей формулировке:

Сложность – это общее свойство единого множества различных объектов, структурно взаимосвязанных, функционально взаимозависимых и взаимодействующих между собой, в складывающихся параметрах и характеристиках окружающей среды при наличии неконтролируемых внешних воздействий, неопределённости, факторов риска и других условий, характерных для системных задач.

С позиции системного анализа понятие сложности целесообразно рассматривать также, исходя из оценивания **затрат при исследовании и решении системных задач.**

Следуя подходу Джорджа Клира, важно различать «**сложность**» и «**трудность**». Так, многие задачи являются трудными, но, тем не менее, **простыми**, так как имеют **единственное решение** или конечное множество решений.

Пример. Задача «развязать узел верёвки» может быть трудной, но она имеет одно решение, в силу чего не является сложной.

Сложная проблема обычно имеет **множество возможных решений**, которые **соответствуют различным целям**.

Пример. Обеспечение комплексной безопасности в условиях риска чрезвычайных ситуаций осуществляется, исходя из технических, экономических, организационных и другого типа целей, для каждой из которых существуют свои решения, которые каким-то образом должны быть согласованы друг с другом.

Сложность есть характеристика, связанная с проявлением качественного разнообразия свойств частей во взаимодействии, взаимозависимости процессов во взаимосвязанных системах, которая оценивается степенью влияния одного или нескольких элементов на поведение других элементов.

Всё сказанное применимо к любым типам систем: материальным и абстрактным, естественным и искусственным, к творению науки или искусства, а также к задачам, методам, теориям, законам, играм, языкам, машинам, организмам и любым другим системам.

Независимо от того, что рассматривается как сложное или как простое, в общем случае **мера сложности** связана с числом различаемых частей и мерой их взаимодействия и взаимосвязанности.

В связи с этим дадим следующее определение.

Сложная система – это система, в структуре которой содержатся качественно разнотипные системы и качественно разнотипные межсистемные взаимосвязи.

Кроме того, понятие сложности имеет **субъективную обусловленность**, поскольку оно связано со способностями понимания и целями использования рассматриваемой системы, так как то, что сложно для одного, может оказаться простым для другого. Таким образом, интерпретация и понимание сложности зависят от многих факторов, зачастую – субъективных, которые системный аналитик применяет либо не применяет при соединении рассматриваемых частей исследуемого объекта или системной проблемы в единое целое.

Эта субъективность представляет дилемму более высокого порядка, которая рассеивает любое латентное представление о существовании объективной интерпретации реальности, превосходящей наш разум и познавательную способность. Люди, которые решают, какие действия предпринимать для решения сложных проблем, и те лица, на которых воздействуют принятые решения, обычно имеют различные интересы и противоречивые цели. В рамках этих двух групп людей или между ними может быть не достигнут консенсус по желаемым целям или стратегиям, разработанным для их достижения.

Другая трудность, которая существует при определении понятия «сложность», связана с невозможностью расчленения целостного множества задач на частные проблемы, их решения по-отдельности и последующего синтеза полученных частных решений в интегральное решение исходной комплексной проблемы.

Кроме того, понятие сложности выражает взаимодействие исследователя с объектом исследования, результатом которого является изучение исходной системы с той или иной степенью глубины или детализации. В этом смысле сложность не является неотъемлемым свойством исследуемой системы, а, скорее, определяется способом, с помощью которого исследователь взаимодействует с ней с позиции поставленных целей.

На уровне исходных систем в определённых условиях системная сложность выражается только через мощности рассматриваемых множеств: множеств переменных, множеств параметров, множеств состояний и параметрических множеств, поскольку между этими множествами нет взаимосвязей. На более высоких эпистемологических уровнях понятие системной сложности становится более содержательным. Одна та же исходная система на различных более высоких эпистемологических уровнях может быть описана самыми разными способами.

Сложные системные проблемы не существуют изолированно и редко характеризуются односторонними причинными отношениями. Скорее, сложность связывает проблемы вместе и формирует целостную картину взаимоотношения и множественной причинности. Точную природу причинности трудно описать до конца: слишком часто взаимосвязь проблем обнаруживается только после принятия решений, которые порождают вторичные проблемы.

В сложных системах и системных проблемах важную роль играют сложность, взаимосвязь и взаимозависимость различных компонентов системы. Обращение к таким проблемам требует применения системного подхода, который позволил бы использовать информацию разного вида, включая как точные данные, количественную информацию, так и неточные, размытые данные, полученные интуитивно, из опыта, с учётом ценностей суждений и образных догадок.

Кроме информации, необходимой для получения решений рассматриваемых задач, нужно использовать определённые приёмы, принципы, подходы, позволяющие строить решения с требуемой точностью, обоснованностью и достоверностью. Вместе с тем формальные методы не всегда могут быть хорошо адаптированы к решению прикладных системных задач.

Например, в исследовании операций (прикладной оптимизации) и в теории управления (кибернетике) разработано множество моделей и методов, которые часто механически применяются для решения проблемы преодоления (упрощения) сложности. В результате генерируются исходные данные для использования модели прежде, чем реально возникнет сама проблема. Однако ни одна проблема не встречается точно в таком виде, как люди пытаются её предвидеть и осознать.

Эти особенности встречаются при изучении конфликтов. Можно пытаться предотвратить конфликты, но, когда они происходят, нужна другая процедура для их нейтрализации, исследования и остановки.

2.2. Понятие спектра сложности

История развития науки и техники свидетельствует о том, что до XX века наука занималась в основном относительно простыми системами. Перечень основных событий в науке с XVII по XX век преимущественно состоит из вариаций на одну и ту же тему: **выявление скрытой простоты в ситуации, представляющейся сложной.**

Подобные ситуации характеризуются тем, что выделяется несколько существенных факторов, а множество других считается несущественными, что позволяет исследователю прийти к существенным, экспериментально оправданным упрощениям и, следовательно, рассматривать выделенные существенные характеристики изолированно от всех остальных.

Множество ситуаций, в которых из большого числа факторов удаётся выделить несколько существенных, характерно для физики, что объясняет значительные успехи этой науки в обогащении других разделов знаний. Ньютон положил начало этому развитию, показав, что в физике возможны существенные упрощения. Его закон всемирного тяготения является следствием очень сильных упрощений. Тем не менее, при корректных вычислениях он позволяет с высокой точностью рассчитывать орбиты движения планет.

Наука почти до начала XX века находилась под влиянием достижений Ньютона. Его мощные упрощения применялись в самых разных областях, что при исследовании некоторых физических явлений, особенно электричества, магнетизма, гидромеханики, привело к хорошим результатам.

Однако в других науках, особенно в биологии и медицине, это не срабатывало. Задачи, которыми занималась наука и которые она научилась решать, относились к исследованию детерминированных систем с двумя или тремя переменными. Такие системы, точнее их динамика, описываются аналитическими моделями, обычно представленными в виде систем дифференциальных уравнений.

Подобные задачи с малым числом переменных, высокой степенью детерминизма, решение которых ищется в аналитической форме, называются **задачами организованной простоты** [5].

А системы, рассматриваемые в таких задачах, логично назвать **просто организованными**.

Пример. Камень, брошенный под углом к горизонту, и другие простые задачи классической механики.

Заметим, что, если полёт камня рассматривать в идеализированных условиях, то **горизонт прогнозирования неограничен**.

В конце XIX века некоторые физики занялись исследованием систем движения молекул газа в замкнутом объёме. Такие системы обычно имеют примерно 10^{23} молекул. Движущиеся молекулы обладают огромными скоростями, а их траектории из-за постоянных, многократных столкновений имеют хаотичный характер.

Очевидно, что закон Ньютона с его сильными упрощениями изучаемых процессов для таких сложных систем неприменим. Поэтому совершенно безнадежно пытаться решать задачу анализа движений молекул газа в замкнутой области, то есть задачу исключительно сложной

и неорганизованной системы, с помощью средств и методов, используемых для задач организованной простоты. Соответственно, **горизонт прогнозирования траекторий частиц отсутствует.**

Для таких задач нужен совершенно иной подход. Учёные, прежде всего Людвиг Больцман и Джозайя Уиллард Гиббс, разработали мощные статистические методы решения задач для систем с большим числом переменных, проявляющихся весьма случайным образом.

Подобные задачи называют **задачами неорганизованной сложности** [5].

А системы, рассматриваемые в таких задачах, можно назвать неорганизованно сложными.

Пример. Задачи статистической физики, газовой динамики, статистической генетики и т.п.

Статистические методы не описывают отдельные переменные, например, движение отдельной молекулы. Они позволяют определять массовые, то есть вероятностные, статистически усреднённые характеристики изучаемых процессов.

Разработанные в начале XX века статистические методы успешно применялись для решения многих задач неорганизованной сложности, возникающих как в науке, так и во многих её приложениях. Хорошо известны примеры успешного применения этих методов в статистической механике, термодинамике, статистической физике и статистической генетике.

В технике эти методы играют важную роль при создании больших телефонных сетей и компьютерных систем с разделением времени, при решении задач обеспечения технической надёжности и так далее. В деловой сфере эти методы широко используются при решении задач маркетинга, страхования и так далее.

В отличие от используемых для класса задач организованной простоты аналитических методов, которые оказываются трудно применимыми уже при относительно небольшом числе переменных (например, при пяти переменных), эффективность и целесообразность применения статистических методов возрастает с ростом числа переменных.

Таким образом, эти два класса методов взаимно дополняют друг друга. Они соответствуют двум противоположным участкам спектра сложности и, несмотря на взаимодополняемость, покрывают весьма небольшую часть этого спектра.

То есть, за исключением двух указанных участков спектра сложности, он остаётся методологически не обеспеченным в смысле существования широкого класса задач, для решения которых не пригодны ни аналитические, ни статистические методы.

Такие задачи, связанные со средней частью спектра сложности, называют **задачами организованной сложности** [5].

Системы, рассматриваемые в таких задачах, являются сложно организованными. Именно этим классом задач занимается **системный анализ**.

Примеров задач со свойствами организованной сложности великое множество, особенно в науках, изучающих жизнь на Земле, поведение животных, окружающую среду, социальную сферу и высокотехнологические научные приложения.

Сложно организованные системы обладают многими свойствами, которыми в принципе нельзя пренебречь. В частности, одним из таких свойств является **ограниченный горизонт прогнозирования** поведения нелинейных динамических систем, например, прогнозирование погоды или прогнозирование оценки студента на экзамене.

И, тем не менее, упрощений в большинстве случаев избежать нельзя.

Так как ни ньютонова, ни статистическая стратегии упрощения не применимы для таких задач, необходимо найти новые пути их решения. Один из них основывается на допущении о неточности при описании изучаемых систем. В этом случае неточность имеет не статистическую, а более общую природу хотя бы потому, что она включает в себя возможность статистических описаний. Математический аппарат, положенный в основу этого подхода, разработанный профессором Лотфи Заде в середине 60-х годов XX века, известен как **«теория нечётких множеств»**, основы которой рассматриваются далее в нашем курсе.

Кроме того, позже была разработана ещё более общая так называемая **теория возможностей**, частными случаями которой являются теория вероятностей и теория нечётких множеств.

2.3. Понятие энтропии

Пусть на элементах произвольного конечного множества X задано **распределение вероятностей** $\mathcal{P}(X)$, то есть набор неотрицательных чисел, сумма которых равна единице:

$$(x \in X) \Rightarrow (\mathbb{P}(x) \geq 0); \quad (4)$$

$$\sum_{x \in X} \mathbb{P}(x) = 1. \quad (5)$$

В прикладных задачах элементы множества X часто характеризуются неотрицательными числами. Тогда деление каждого числа на сумму всех чисел позволяет перейти к распределению вероятностей:

$$\mathbb{P}(x) = \frac{\nu(x)}{\sum \nu(x)}. \quad (6)$$

Далее мы будем интерпретировать множество X как множество состояний некоторой системы.

Энтропия распределения вычисляется по формуле:

$$H_{\mathcal{P}(X)} = - \sum_{x \in X} \mathbb{P}(x) \ln \mathbb{P}(x). \quad (7)$$

Ясно, что

$$(0 < \mathbb{P}(x) \leq 1) \Rightarrow (\ln \mathbb{P}(x) < 0) \Rightarrow (\mathbb{P}(x) \ln \mathbb{P}(x) < 0). \quad (8)$$

Поэтому энтропия всегда неотрицательна:

$$H_{\mathcal{P}(X)} \geq 0. \quad (9)$$

Абсолютный порядок характеризуется распределением вероятностей, при котором лишь один элемент множества X имеет вероятность, равную единице, в то время как все остальные элементы имеют нулевую вероятность.

В этом случае имеем:

$$(\mathbb{P}(x) = 1) \Rightarrow (\mathbb{P}(x) \ln \mathbb{P}(x) = 0); \quad (10)$$

$$(\mathbb{P}(x) = 0) \Rightarrow (\mathbb{P}(x) \ln \mathbb{P}(x) = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ p > 0}} p \ln p = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ p > 0}} \frac{(\ln p)'}{(p^{-1})'} = \lim_{\substack{p \rightarrow 0 \\ p > 0}} \frac{p^{-1}}{-p^{-2}} = 0). \quad (11)$$

Поэтому в случае абсолютного порядка энтропия принимает своё минимально возможное значение, равное нулю:

$$H_{(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)} = \min H_{\mathcal{P}(X)} = 0. \quad (12)$$

Абсолютный беспорядок (хаос) характеризуется равномерным распределением вероятностей, при котором все исходы равновероятны:

$$(x \in X) \Rightarrow \left(\mathbb{P}(x) = \frac{1}{|X|} \right). \quad (13)$$

Здесь $|X|$ есть мощность множества X , то есть число его элементов.

Для равномерного распределения вероятностей имеем:

$$H_{\mathcal{P}(X)} = -\sum_{x \in X} \mathbb{P}(x) \ln \mathbb{P}(x) = -\sum_{x \in X} |X|^{-1} \ln |X|^{-1} = \frac{1}{|X|} \sum_{x \in X} \ln |X| = \ln |X|. \quad (14)$$

То есть энтропия равномерного распределения есть логарифм мощности носителя X данного распределения. Более того, с помощью метода неопределённых множителей Лагранжа можно доказать, что энтропия максимизируется именно при равномерном распределении:

$$H_{(|X|^{-1}, \dots, |X|^{-1})} = \max H_{\mathcal{P}(X)} = \ln |X|. \quad (15)$$

Таким образом, **энтропия есть мера хаоса, неорганизованности, неопределённости состояний системы**, в силу чего данная характеристика теоретико-вероятностных распределений приобретает особую важность в анализе сложных систем разной природы.

В методологическом плане в системном анализе важную роль играет **второй закон термодинамики**, в соответствии с которым в **изолированной** от внешней среды системе энтропия во времени возрастает, что постепенно приводит к дезорганизации и деструкции системы. Вместе с тем современные исследования показывают, что данный закон носит статистический характер, то есть в изолированной системе возможны флуктуации энтропии.

Поэтому **сложно организованные системы** являются **открытыми**, то есть активно взаимодействуют с внешней средой, обмениваясь с ней различными ресурсами, в том числе веществом, энергией и информацией.

Кроме того, такие системы не могут существовать ни в состоянии абсолютного порядка, ни в состоянии абсолютного беспорядка, то есть занимают промежуточное положение между этими крайними состояниями спектра сложности.

Вместе с тем, все развивающиеся системы стремятся к закрытости.

2.4. Принцип несовместимости и принцип рациональности

Принцип несовместимости: увеличение сложности систем экспоненциально уменьшает способность человека оперативно выполнять с достаточной обоснованностью и достоверностью многофакторный системный анализ и строить достаточно точные и содержательные утверждения о состоянии и поведении объекта исследования [5].

Также не исключается возможность уменьшения способности человека выполнять эту функцию ниже критического предела.

Вследствие принципа несовместимости некоторые характеристики результатов анализа, в частности точность и содержательность, достоверность и оперативность, становятся взаимоисключающими.

Поэтому, **чем более детально рассматривается реальная задача, тем менее оперативным и менее обоснованным может оказаться её решение.**

Следовательно, количественный подход к решению реальных системных задач на основе детального описания свойств и поведения сложных систем не всегда может обеспечить требуемый уровень

обоснованности и оперативности решений, которые необходимы в реальных условиях управления и принятия решений.

Вместе с тем на практике потребность оперативного формирования и достоверного обоснования решений появляется достаточно часто.

Например, такая потребность появляется при управлении системами в условиях повышенного риска чрезвычайных ситуаций, в частности:

- при изучении режимов функционирования сложных технических систем, машин и механизмов;
- в критических или аварийных ситуациях, возникающих во взаимосвязанных технологических процессах и промышленных комплексах;
- в критических или аварийных техногенных, экологических и других нештатных режимах поведения систем.

Важнейшей характеристикой системных задач является действие множества различных **не-факторов**, к которым относятся **неопределённость, неполнота, неточность, нечёткость, несвоевременность** исходной информации и т.п., в связи с чем в решении системных задач важную роль играет нечёткая логика, позволяющая оперировать с нечёткими истинами, нечёткими отношениями и нечёткими правилами логического вывода.

В частности, актуальной является **проблема неполной формализуемости** прикладных системных задач.

Формализация задач организованной простоты не вызывает затруднений, так как содержательная постановка таких задач упрощается до такой степени, что становится возможным построение формальной математической модели, которая, как правило, имеет вид системы дифференциальных либо разностных уравнений.

Задачи неорганизованной сложности допускают формализацию, основанную на использовании теоретико-вероятностных методов, возможность практического применения которых определяет закон больших чисел.

Принципиально иначе обстоит дело с задачами организованной сложности. Например, для современных технических систем и технологий характерным является не только большое количество взаимодействующих и взаимосвязанных функциональных подсистем, но

в первую очередь: сложность их взаимодействия, сложность воздействия внешней среды на внутренние процессы исследуемого объекта и ряд других факторов.

Поэтому задача анализа почти любой практической сферы деятельности человека заключается не в том, чтобы определить её входы и выходы, а одновременно отслеживать все взаимодействия функциональных подсистем объекта с такой точностью и достоверностью, которые позволят получить практически приемлемые решения и рекомендации.

Сложность такой задачи хорошо иллюстрирует известный системный аналитик Томас Саати на примере функционирования экономики. Частые неудачи в прогнозировании флуктуаций в экономике подтверждают, что сложность, свойственная социально-экономическому поведению, может превышать пределы наших интеллектуальных возможностей для её учёта. Даже при использовании сложных современных экономических теорий и моделей обнаруживается, что невозможно справиться со сложной сетью взаимозависимости всех составляющих экономики. Мы сталкиваемся с трудностью предсказания краткосрочных, ежегодных или даже ежемесячных состояний экономики.

Аналогичные проблемы возникают и при прогнозировании чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и биолого-социального характера.

Приведенные примеры с достаточной убедительностью свидетельствуют о том, что полная формализация прикладных системных задач является не просто сложной, а в ряде случаев – неразрешимой задачей.

Принципиальная неформализуемость отдельных системных задач определяется не только их сложностью, но и другими факторами, в частности субъективным пониманием ЛПР целей конкретных видов практической деятельности, степени их важности, индивидуальной способности ЛПР к осторожности или риску и др.

Аналогично, при разработке сложной технической системы или технологии многие проблемы разрешаются только человеком, конструктором. Например, структура объекта, возможное множество альтернативных технических заданий и решений формируются только человеком.

Наконец, только человек может предложить новый способ, новое техническое решение, которые станут основой нового объекта или новой технологии.

Таким образом, **двумя основными характеристическими свойствами прикладных системных задач** являются:

во-первых, их организованная сложность;

во-вторых, принципиальная невозможность полной и однозначной формализации задачи.

Обратим внимание, что второе свойство вовсе не означает, что задача принципиально неразрешима. Методологические подходы, принципы и методы решения системных задач позволяют представить исходную системную задачу в виде некоторой последовательности неформализуемых и формализуемых задач.

При этом решение неформализуемых задач выполняется человеком на основе знаний, опыта, умений, интуиции и возможностей предвидения. В силу субъективности такого подхода формализация одной и той же системной задачи, выполненная несколькими специалистами одной и той же профессии, будет различаться. Причём различие может оказаться принципиальным, так как в условиях неопределённости один эксперт может быть склонным к риску, а другой предпочтёт действовать крайне осторожно.

Поэтому при решении прикладных системных задач важно соблюдать **принцип рациональности**, то есть использовать рационально как возможности человека для эвристического решения неформализуемых задач, так и возможности современных математических и вычислительных методов для решения формализуемых задач [5].

В частности, использование **эвристических приёмов** позволяет рационально упрощать процесс решения сложных прикладных системных задач. Проиллюстрируем важность эвристики в прикладных задачах оптимизации на следующих примерах.

Пример. В теории принятия решений (прикладной оптимизации) известно, что оптимальное решение задач линейного программирования достигается на вершинах выпуклого полиэдрального множества допустимых альтернатив.

Однако решение задачи линейного программирования методом непосредственного перебора на множестве всех вершин полиэдра нерационально с точки зрения затрат временных ресурсов (с учётом количества вершин).

Поэтому для решения задач линейного программирования был разработан так называемый симплекс-метод, в основе которого лежит

эвристическая идея – на каждой итерации симплекс-метода мы переходим не к произвольной, а лишь к такой вершине полиэдра, в которой значение целевого критерия эффективности решения задачи окажется не хуже его текущего значения.

В результате, от итерации к итерации, мы постепенно улучшаем значение целевого критерия задачи линейного программирования и, кроме того, решаем задачу, как правило, за практически приемлемое (полиномиальное) время, тогда как полный перебор всегда требует экспоненциального времени.

Пример. Реальные системы, как правило, многомерны. В результате, при решении обратной задачи математического моделирования, то есть задачи идентификации (построения математической модели системы по наблюдаемым данным), исследователь надеется на то, что лучшее качество аппроксимации обеспечит модель, размерность (порядок) которой совпадает с размерностью моделируемой системы.

На практике же часто имеет место противоположная ситуация: модели малой размерности часто обеспечивают лучшее качество аппроксимации по сравнению с моделями более высокого порядка, что наглядно иллюстрирует приведенный на рис. 6 график эмпирической зависимости качества модели от размерности моделируемого объекта.

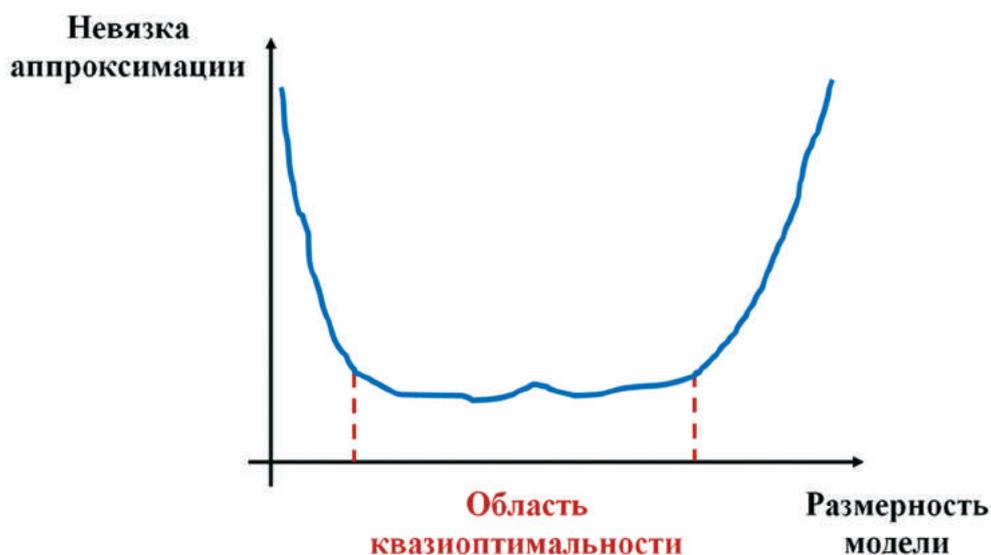


Рис. 6. График эмпирической зависимости качества модели от размерности моделируемого объекта

Данное явление, с первого взгляда кажущееся парадоксальным, на самом деле объясняется накопительным эффектом влияния неопределённости (шумов), который проявляется тем заметнее, чем выше порядок модели.

Поэтому рациональным подходом к идентификации многомерных систем является агрегирование результирующей аппроксимирующей модели из субмоделей малой размерности.

2.5. Подходы к оценке сложности систем

При решении системных задач сложность понимается двояко: как свойство исследуемых систем (**сложность систем**) и как свойство решаемых системных задач (**сложность задач** или **вычислительная сложность**) [5].

Существует два принципа дескриптивной (описательной) оценки сложности систем:

Во-первых, сложность системы возрастает пропорционально объёму информации, необходимой для описания этой системы.

Одним из способов описания такой дескриптивной сложности является оценка числа элементов, входящих в систему (переменных, состояний, компонентов), и разнообразных взаимосвязей между ними. Действительно, с ростом числа элементов или разнообразных взаимосвязей между ними возрастают и трудности работы с системой.

Во-вторых, сложность системы должна быть пропорциональна объёму информации, необходимому для разрешения любой нечёткости, характерной для исследуемой системы.

В теории информации широко применяются энтропийные подходы к оценке сложности.

Сложность систем изучается, прежде всего, для создания методов, с помощью которых она может быть снижена до приемлемого уровня. Упрощение системы осуществляется в двух аспектах: упрощение сложности, основанной на дескриптивной информации, и упрощение сложности, основанной на нечёткой информации.

Вместе с тем в синергетике (теории нелинейных неравновесных систем) известно, что очень сложное поведение системы может порождаться довольно простой нелинейной моделью.

Пример. Простая с точки зрения описания, но нелинейная динамическая система Лоренца (описывающая процесс конвекции), заданная моделью:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma y - \sigma x \\ \rho x - y - xz \\ xy - \beta z \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Размерность этой системы мала – равна трём. Здесь **отсутствует неопределённость вероятностной природы.**

Тем не менее, при определённых значениях параметров, например, при

$$\rho = 28; \sigma = 10; \beta = \frac{8}{3}, \quad (17)$$

эта детерминированная система может породить **очень сложное поведение:** динамика системы становится хаотической (сложное апериодическое движение), возникает **странный (хаотический) аттрактор Лоренца** (рис. 7).

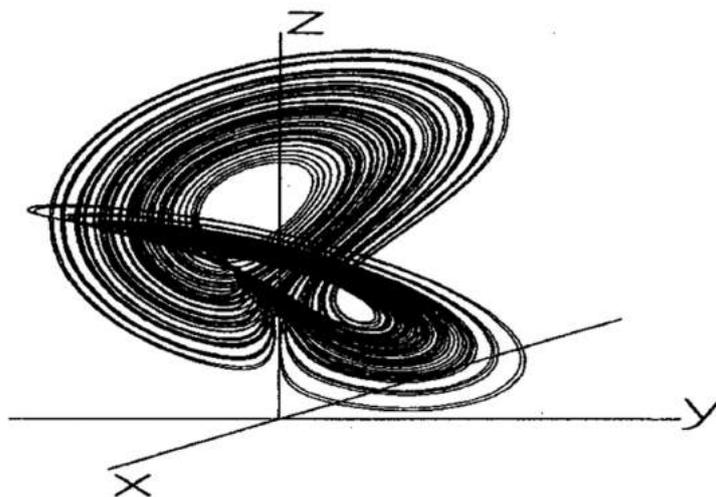


Рис. 7. Аттрактор Лоренца как пример детерминированного хаоса

Данная модель играет важную роль в гидрометеорологии и научно обосновывает невозможность построения достоверных долгосрочных прогнозов погоды.

Кроме того, **сложность может породиться повторением простого действия.**

Эту особенность используют, например, при описании фрактальных, то есть сложных самоподобных структур, и в кодировании информации (криптографии и криптоанализе).

Пример. Символическая динамика Фибоначчи, то есть последовательность слов (конечных последовательностей символов алфавита), определённых на бинарном (двухсимвольном) алфавите $\{0,1\}$:

$$1 \rightarrow 0 \rightarrow 01 \rightarrow 010 \rightarrow 01001 \rightarrow 01001010 \rightarrow 0100101001001 \rightarrow \dots$$

Данная последовательность слов имеет следующие два определения.

Определение 1. Конкатенация, то есть сцепление, слов в соответствии с рекурсивным уравнением:

$$v_n = v_{n-1}v_{n-2}, \quad (18)$$

с начальными условиями:

$$v_0 = 1 \quad \text{и} \quad v_1 = 0. \quad (19)$$

Заметим, что замена переменных:

$$x_n = v_{n-1} \dots \text{и} \dots y_n = v_{n-2}, \quad (20)$$

позволяет преобразовать данное рекурсивное уравнение второго порядка в систему двух уравнений первого порядка:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n y_n \\ x_n \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Определение 2. Морфизм (оператор, сохраняющий конкатенацию), действующий на бинарном алфавите:

$$1 \rightarrow 0 \quad \text{и} \quad 1 \rightarrow 01.$$

Можно доказать эквивалентность этих определений друг другу.

Успех или неудача при решении прикладных системных задач зависит прежде всего от объёма информации, которую необходимо обработать при её решении.

Ещё в 1969 году известный математик и биофизик Ханс Йоахим Бремерман сформулировал и доказал важный постулат: **не существует искусственной или естественной системы обработки данных, которая могла бы обрабатывать более чем $2 \cdot 10^{47}$ бит в секунду на грамм своей массы.**

Здесь под обработкой N бит понимается пересылка N бит по одному или нескольким каналам вычислительной системы.

Предел Бремермана – это количество информации, которое могла бы обработать гипотетическая компьютерная система, имеющая массу, равную массе Земли, за период, равный примерно возрасту Земли. Этот предел равен 10^{93} бит.

Задачи трансвычислительной сложности – это задачи, для решения которых требуется обработка информации объёмом более 10^{93} бит.

Многие задачи для систем даже относительно небольшой сложности являются задачами трансвычислительной сложности, что обусловлено следующими соображениями.

Мощность конечного множества есть число его элементов.

Булеан 2^X – это множество всех подмножеств заданного множества X .

$$(A \in 2^X) \Leftrightarrow (A \subset X). \quad (22)$$

Характеристическая функция множества A имеет вид:

$$X \xrightarrow{\mu_A} \{0,1\}; \quad (23)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}. \quad (24)$$

То есть каждый элемент $x \in X$ может находиться в одном из двух состояний: ноль либо единица.

Пусть множество X конечно и содержит $|X|$ элементов.

Тогда общее количество всех таких подмножеств A , то есть **мощность булеана**, равно $2^{|X|}$.

Множество состояний системы. Пусть X – множество элементов системы, а Y – множество возможных состояний каждого её элемента.

Множество всех возможных состояний такой системы обозначают Y^X .

Каждое состояние системы, с точки зрения математики, есть отображение R :

$$(R \in Y^X) \Leftrightarrow (X \xrightarrow{R} Y). \quad (25)$$

Отображение R есть действие, которое связывает каждый элемент $x \in X$ системы с каким-либо одним возможным его состоянием $y \in Y$, то есть:

$$Rx = y. \quad (26)$$

Если множества X и Y конечны и содержат $|X|$ и $|Y|$ элементов, соответственно, то количество всех возможных состояний R системы, то есть мощность множества Y^X , равно $|Y|^{|X|}$.

Обобщённое состояние системы есть подмножество множества Y^X . Если множества X и Y конечны и содержат $|X|$ и $|Y|$ элементов, соответственно, то количество всех обобщённых состояний:

$$2^{|Y^X|} = 2^{|Y|^{|X|}}. \quad (27)$$

Предположим, что требуется отобразить, выбрать или классифицировать систему из множества всех систем рассматриваемого типа.

Тогда, при условии, что используется самый эффективный метод поиска, при котором каждый бит информации позволяет разбить оставшееся множество пополам, необходимо обработать

$$\log_2 2^{|Y|^{|X|}} = |Y|^{|X|} \quad (28)$$

бит информации.

Задача становится трансвычислительной при выполнении неравенства:

$$|Y|^{|X|} > 10^{93}. \quad (29)$$

Это происходит, например, при $|X| = 308$ и $|Y| = 2$.

Пример. Задачи трансвычислительной сложности возникают в самых разных прикладных областях, например, в распознавании образов,

тестировании больших интегральных микросхем, представляющих собой сложные электронные схемы с большим числом входов и выходов.

Если задача имеет трансвычислительную сложность, то для того, чтобы её можно было решить, она должна быть переформулирована. Наиболее естественный способ такого переформулирования состоит в ослаблении условий [5].

Такое ослабление разрешает применять как эвристические методы, позволяющие отбрасывать множество заведомо непригодных вариантов решений, так и приближённые (нечёткие) методы, позволяющие решать эти задачи с учётом совокупности вариантов.

Предел Бремермана приводит к слишком простому разбиению системных задач по сложности. Реальных, практических вычислительных ограничений он не отражает. Тем не менее, он является полезной характеристикой при предварительной оценке сложности системной задачи.

2.7. Основные классы алгоритмической сложности

Успех преодоления трансвычислительной сложности прикладных системных задач определяется не только с точки зрения объёма информации, которую необходимо обработать в процессе решения задачи, но и вычислительными характеристиками задачи. Иными словами, необходимо учитывать, что сложность задачи определяется не только объёмом информации и его соотношением с пределом Бремермана. На практике широко распространены варианты задач, которые укладываются с достаточным запасом в предел Бремермана, но, тем не менее, оказываются неразрешимыми с практической точки зрения.

Поэтому при решении сложных прикладных системных задач важно оценить алгоритмическую разрешимость задачи, так как на практике разрешимость существенно зависит не только от производительности компьютеров, но и от алгоритма решения задачи.

Поэтому в теории алгоритмов используют более точную классификацию задач, в основе которой лежит понятие **алгоритмической сложности**, которая включает в себя **временную** и **пространственную** сложность, которая характеризует **время работы** и используемый алгоритмом **объём памяти** компьютера (основные ресурсы, используемые

алгоритмом). Причём временная сложность является более критичным фактором.

Поясним кратко суть основных понятий. Строго говоря, понятие «алгоритм» является одним из фундаментальных неопределяемых понятий математики. Тем не менее, исторически были предложены различные описательные определения понятия «алгоритм» и, более того, строгими формальными математическими методами была доказана эквивалентность этих определений.

Алгоритм – это метод решения некоторого класса однотипных задач. Процесс решения задачи (работы алгоритма) представляет собой преобразование исходных данных, подаваемых на вход алгоритма, в результат работы алгоритма, то есть в искомое решение задачи.

Пусть n – переменная, характеризующая размерность исходных данных, используемых алгоритмом для решения задачи, а переменная $T(n)$ обозначает соответствующее, максимально возможное, время работы алгоритма для конкретных вариантов задачи рассматриваемого класса задач.

Функцию $T(n)$ называют **временной функцией сложности**.

Существует два основных класса алгоритмов, отличающихся скоростью роста их временных функций сложности.

К первому классу относятся алгоритмы, имеющие полиномиально-временную сложность. Алгоритм имеет **полиномиально-временную сложность**, если его временная функция сложности возрастает примерно как полином.

Формально это означает, что существует некоторая положительная константа $c > 0$, такая, что для любого $n \geq n_{\min}$, где n_{\min} – наименьшая размерность исходных данных для рассматриваемой задачи, выполняется неравенство:

$$T(n) \leq cn^k, \quad (30)$$

где показатель степени k – некоторое натуральное число, не зависящее от n .

Ко второму классу относятся алгоритмы, имеющие экспоненциально-временную сложность. Алгоритм имеет **экспоненциально-временную сложность**, если его временная сложность превосходит полиномиальную.

Формально это означает, что существует некоторая положительная константа $c > 0$, такая, что для любого $n \geq n_{\min}$, где n_{\min} – наименьшая размерность исходных данных для рассматриваемой задачи, выполняется неравенство:

$$T(n) \leq c \cdot 2^{n^k}, \quad (31)$$

где показатель степени k – некоторое натуральное число, не зависящее от n .

Алгоритмы, имеющие полиномиально-временную сложность, работают быстрее и существенно лучше реагируют на увеличение мощности компьютера (число операций, выполняемых компьютером в единицу времени); являются более эффективными по сравнению алгоритмами, имеющими экспоненциально-временную сложность.

Поэтому полиномиальные алгоритмы называют «хорошими», практически эффективными, а экспоненциальные алгоритмы, как высокочрезмерно затратные, считают «плохими».

Сложность задачи – это наименьшая из сложностей алгоритмов её решения.

Задачи, алгоритмически разрешимые за полиномиальное время, относят к **классу задач**.

Примеры таких задач: поиск элемента в некотором множестве; задача о существовании пути в графе (задача о связности графа); транспортная задача и другие.

Пример. Транспортная задача. Общая постановка задачи заключается в определении оптимального плана перевозок некоторого однородного груза из пунктов отправления (или пунктов производства) A_1, \dots, A_m в пункты назначения (или пункты выдачи заказа) B_1, \dots, B_n . Критерий оптимальности – стоимость перевозки либо время доставки груза.

Пусть в качестве критерия оптимальности E используется стоимость перевозки всего груза. Обозначим через c_{ij} тарифы перевозки единицы груза из пункта отправления i в пункт назначения j .

Обозначим через a_i запасы груза в i -м пункте отправления, через b_j – потребности груза в j -ом пункте назначения, а через x_{ij} – количество единиц груза, перевозимого из пункта отправления i в пункт назначения j .

Тогда исходная содержательная постановка транспортной задачи допускает формализацию в виде следующей математической модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j (j = \overline{1, n}) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i (i = \overline{1, m}) \\ x_{ij} \geq 0, (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}) \end{array} \right. \quad (32)$$

Эта задача относится к классу задач линейного программирования и может быть решена симплекс-методом, либо специальными методами, разработанными в теории принятия решений (исследовании операций) для решения транспортной задачи.

Данная задача и её обобщения имеют широкое практическое применение, в частности, в сфере авиационных пассажирских и грузовых перевозок в мире, а с учётом глобального характера сети авиационных маршрутов (рис. 9) при соответствующих усложнениях рассматриваемая задача уже выходит за пределы исследования операций и

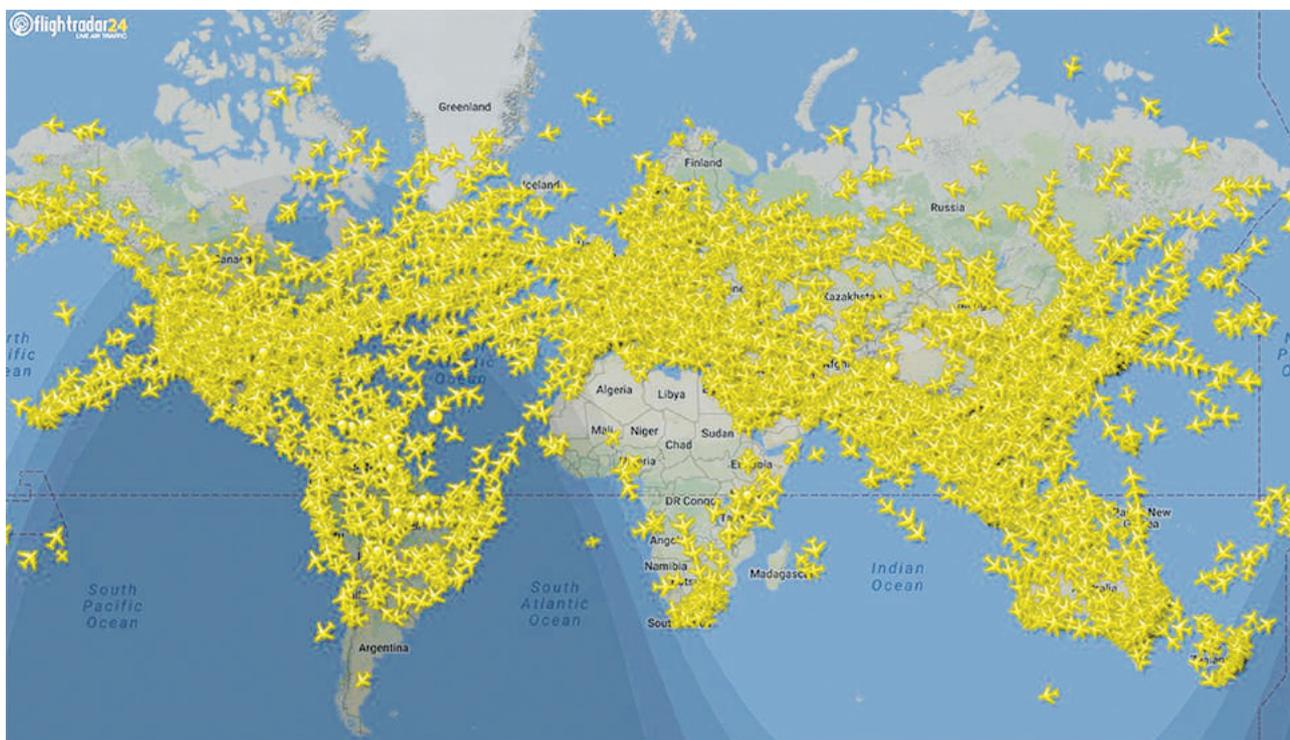


Рис. 9. Глобальный характер сети авиационных маршрутов

становится сложной системной задачей, требующей применения системного подхода и скоординированного взаимодействия математиков, программистов, авиационных специалистов, экономистов.

А соединение частных представлений отдельных узких специалистов в единое, системно-согласованное, целостное видение проблемы реализует группа системных аналитиков.

Задача называется **трудноразрешимой**, если для неё не существует разрешающего полиномиального алгоритма. Алгоритмы решения таких задач, как правило, требуют полного перебора, то есть 2^n вариантов и, соответственно, имеют экспоненциальную временную сложность. К классу трудноразрешимых задач относится большое число задач алгебры, теории графов, теории автоматов, распознавания образов и других разделов математики, имеющих важное прикладное значение в системном анализе.

Для большинства прикладных задач неизвестно, существует ли алгоритм их решения за полиномиальное время, и вместе с тем не доказано, что они не поддаются решению за полиномиальное время. Если для такой задачи существует **недетерминированный полиномиально-временной алгоритм**, то есть алгоритм, позволяющий проверить правильность предложенного решения рассматриваемой задачи за полиномиальное время, то говорят, что задача относится к **классу NP**.

Примеры таких задач: задача о выполнимости булевой формулы, задача коммивояжёра, задача о рюкзаке и другие.

Пример. Задача о рюкзаке. Классическая задача о рюкзаке имеет следующую постановку. Пусть есть N разных предметов, каждый из которых имеет вес v_n и полезность c_n . Но вместимость рюкзака ограничена максимально допустимым весом V , который выдерживают лямки рюкзака. Требуется собрать в рюкзак такой набор предметов, чтобы максимизировать суммарную полезность.

Математическая формализация данной задачи имеет вид следующей оптимизационной модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^N c_n x_n \rightarrow \max \\ \sum_{n=1}^N v_n x_n \leq V \\ x_n \in \{0, 1\}, n = 1, \dots, N \end{array} \right. \quad (33)$$

То есть задача о рюкзаке является примером задач целочисленного линейного программирования с булевыми переменными x_n (в классической постановке числа v , c_n , V полагают целыми).

Существует несколько модификаций задачи:

- каждый предмет можно брать только один раз;
- каждый предмет можно брать сколько угодно раз;
- каждый предмет можно брать определённое число раз;
- заданы ограничения на размер рюкзака;
- некоторые вещи имеют больший приоритет, чем другие;
- многомерные обобщения задачи о рюкзаке;
- нечётко описанные ограничения.

Несмотря на свою «древность», в настоящее время интерес к задаче о рюкзаке возрастает, поскольку в настоящее время различные её модификации широко применяются на практике в прикладной математике, криптографии, экономике, логистике для нахождения решения оптимальной загрузки различных транспортных средств: самолётов, кораблей, железнодорожных вагонов и так далее. Ведь оптимальная загрузка транспорта помогает сокращать расходы и получать большую прибыль.

В частности, задача о рюкзаке является актуальной в МЧС России в связи с оптимальным перераспределением СВФ (спасательных воинских формирований) в мирное и военное время, а также с оказанием гуманитарной помощи в зонах чрезвычайных ситуаций и катастроф.

Основная проблема решения данной задачи обусловлена тем, что задача о рюкзаке является полной, то есть для неё не найден полиномиальный алгоритм, позволяющий решать эту задачу при больших значениях N за разумное время.

Либо мы выбираем быстрый (жадный) алгоритм, но, как известно в теории принятия решений, такой алгоритм не гарантирует оптимальность полученного решения.

Либо используем точный алгоритм, основанный на идее полного перебора всевозможных комбинаций предметов, а такой алгоритм требует слишком больших временных затрат при больших значениях N , то есть неприемлем с практической точки зрения.

Методы решения задачи о рюкзаке можно разделить на два класса: точные и приближённые. К точным относятся: полный перебор; метод

ветвей и границ (сокращение полного перебора); применение динамического программирования. А к приближённым относятся: жадный алгоритм; генетические алгоритмы; алгоритмы муравьиной колонии и другие биоинспирированные алгоритмы.

Выбор использования того или иного метода представляет собой спорный вопрос, всё зависит от постановки конкретной задачи, а также от поставленных целей.

Так, если требуется найти точное решение, то конечно необходимо использовать точные методы. При незначительных N (около 10–20) подойдёт перебор методом ветвей и границ в силу простоты компьютерной реализации, тогда как при больших значениях N рационально использовать метод динамического программирования.

Если же точность решения не так важна или исходные данные таковы, что ни один из методов неработоспособен, то приходится применять только приближённые алгоритмы.

В целях ускорения процесса получения решения вполне возможно комбинировать различные методы, а также в конкретных вариантах задачи применять какие-либо уловки, основанные на эвристических соображениях.

В теории алгоритмов известно, что любая задача разрешима за экспоненциальное время.

Каждая задача класса P принадлежит одновременно и к классу NP , то есть имеет место следующее теоретико-множественное включение классов:

$$P \subset NP. \quad (34)$$

Более 30 лет назад была сформулирована проблема: совпадают ли классы P и NP или нет?

К сожалению, эта проблема не решена до сих пор. В целях упрощения понимания формулировки данной проблемы приведём следующий пример.

Пример. Предположим, что вы заходите в кафе и ищете своего друга. Если вам скажут, что он сидит за крайним столиком слева, вы легко сможете проверить, так ли это. Означает ли это, что можно построить алгоритм, с помощью которого вы смогли бы быстро отыскать своего друга без подобной подсказки? Другими словами, можно ли решить задачу столь же быстро, как и проверить какое-то предложенное

решение на правильность? На удивление, ответ на этот вопрос вовсе не так очевиден, как кажется.

Несмотря на то, что вычислительная (алгоритмическая) сложность, как правило, выражается через время, необходимое для выполнения алгоритма, бывает важно оценить и объём памяти компьютера, необходимый для решения задачи. Соответствующую сложность называют пространственной.

Известно, что любая задача, разрешимая за полиномиальное время, является разрешимой в полиномиальном пространстве. Однако из этого утверждения вовсе не следует, что, если задача разрешима в полиномиальном пространстве, то она разрешима за полиномиальное время.

Именно поэтому для разделения задач на разрешимые и трудно-разрешимые используется временная сложность. Однако в практике решения сложных прикладных системных задач важно учитывать оба эти условия.

2.8. Пути преодоления трансвычислительной сложности

Как правило, вычислительная сложность прикладных задач системного анализа на несколько порядков превышает предел Бремермана.

Существует **три направления преодоления трансвычислительной сложности** [5]:

1. Рациональная формулировка задачи.
2. Рациональная организация вычислительного процесса.
3. Рациональный выбор вычислительных средств.

В основе каждого из выделенных направлений лежит **принцип рациональности**, что вполне оправдано в силу противоречивости основных требований, усилий и целей, характерных для сложных прикладных задач.

В таких задачах принцип рациональности является единственным реальным фундаментом достижения практически приемлемого решения. Поэтому данный принцип лежит в основе методологии системного анализа.

Рациональность – это свойство процедуры выбора альтернатив, позволяющих без избыточных затрат ресурсов достичь компромисса целей.

Выделяют различные виды рациональности, в частности: техническую, социальную, экономическую, технологическую, эксплуатационную, эргономическую, эстетическую, юридическую, информационную и другие.

Концептуальная рациональность – это единый комплекс различных типов рациональности, системно согласованных между собой для достижения единой цели. Это достигается единством замысла и механизма его реализации и обеспечивается системным согласованием задач, сроков, ресурсов и ожидаемых результатов взаимодействия всех видов рациональности. Поэтому концептуальная рациональность может интерпретироваться как **мультирациональность** или **метарациональность**.

Таким образом, целесообразными **областями применения принципа рациональности** являются:

1. Рациональное ограничение множества анализируемых свойств, факторов, состояний и ситуаций.
2. Рациональное ограничение множества альтернативных вариантов решения.
3. Рациональный выбор инструментария системного анализа.

Вместе с тем следует помнить, что **прикладные системные задачи** характеризуются определёнными **особенностями**, в частности:

1. Принципиальная неформализуемость общей задачи в силу необходимости неформализуемого выбора целей системного анализа, критериев достижения целей и ряда других факторов.
2. Уникальность каждой прикладной задачи системного анализа в силу уникальности целей задачи, уникальной структуры каждой сложной системы, условий её разработки, производства, эксплуатации, а также уникальности нештатных, критических и чрезвычайных ситуаций.

Поэтому **основная идея преодоления трансвычислительной сложности** состоит в выполнении определённой последовательности процедур **целенаправленного сокращения мощности множества анализируемых вариантов** путём отбора по различным критериям или ограничениям для последующего анализа только подмножества

рациональных вариантов и исключения из дальнейшего анализа неперспективных и нерациональных.

Реализация этой идеи проводится в **три этапа**:

1. Рациональная формализация системной задачи.
2. Рациональный выбор вычислительного процесса системного анализа.
3. Рациональный выбор вычислительных средств системного анализа.

Необходимость рационального подхода на каждом из указанных этапов определяется наличием противоречий на всех этапах системного анализа и при решении каждой задачи, входящей в концептуальное функциональное пространство условий функционирования исследуемого объекта и в концептуальное функциональное пространство свойств объекта.

Например, при формализации системной задачи необходимо разрешить **противоречие между уровнем достоверности и обоснованности полученного решения**, с одной стороны, и **уровнем сложности задачи**, с другой стороны.

Здесь, с одной стороны, для повышения уровня достоверности и обоснованности решения, необходимо повышать уровень полноты и достоверности исходной информации для системного анализа, в частности, принимать в расчёт не только количество учитываемых факторов, но и число параметров, характеризующих каждый фактор.

Но, с другой стороны, с ростом количества факторов и числа показателей растёт размерность конкретного варианта формулировки системной задачи и, как следствие, возрастает вычислительная сложность задачи и по полиномиальному либо экспоненциальному закону возрастает сложность алгоритма, реализующего решение данного варианта системной задачи. Следовательно, увеличивается время выполнения алгоритма.

Поэтому для **уменьшения сложности системной задачи необходимо уменьшать количество факторов и показателей**.

Кроме того, выбор метода решения прикладной системной задачи зависит от её математической постановки, а выбор алгоритма и его программной реализации определяет требования к вычислительным средствам.

В целях преодоления трансвычислительной сложности широко применяется **принцип системной декомпозиции** исходной задачи, реализуемый на основе концептуальной рациональности.

Системная декомпозиция реализуется в двух аспектах: в концептуально-функциональном и структурно-функциональном.

Первичной является концептуально-функциональная декомпозиция исходной системной задачи на подзадачи функционального концептуального пространства условий функционирования сложной системы и концептуального пространства свойств структуры сложной системы.

Каждое из рассматриваемых пространств состоит из трёх частных подзадач системного анализа, основанных на целевом, ситуационном, информационном анализе (пространство условий функционирования системы) и структурно-функциональном, организационно-процедурном и технико-экономическом анализе (пространство свойств системы), соответственно.

Дальнейшая реализация процедуры декомпозиции выполняется отдельно для каждого концептуального функционального пространства.

Например, структурно-функциональная декомпозиция сложной технической системы сводится к следующей последовательности подзадач:

1. Формирование и анализ допустимого множества принципов действия сложной технической системы, выбор принципа функционирования на основе концептуальной рациональности.

2. Формирование и анализ допустимого множества структур сложной технической системы для принятого принципа функционирования.

3. Выбор рациональной структуры.

Последующие частные задачи, исходя из приёмов их реализации, являются однотипными и могут быть описаны в виде двухуровневой иерархии, на первом уровне которой осуществляются формирование и анализ допустимого множества структурно-функциональных элементов, а на втором уровне реализуется выбор рационального структурно-функционального элемента.

Таким образом, главным методологическим приёмом преодоления трансвычислительной сложности прикладных системных задач является системная декомпозиция исходной задачи на последовательность более простых подзадач.

Такой подход, в основе которого лежит **принцип декомпозиции и агрегирования**, позволяет:

1) рационально использовать возможности системы «человек-эксперт» и вычислительных процедур, в том числе основанных на интеллектуальных системах поддержки принятия решений;

2) рационально организовать итерационный процесс системного анализа на основе рациональной декомпозиции требований «сверху-вниз» и далее реализовать агрегирование полученных результатов «снизу-вверх».

Контрольные вопросы

1. В чём проявляется сложность систем, среды и системных задач? Почему многие исследователи говорят о сложности как о наиболее фундаментальной категории теории систем и системного анализа?

2. Раскройте суть принципов: необходимого разнообразия (Эшби), хрупкости хорошего (Арнольд), минимума (Богданов). Приведите соответствующие примеры.

3. Чем сложные задачи отличаются от трудных по Клиру? Приведите примеры.

4. В чем состоит основное различие между понятиями «система» и «сложная система»? В чём проявляется динамическая сложность среды?

5. Охарактеризуйте основные классы прикладных системных задач с точки зрения спектра их сложности.

6. Сформулируйте математическое определение понятия «энтропия» и поясните ее содержательный смысл.

7. Раскройте суть принципа несовместимости и рациональности

8. Опишите основные подходы к оценке сложности систем.

9. Сформулируйте определение предела Бремермана и задач трансвычислительной сложности. Каковы возможные пути преодоления трансвычислительной сложности системных задач?

10. Дайте определения основных классов алгоритмической сложности прикладных системных задач.

Литература

1. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 540 с.
2. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1960. 434 с.
3. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М.: Наука, 1990. С. 30–31.
4. *Богданов А.А.* Всеобщая организационная наука, или тектология. В 3 т. М., 1913–1929.
5. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011, 729 с.

3. Системный анализ как прикладная научная методология

3.1. Системность как всеобщее свойство реальности

Аспект 1. Системность как латентное свойство. Категория «системность» отражает латентное, то есть скрытое, недоступное для непосредственного наблюдения и измерения, свойство реальности.

Аспект 2. Фундаментальность и тесная взаимосвязь категорий «системность» и «сложность». Системность тесно связана с фундаментальным свойством, актуализировавшим практическую необходимость становления и развития теории систем и системного анализа. Это свойство – сложность.

Стремясь объяснить сложность, мы неизбежно будем погружаться в системность. И, наоборот, стремясь объяснить системность, мы неизбежно будем погружаться в сложность.

Более того, именно **повышенная сложность прикладных междисциплинарных проблем актуализирует необходимость использования для их решения методов системного анализа.**

В самом деле, реальность – среда, в которой живёт человек, усложняется. В своей практической деятельности человек взаимодействует со средой. В частности, усложняется техносфера, растут риски угроз.

Как следствие такого сложного, многофакторного взаимодействия, человек неизбежно сталкивается с качественно новыми, уникальными, сложными проблемами – прикладными системными задачами.

Так, принятие решений в сложных системах актуально в государственном управлении, стратегическом программно-целевом планировании, проектном менеджменте, обороне, медицине, образовании и других отраслях экономики.

В частности, в деятельности МЧС России актуальными задачами являются комплексная защита населения и территорий от ЧС, в том числе путём создания новых роботизированных средств спасения в ЧС, обеспечение комплексной безопасности на потенциально опасных и критически важных объектах инфраструктуры, экологический и космический мониторинг, транспортная задача, реализуемая в условиях

оказания гуманитарной помощи, оптимизация распределения сил и средств, повышение эффективности деятельности территориальных подсистем РСЧС в условиях глобального изменения климата и другие.

Сложность таких задач принципиально превышает сложность задач традиционных дисциплин, так как системные задачи характеризуются междисциплинарным характером, противоречивыми целями, ограниченными ресурсами, а также действием множества факторов неопределённости и рисков.

Возникает диалектическое противоречие между повышенной сложностью системных задач и недостаточно эффективным имеющимся научным инструментарием их решения.

Именно это противоречие выступает той движущей силой, которая актуализирует необходимость использования системного мышления и системного подхода, лежащих в основе прикладного системного анализа.

Аспект 3. Системность в узком смысле. В узком смысле системность является таким многогранным свойством практической деятельности человека, которое определяет эффективность и результативность его субъективного взаимодействия с объективным окружающим миром в процессе решения конкретных практических задач [1].

Аспект 4. Системность в широком смысле. В широком смысле системность есть структурная взаимосвязь и целенаправленное взаимодействие материальных объектов и их частей [1].

В этом смысле системность является глобальным свойством Вселенной, которое выражается как всеобщее свойство материи в масштабе Вселенной, в том числе неживого, живого мира и цивилизации Земли.

Аспект 5. Универсальность. Современные научные данные и современные системные представления позволяют говорить о мире как о сверхсложной иерархической суперсистеме, то есть системе систем, в которой отдельные части находятся в развитии, на разных стадиях развития и на разных уровнях иерархической организации Вселенной.

Таким образом, **системность является всеобщим свойством реальности, причём как объективной (материи), так и субъективной (сознания).**

Выше мы говорили о том, что, чем больше человек овладевает идеями системности, тем более сложным и загадочным для него становится этот феномен, ведь по своей природе системность является

латентным, непосредственно неизмеримым свойством, тесно связанным с категорией сложности; «наши интерпретации понятия «сложность» почти столь же разнообразны, как и сама сложность».

Проявление системности бесконечно многообразно. В соответствии с данной схемой, представленной на рис. 10, выделим лишь **три основных аспекта проявления системности** [2]:

- системность среды, окружающей человека;
- системность познавательной деятельности;
- системность практической деятельности.

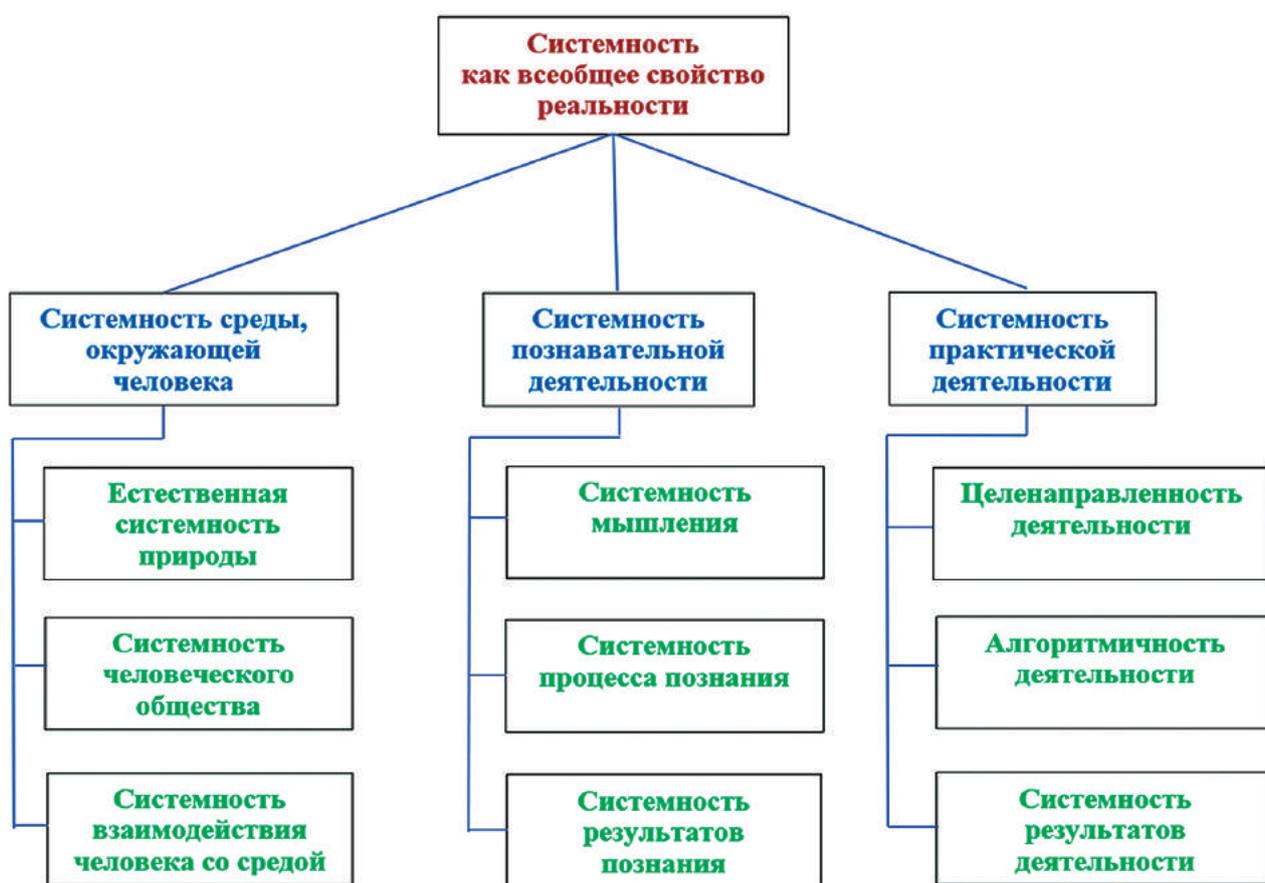


Рис. 10. Основные аспекты проявления системности

В свою очередь, **системность среды**, окружающей человека, выражается в естественной системности природы, системной организации человеческого общества и системно организованном взаимодействии человека со средой.

Системность познавательной деятельности проявляется в системности мышления как высшего психического процесса, системности процесса познания и системности результатов познания.

Системность практической деятельности человека определяется целенаправленностью деятельности, алгоритмичностью деятельности и системностью результатов деятельности, соответственно.

3.2. Подходы к классификации систем и их математических моделей

Существуют различные классификации сложных систем разной природы и их упрощённого формализованного описания, то есть представления систем в виде математических моделей.

Мы рассмотрим лишь наиболее общие классы систем, названия которых нередко распространяются и на их модели.

В частности, в зависимости от принадлежности исследуемой системы к предметной области той или иной науки традиционно принято выделять системы: **физические, химические, биологические и социальные**.

Также принято различать системы типа **«объект»** и системы типа **«процесс»**. Хотя, такое разделение условное, поскольку процессы происходят в объектах, а исследование систем типа **«объект»** во многом сводится к исследованию динамики процессов, протекающих в объекте.

Кроме того, в зависимости от масштаба системной иерархии выделяют объекты **микромира, макромира и мегамира**.

В свою очередь, процессы бывают **обратимые** и **необратимые**. Как известно из термодинамики, подавляющее большинство процессов, является необратимым (например, денатурация белка), и это является одной из причин однонаправленности и необратимости времени.

Существуют системы **закрытые** и **открытые**. Подавляющее большинство систем является открытыми, то есть активно взаимодействующими с внешней средой, обмениваться с ней разными ресурсами, в том числе, веществом, энергией и информацией. Замкнутые системы изолированы от внешней среды и, в силу статистического роста энтропии (меры хаоса) в таких системах (второе начало термодинамики), они, как правило, быстро разрушаются.

По отсутствию либо наличию динамики различают системы **статические** и **динамические**, соответственно (рис. 11).

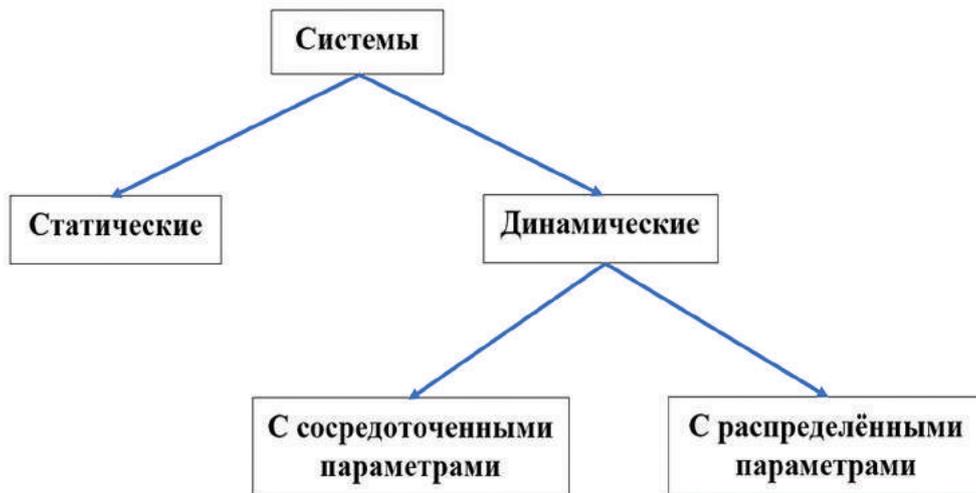


Рис. 11. Упрощённая классификация систем

Примерами математических моделей статических систем являются системы алгебраических уравнений, в частности, уравнение наблюдателя в методе пространства состояний, оптимизационные модели, некоторые модели систем на графах и т.п.

Динамика систем во времени может быть непрерывной либо дискретной.

Поэтому различают **непрерывные системы**, эволюционирующие в непрерывном времени, а также **дискретные системы**, эволюционирующие в дискретном времени.

Примерами математических моделей динамических систем являются дифференциальные и разностные уравнения и системы уравнений. Причём дифференциальные уравнения позволяют моделировать динамику систем в непрерывном времени, а разностные уравнения – в дискретном времени, соответственно.

В свою очередь, по характеру динамики поведения динамических систем различают **линейные** динамические системы и **нелинейные** динамические системы.

Простейшим примером линейной системы является известный из курса физики гармонический осциллятор (математический маятник).

Важным подклассом в классе нелинейных систем являются **развивающиеся** системы, а также нелинейные волновые процессы, такие как биение человеческого сердца и другие.

Также различают **системы с сосредоточенными параметрами**, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями

(которые содержат производные переменных лишь по времени), и **системы с распределёнными параметрами (распределённые системы)**, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных как по времени, так и по пространственным координатам. Распределённые системы чаще всего возникают в задачах математической физики.

Кроме того, различают системы **стационарные** (динамика которых инвариантна по отношению к сдвигам во времени начального состояния) и **нестационарные**, а также системы **консервативные** (сохраняющие энергию) и **диссипативные** (рассеивающие энергию).

Наконец, в соответствии с рассмотренным ранее **спектром сложности** различают **простые** и **сложные** системы, подразделяющиеся, в свою очередь, на **неорганизованно сложные** и **сложно организованные**.

Сложно организованные системы, как мы знаем, представляют наибольший интерес для системного анализа, поскольку такие системы крайне востребованы в практической деятельности человека, охватывают большую часть спектра сложности, а соответствующие прикладные системные задачи, в силу их уникальности и повышенной сложности, наименее обеспечены в методологическом плане.

3.3. Некоторые общие системные свойства

Как известно, важнейшим свойством любой системы является её **целостность**, которая, в свою очередь, непосредственно связана с таким важным системным свойством как **супераддитивность** или, что то же самое, **эмерджентность (эмергентность)**, в соответствии с которым свойства целого отличаются от совокупности свойств частей, образующих единое целое.

Эмерджентность, в свою очередь, обуславливается наличием системных связей, обеспечивающих согласованное взаимодействие и взаимное влияние частей, образующих целостное единство. Такое согласованное взаимодействие частей, образующих целое, называется **синергией**.

В частности, в сложно организованных активных системах важнейшими эмерджентными свойствами становятся **целенаправленность** и **целеустремлённость**, которые мы рассмотрим подробнее далее.

Открытость систем означает их активное взаимодействие с внешней средой, в котором реализуется обмен между системой и средой различными ресурсами, в частности веществом, энергией и информацией.

Линейность или **нелинейность** – свойство, характеризующее динамику системы. Подавляющее большинство динамических систем, особенно процессы развития, нелинейно.

Адаптивность – приспособляемость систем к изменениям условий внешней среды. Хорошим примером адаптивных систем являются биологические системы, особенно тараканы, устойчиво адаптирующиеся к действию даже сильнодействующих ядовитых веществ.

Гомеостаз – свойство сложных нелинейных, как правило, неравновесных систем стремиться к динамическому равновесию, то есть установившемуся режиму. В линейных системах равновесие может быть лишь статическим, а в нелинейных чаще реализуется динамическое равновесие.

Инерционность – запаздывание реакции системы по отношению к входному возбуждающему воздействию (сигналу управления).

Важным структурным свойством сложных систем является **наличие замкнутых контуров обратной связи**.

Эквифинальность (в дословном переводе «экви» – равный, «финал» – конец) – это свойство развивающихся систем, в соответствии с которым эти системы независимо от своего начального состояния, траектории эволюции, внешних и внутренних факторов, влияющих на эту траекторию, всё равно в конечном итоге приходят в одно и то же конечное состояние. Например, для подавляющего большинства живых организмов, в частности, человека, таким эквифинальным состоянием является смерть.

Кроме того, в кибернетике (теории управления) выделяют такие важные свойства динамических систем, как **многомерность** пространства состояния, **многосвязность** (многоканальность, многомерность пространства входов и пространства выходов), **устойчивость** и **неустойчивость** структуры системы и системной динамики, **минимальная** и **неминимальная фазность**, **управляемость**, **наблюдаемость**, **идентифицируемость**, **линейность** и **нелинейность**, **стационарность** и **нестационарность** и др.

Детерминированность динамики – свойства, характеризующие априорную предопределённость эволюции системы и, соответственно, предсказуемость динамики. Полностью детерминированными являются лишь просто организованные системы, причём рассматриваемые в идеальных условиях отсутствия внешних шумов и других факторов неопределённости, например, камень, брошенный под углом к горизонту. В таких задачах горизонт прогнозирования неограничен.

Недетерминированность динамики предполагает учёт действия факторов неопределённости.

Неопределённость является одним из важнейших факторов сложности. Неопределённость обусловлена следующими факторами:

- **стохастичность, случайность** – шумы, возмущения, флуктуации;
- **большая размерность** системы;
- **нечёткость** – лексическая неопределённость;
- **концептуальная** неопределённость (целевая, ситуационная, информационная);
- **детерминированная существенной нелинейностью** динамики (например, процессы развития).

Большинство реальных систем является лишь **частично детерминированными**. Причём в неорганизованно сложных системах, изучаемых в статистической физике, горизонт прогнозирования динамики отдельных частиц отсутствует. А в организованно сложных системах горизонт прогнозирования считается ограниченным. Хотя, сложно прогнозировать, например, оценку, которую получит студент на экзамене.

Многомерность – большая размерность системы (пространства состояний системы).

Многосвязность – свойство связанности каналов входов и выходов.

Иерархичность структурной организации сложной системы означает возможность концептуального описания системы в форме иерархии.

3.4. Системный взгляд на объект исследования

Любые реальные объекты обладают практически бесконечным набором собственных свойств и свойств различных видов взаимосвязей и взаимодействий с другими объектами и окружающей внешней средой. Любое из этих свойств или их определённую совокупность можно

вполне осмысленно изучать, но практически любой реальный объект невозможно изучить полностью.

Более того, изучение многих свойств сложного объекта может оказаться ненужным или даже бессмысленным с точки зрения цели исследования. То есть в каждом конкретном исследовании, в зависимости от поставленной цели, требуется из всего многообразия свойств, характеристик и показателей объекта выбрать ограниченное и достаточно малое их число, но такое, которое достаточно полно описывает исследуемый объект вместе с учётом его внутренних и внешних взаимосвязей в интересах достижения поставленной цели исследования.

Таким образом, объект исследования есть часть реального мира, которую можно рассматривать в течение всего её жизненного цикла как единое целое с точки зрения достижения целей исследования, поставленных в определённых условиях.

Но цели и ожидаемые результаты, даже при одинаковых условиях, **разные исследователи могут понимать по-разному**, в силу действия субъективных факторов, в качестве которых могут выступать:

- индивидуальные психометрические характеристики исследователя;
- уровень знаний, навыков и опыта исследователя;
- умение предвидеть будущее и создавать гипотезы, использовать интуицию при решении поставленных задач в условиях неопределённости, неполноты, неточности и противоречивости исходной информации, а также нечёткости формулировки условий, критериев, свойств и показателей.

Это означает, что **решение системных задач сопряжено с определённой долей субъективизма**, поскольку **процедура формирования условий, показателей и критериев для таких задач является принципиально неформализуемой** и выполняется субъективно исследователем на основе собственных знаний, опыта и интуиции.

Неформализуемость, неопределённость, нечёткость исходной информации и ряд других важнейших особенностей практической деятельности человека определяют целесообразность рационального совмещения в системном анализе как интуиции, творчества и опыта исследователя, так и объективных знаний цивилизации и вычислительных возможностей компьютеров.

3.5. Краткая характеристика системного мышления

История развития системного анализа и системных исследований объективно обусловлена **ускорением темпа роста сложности** взаимодействия человека с окружающим миром, в частности, с существенным усложнением техносферы.

Характерными особенностями таких систем являются их организованная сложность, неформализуемость ряда процессов, протекающих в системе, неопределённость внешних условий, неполнота, неточность, нечёткость исходной информации, возможность появления в процессе функционирования нештатных, критических и чрезвычайных ситуаций.

Причём тенденция роста сложности проявляется не только в естественных системах, но и в искусственных, а также в экономико-организационных системах, созданных в процессе практической деятельности человека.

В складывающихся условиях построение целостной картины мира невозможно без задействования системного подхода, в основе которого лежит системное мышление.

Системное мышление – это высшая форма научного познания, в которой процессы отражения объективной реальности базируются на целостном (комплексном) представлении исследуемого объекта (системы) с позиции достижения поставленных целей исследования на основе знаний, опыта, интуиции и предвидения. Принципиально важным в данном определении является зависимость границ исследуемой системы от целей исследования.

Системное мышление позволяет аналитику строить **целостную** картину (представление) сложной проблемы, исследуемой с точки зрения достижения поставленных целей, в условиях имеющихся ресурсных ограничений и действия множества факторов неопределённости и рисков разной природы.

В соответствии с представлениями Д.Ю. Каталевского, изложенными в [3], **системное мышление** базируется на трёх важнейших составляющих:

Аспект 1. Контекстная обусловленность.

Аспект 2. Безэмоциональность.

Аспект 3. Операционное мышление.

Аспект 1. Контекстная обусловленность означает, что системное мышление не может не учитывать контекст в самом широком смысле этого слова – экономический, политический, социально-культурный, исторический и др.

Пример. Китайская стратагема «Открытые ворота» [4].

Советник Кун Мин, прозванный также Чжуге Ляном, был послан с пятью тысячами солдат в Сичэн, чтобы перевезти находившиеся там припасы в Ханьчжун. Там к нему вдруг начало прибывать один за другим более десятка гонцов, скакавших во весь опор. Они сообщили, что вражеский военачальник Сыма И из государства Вэй вступает в Сичэн с подобным осеннему рою войском в 150 тысяч человек. К этому времени при советнике Кун Мине не было уже ни одного военачальника, лишь штаб из штатских чиновников. Из пяти тысяч солдат половина уже отбыла из Сичэна вместе с припасами. В городе оставалось не более двух с половиной тысяч солдат. Когда чиновники услышали это известие, лица их побледнели от ужаса. Советник Кун Мин поднялся на городскую стену и обозрел окрестности. И вправду, у горизонта небо было закрыто клубами пыли. Огромное войско вражеского военачальника Сыма И приближалось. Советник Кун Мин приказал: «Снимите и спрячьте флаги и знамена с городской стены! Каждый воин пусть находится на своем посту! Сохраняйте тишину; ослушник, подавший голос, будет обезглавлен. Все четверо городских ворот распахнуть настежь! Пусть у каждых ворот подметают улицу двадцать солдат, переодетых горожанами. Когда подойдет войско Сыма И, пусть никто не действует самовольно. У меня есть для этого случая стратагема».

Затем Кун Мин накинул плащ из журавлиных перьев, надел коническую шелковую шапку и отправился на городскую стену в сопровождении двух оруженосцев, захватив с собой цитру с гнутой декой, и там уселся прямо на парапет одной из наблюдательных башен. Возжегши курение, он начал играть на цитре.

Между тем разведчики авангарда генерала Сыма И достигли городской стены и увидели все это. Никто из разведчиков не решился пройти дальше. Спешно вернулись они к Сыма И и сообщили об увиденном. Сыма И недоверчиво рассмеялся. Затем он приказал войскам остановиться. Сам он поехал вперед на быстрой лошади, чтобы издали посмотреть на город. И впрямь, там он увидел советника Кун Мина,

который сидел на сторожевой башне городской стены с радостной улыбкой на лице и играл на цитре с гнутой декой среди дымков от курящихся благовоний. Слева от него стоял оруженосец, который обеими руками держал драгоценный меч, справа – оруженосец с волосяным опахалом.

В проходе городских ворот и перед ними виднелось около двадцати простолудинов, которые с опущенными головами невозмутимо подметали дорогу. Когда Сыма И разглядел все это, он пришел в сильное смущение. Он вернулся к своему войску, приказал авангарду и арьергарду поменяться местами и повернул на север, в направлении лежащих там гор. Его второй сын, Сыма Чжао, по дороге проговорил: «Наверняка у Чжугэ Ляна не было воинов, потому он и разыграл эту сцену. Отец, почему вы отвели войско?» Сыма И отвечал: «Чжугэ Лян известен своей предусмотрительностью и осторожностью. Еще никогда он не предпринимал ничего рискованного. Сегодня ворота города были широко открыты. Это определенно указывает на подвох. Если бы мои войска вступили в город, они, конечно, пали бы жертвой стратагемы. Предпочтительно было побыстрее отступить».

И все войско Сыма И ушло. Кун Мин увидел, как вражеские отряды исчезают вдаль. Он рассмеялся и захлопал в ладоши. Все чиновники, бывшие с ним, были озадачены. Они спросили Кун Мина: «Сыма И – знаменитый военачальник государства Вэй. Сегодня он привел сюда 150 тысяч отборных воинов, увидел вас, советника Шу-Хань и поспешно отступил. По какой причине?»

Кун Мин отвечал: «Этот человек исходил из того, что я стараюсь вести себя предусмотрительно и осторожно и никогда не рискую. Увидев такую картину, он решил, что у меня множество воинов сидит в засаде. Поэтому он отступил. Вообще меня смущают отчаянные предприятия, но сегодня я искал спасения в таких действиях, так как не имел выбора».

Все чиновники в изумлении склонили головы и воскликнули: «Стратагему советника не удалось бы разгадать даже привидению! Если бы не он, мы должны были бы просто сдать город и спасаться бегством!»

Кун Мин сказал: «У меня ведь было только 2500 воинов. Если бы мы оставили город и бежали, конечно, далеко бы мы не ушли. Сыма И взял бы нас в плен».

В позднейшие времена было написано стихотворение, восхвалявшее это деяние: «Цитра с гнутой декой, украшенная нефритом, длиною в три фута победила отборное войско, когда Чжугэ Лян в Сичэне повернул врагов вспять. Поныне местные жители показывают это место. Там 150 тысяч человек повернуло коней».

Вопрос. Как повел бы себя на месте китайского полководца человек другой национальности и культуры? Повернул бы назад, увидев открытые ворота, например, древнеславянский князь или древнеримский полководец? Верно ли, что данная стратагема сработала бы только в китайской среде, весьма существенно отличающейся от славянской, европейской, американской культур?

Пример. Среди экспертов-историков Второй мировой войны есть мнение, что одним из ключевых факторов поражения Японии в войне стала быстрая гибель профессиональных военных летчиков, многие из которых стали камикадзе [3].

Оказывается, процедура отбора в камикадзе среди опытных летчиков и необученных новичков значительно отличалась. Так, начинающие летчики могли подать заявление о приеме в отряд смертников по собственной инициативе. Документы свидетельствуют, что количество желающих позволяло даже проводить достаточно строгий отбор кандидатов.

В первую очередь принимали отличников, однако избегали брать старших сыновей в семье, поскольку тем надлежало продолжать семейный бизнес.

Иной была процедура для опытных летчиков. Среди них распространяли анкеты с вопросом типа: «Хотите или не хотите вы стать камикадзе? Ненужное зачеркнуть». Отбирали тех, кто выбирал первый вариант.

И вот здесь как раз необходимо учитывать национальный менталитет (в нашем понимании – контекст). Умереть, если это потребуется, в Японии традиционно считалось долгом мужчины (уместно вспомнить культ смерти у самураев, хорошо показанный во многих японских фильмах). Анкеты были именными, и подписаться под нежеланием стать самоубийцей фактически было равносильно тому, чтобы публично объявить себя трусом. Естественно, мужественные летчики массово выбирали первый вариант.

Приведенные примеры показывают, что очень часто без понимания контекста невозможно корректно проанализировать ситуацию и сделать верные выводы. Важно помнить о том, что недопонимание или недооценка контекста при принятии управленческих решений чревато серьезными ошибками, то есть контекст имеет значение.

Аспект 2. Безэмоциональность системного мышления. Современный руководитель тонет в потоках информации. В результате информационных перегрузок мы зачастую оказываемся не в состоянии рационально осмыслить весь этот массив.

Специалисты подсчитали, что современный человек в день получает больше информации, чем среднестатистический человек эпохи Средневековья за годы жизни. Информационный взрыв, наблюдаемый в последние два десятилетия, в значительной степени влияет на нашу способность рационально осмысливать происходящее, синтезировать информацию и делать корректные выводы.

Один из главных вызовов для руководителя состоит в способности качественно осмысливать информацию, синтезируя из нередко противоречивой мозаичной картинки целостное представление о мире.

Как это ни парадоксально, обратной стороной информационной революции становится тот факт, что постепенно мы скатываемся к **мифологизированному первобытному мышлению**.

Здесь уместно процитировать известного ученого Люсьена Леви-Брюля (1857–1939), французского философа и антрополога, который в качестве **основного критерия** определения **примитивного сознания** отмечал склонность первобытных людей **оперировать эмоциональными понятиями, а не логическими связями**: «Коллективные представления первобытных людей не являются продуктом интеллектуальной обработки в собственном смысле этого слова. Они заключают в себе в качестве составных частей эмоциональные и моторные элементы, и, что особенно важно, они вместо логических отношений подразумевают более или менее четко определенные, обычно живо ощущаемые, «партиципации» (сопричастия)» [5].

Подавляющее большинство современных зарубежных СМИ преподносит нам эмоционально окрашенную информацию. Их главной задачей становится вызвать чувства у читателя. Зачастую, чтобы удержать его внимание, эмоции должны быть как можно сильнее. В частности, многие статьи начинаются с образного описания конкретного

человека в определенной ситуации. Таким образом, в сознании читателя уже запечатлен образ, который позднее трансформируется в символ проблемы. Поскольку яркий символ легко запоминается, в этот момент и происходит незаметное **переключение с критического осмысления события или явления на сопереживательно-эмоциональное**.

Проблема эмоционального стиля мышления, навязываемого нам сегодня, усугубляется также и тем, что до индивидуализированного общества, в котором мы живем, достучаться можно лишь средствами массовой информации. Это значительно сужает сознание человека: оно становится фрагментированным, мозаичным, быстро теряется целостность восприятия. Часто ситуация освещается весьма однобоко. Нетрудно заметить, что **эмоциональное мышление легко поддается всякого рода манипуляциям**.

Между тем у эмоционального мышления есть ряд других, не менее интересных, особенностей.

В частности, одним из побочных результатов эмоционального мышления является постоянное **стремление к легким решениям**. К легким решениям в бытовой сфере, личной жизни, в профессиональном развитии, в бизнесе и государственном управлении. Особенно наглядно это проявляется в бизнес-литературе, которая наперебой предлагает быстрые и удобные «решения» проблем или способы достижения каких-либо целей.

В подобного рода низкокачественной «интеллектуальной жвачке» авторы предлагают читателю простые методы/привычки/шаги к достижению материального благосостояния, успешной карьере и т. п. Легкие решения, предлагаемые авторами, очень заманчивы. Однако в реальности все обычно оказывается далеко не так очевидно.

«Первобытное» мышление современного человека имеет ряд важных последствий.

Во-первых, **эмоциональное мышление ориентирует на краткосрочный результат, сиюминутную выгоду**. Это явление сродни циклу «стимул – реакция» в биологии.

Еще тяжелее последствия эмоционально-мифологического мышления в приложении к сфере государственного управления. Государственные и политические лидеры **перестают видеть перспективу** – вместо тщательной проработки проблемы и беспристрастного анализа путей выхода из сложившейся ситуации звучат популистские лозунги.

Как результат – проблема не получает фундаментального решения, направленного на ликвидацию ее первостепенной причины, оно подменяется симптоматическими решениями, направленными на нейтрализацию последствий (как тут не вспомнить об архетипах систем Питера Сенге).

Во-вторых, **удобство эмоционального мышления** заключается в том, что оно **не требует доказательств или логического обоснования**. В свою очередь, это способствует появлению целого пласта экспертов, аналитиков и, наконец, так называемых гуру от экономики, менеджмента, политики и т. п.

Эмоциональный тип мышления не требует достоверности: необходимость отвечать за свои слова и обосновывать свою точку зрения отпадает. Соответственно, **границы дозволенности исчезают** – теперь даже авторитетному СМИ не зазорно сослаться на мнение блоггера, у которого «в друзьях» несколько тысяч человек. Этот человек становится «экспертом» и зачастую смело берется рассуждать о том, о чем имеет весьма условное представление. А поскольку достоверность подобных рассуждений и прогнозов обычно никто не проверяет, у «экспертов» развязаны руки. Они могут давать любые прогнозы, всякий раз находят успешное ретроспективное объяснение тому, что уже случилось, и без колебаний берутся предсказывать будущее.

Мы живем в обществе, где никто не несет личной ответственности. Первобытное мышление побуждает наш социум воспроизводить «шаманов», «жрецов» и «пифий», уверенно объясняющих нам практически любое явление: от динамики цен на акции до политических хитросплетений, но при этом не собирающихся нести ответственность за свои прогнозы.

Однако для того, чтобы научиться мыслить системно, недостаточно просто избавиться от эмоционального мышления. Фундаментом, на котором основывается системное мышление, является «операционное» мышление.

Аспект 3. Операционное мышление является фундаментом, на котором базируется системное мышление.

Пример. Известный американский специалист по системной динамике **Барри Ричмонд (Barry Richmond)** в одной из своих статей привел замечательный пример квазинаучного подхода к анализу экономических проблем: «...Популярный экономический журнал опубликовал

исследование известного экономиста, который разработал сложную эконометрическую модель, предсказывающую производство молока в США. Модель основывалась на множестве макроэкономических переменных, связанных между собой сложными математическими уравнениями. Но нигде в данной модели не были учтены коровы. Однако если кто-нибудь задумается над тем, каким образом производится молоко, он обязательно обнаружит, что коровы являются совершенно необходимым элементом этого процесса» [6].

Термин «операционное мышление» ввел в оборот Барри Ричмонд, предложив под ним понимать, «...как в действительности системы работают»: «...не как они работают в теории, или же то, как мы подтягиваем немного алгебры для придания реалистичности полученным результатам», а именно понимание того, как обстоит дело в реальности.

Исследователь Камило Олайя детализирует пример с коровами. Со ссылкой на соответствующие научные исследования, посвященные проблемам прогнозирования производства молока, он приводит пример работ, в которых прогнозы строятся на основе сложных математических моделей, учитывающих такие факторы, как:

- технологический прогресс в отрасли производства молока;
- сезонные изменения;
- география расположения ферм;
- уровень образования фермеров;
- глобальное потепление и ряд других.

Нужно ли говорить, что фактор «коров» в этих моделях не присутствует...

Модели производства молока «без коров» являются следствием своего рода **линейно-корреляционного мышления**, столь свойственного нам сегодня [3].

Ясно, что такая модель не адекватна реальности, в частности, прогноз, построенный на основании данной модели, будет ошибочным, так как отсутствие в модели коров автоматически влечёт за собой невозможность учёта в модели такого фактора как, например, вероятность эпидемии коровьего бешенства, которое, очевидно, существенно снижает объём производства молока.

Пример. Аналогичный пример можно привести из области государственных программ регионального экономического развития. В частности в основе одной из программ ускоренного экономического

развития крупного российского региона лежала концепция создания свободных экономических зон.

По замыслу разработчиков программы достаточно было выделить в регионе несколько территорий с налоговыми льготами и подведенной инфраструктурой, как туда немедленно хлынет поток зарубежных инвесторов, которые построят там заводы и фабрики, создав сотни и тысячи новых рабочих мест. Если бы все было так просто!..

К сожалению, видение авторов госпрограммы не включало в себя анализ трудовых ресурсов, доступных в регионе (а ведь кто-то должен будет работать на планируемых производствах), необходимость масштабных инвестиций в близлежащую инфраструктуру (до «кластеров» надо как-то добраться), привязку к локальным рынкам сбыта (а в расчете на кого должно появиться производство? А почему именно в этом регионе?).

Наконец, отсутствовал качественный анализ хозяйственной специализации региона... В итоге – серьезная по своему замыслу и потенциальному финансированию программа регионального развития не проработана с системной точки зрения.

Таким образом, мы привыкли думать, что понимаем систему, однако мы можем быть очень далеки от реального понимания системы. Между знанием и пониманием нельзя ставить знак равенства.

Операционное мышление – это прежде всего структурированное мышление, которое может разложить любую проблему на четко взаимосвязанные составляющие системы, «порождающие» проблему, и выявить основные точки управленческого воздействия на систему. Операционное мышление необходимо для построения ментальных моделей видения сложных систем на основе каузальных (причинно-следственных) взаимосвязей, вскрывающих суть исследуемой проблемы.

Так, линейно-корреляционное мышление при прогнозировании производства молока учитывает лишь такие факторы как образование фермеров, технологический прогресс, расположение ферм, статистические данные, изменение климата и прочее (рис. 12).

Операционное мышление при прогнозировании производства молока учитывает следующие факторы: фермеры, коровы, молоко, прибыль, реинвестирование в увеличение поголовья скота и повышение его продуктивности (рис. 13).

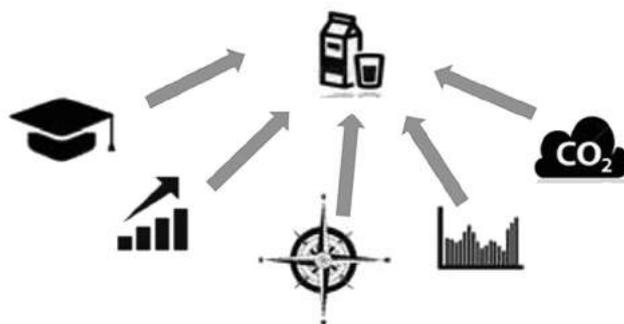


Рис. 12. Иллюстрация линейно-корреляционного мышления при прогнозировании производства молока

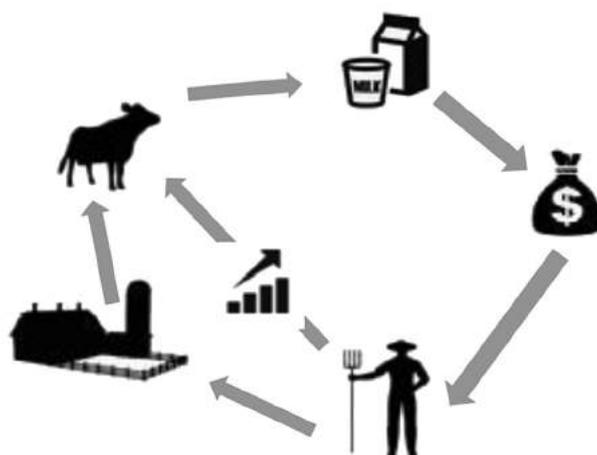


Рис. 13. Иллюстрация операционного мышления при прогнозировании производства молока

Таким образом, операционное мышление существенно повышает целостность, то есть системность описания мира, в связи с чем является неотъемлемым фундаментом системного мышления.

3.6. Трансдисциплинарность системного анализа

В соответствии с представлениями известного системного аналитика Дж. Клира [7] современные традиционные (аксиоматические) научные дисциплины принято делить на две большие группы (рис. 14).

К **первой группе** относятся дисциплины, **предметом исследования** которых являются определённый **тип объектов** (элементов) и объективные законы, описывающие развитие и жизнедеятельность этих объектов, независимо от типа отношений между объектами. Сюда относятся физика, химия, биология, экономика, социология, политология и другие научные дисциплины. Каждая из этих дисциплин исследует

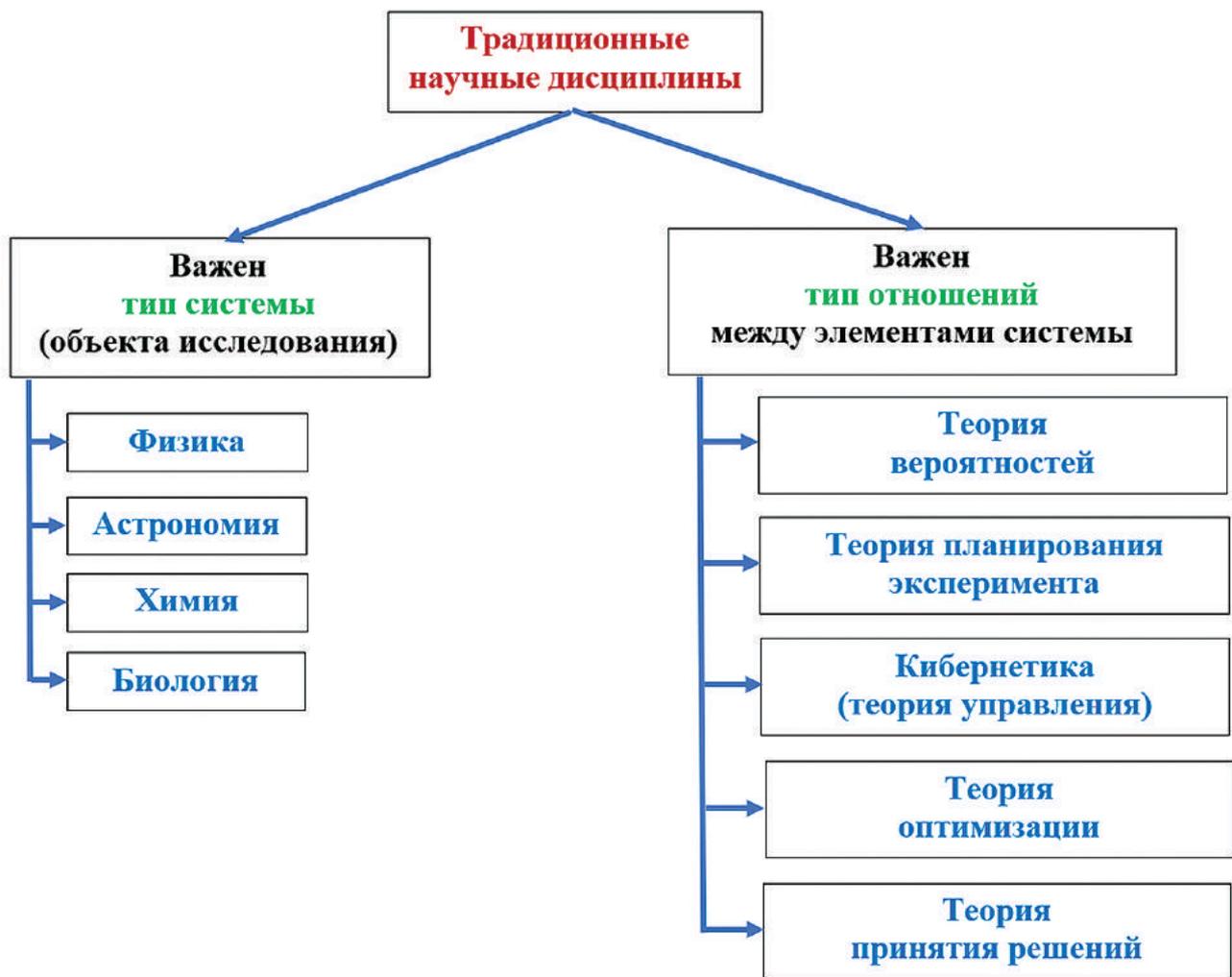


Рис. 14. Две группы традиционных научных дисциплин

определённый тип элементов, а тип отношений не фиксируется, отношения между элементами одного и того же определённого типа могут быть различными.

К **второй группе** относятся дисциплины, предметом исследования которых является определённый **тип отношений** между объектами, в то время как тип объектов (элементов) может быть произвольным. Сюда относятся кибернетика, теория управления, математическое моделирование, математическое программирование, теория принятия решений, теория игр и так далее. В этих науках тип объектов не фиксируется.

Системный анализ носит трансдисциплинарный характер и объединяет в себе признаки обеих групп научных дисциплин.

Во-первых, системные принципы, приёмы и методология принципиально применимы при исследовании проблем, характерных для всех традиционных дисциплин первой группы.

Во-вторых, системный анализ позволяет исследовать свойства отношений между объектами с учётом характеристик отношений в разных условиях и ситуациях, что характерно для дисциплин второй группы.

В-третьих, системный анализ позволяет рассматривать исследуемый объект с целостных позиций с предоставлением для анализа одновременно как свойств элементов объекта, так и свойств отношений взаимодействия элементов объекта между ними.

Становление и развитие теории систем и практики системных исследований подтверждает высказывание известного системного аналитика **Дж. Клира**: «**Главное в развитии науки во второй половине XX века – это переход от одномерной науки, опирающейся в основном на экспериментирование, к науке двумерной, в которую наука о системах, базирующаяся в основном на отношениях, постепенно входит в качестве второго измерения**».

Исходя из **определения Клира**, системный анализ можно отнести к **двумерной** научной методологии.

Понятие одномерной и двумерной научной методологии базируется на двух фундаментальных категориях: **общности типов объектов и общности типов отношений**.

Эта пара критериев образует систему координат на плоскости, в контексте которой данные критерии условно могут считаться ортогональными друг к другу.

3.7. Основные отличия задач системного анализа от задач традиционных научных дисциплин

В соответствии с [1] выделим следующие аспекты, характеризующие основные отличия задач системного анализа от задач традиционных научных дисциплин.

Аспект 1. Многомерность (многофакторность) системного подхода

Традиционные научные дисциплины являются одномерными. В рамках же современного системного анализа осуществляется следующий шаг в развитии современной науки – переход от двумерной науки к многомерной, в которой всесторонне исследуются не только собственно система, но и исходные условия её создания, а также условия её функционирования и управления в штатных и нештатных ситуациях.

Поэтому актуальной становится необходимость, во-первых, **многомерного системного анализа условий функционирования системы**, а, во-вторых, **многомерного системного анализа собственно системы как целостного объекта**.

Аспект 2. Цели исследования

В основе традиционных дисциплин лежит аксиоматическая теория, базирующаяся на определённой системе предположений – аксиом, постулатов, допущений. Поэтому традиционные научные дисциплины называют также аксиоматическими.

При этом главные цели исследования в таких дисциплинах – доказать, что для принятых допущений, аксиом и ограничений сформулированная задача разрешима; обосновать, что методы её решения обладают определёнными свойствами – сходимостью, точностью, корректностью и т.п.

А вопросы о том, существует ли практическая интерпретация сформулированной теории, реализуемы ли на практике введенные теоретические ограничения и допущения, не являются целью исследования этих дисциплин. Ответы на эти вопросы ищут специалисты-«прикладники», которые ставят перед собой цель – найти практические интерпретации аксиоматических теорий и создать методические средства для определённого использования этих теорий на практике.

Системный анализ можно интерпретировать как прикладную научную методологию, арсенал средств которой базируется не только и не столько на аксиомах, сколько на эвристических методах, приёмах, алгоритмах.

В отличие от аксиоматических дисциплин системный анализ ставит прямо противоположную цель исследования – есть практическая задача, для которой известны физические, технологические, экономические и другие ограничения, зная которые необходимо найти систему приёмов и методов, позволяющих построить решение задачи с приемлемой точностью за допустимое время при приемлемых затратах всех видов ресурсов.

Аспект 3. Целостность (комплексность) системного подхода

Каждая аксиоматическая дисциплина исследует объект лишь с точки зрения своего предмета исследования.

При этом системный анализ позволяет комплексно исследовать всё многообразие свойств исследуемого объекта с позиции достижения поставленной цели его исследования как единого целого, в то время как аксиоматические дисциплины изучают лишь отдельные, определённые

свойства объекта с позиции анализа только этих свойств, без учёта влияния на них других свойств.

Аспект 4. Характер исходной информации

В аксиоматических дисциплинах полагается заданной вся информация, которая необходима для формализованного описания объекта исследования. В частности, полагаются известными:

- параметры, характеризующие исследуемые свойства объекта;
- зависимость этих параметров от показателей внешних воздействий и управления;
- критерии, по которым можно оценивать степень достижения цели исследования, допущения и ограничения на параметры, критерии;
- другая дополнительная информация, определяющая свойства и особенности рассматриваемого объекта.

При этом исходной информации достаточно, чтобы разработать содержательную формулировку и математическую постановку задачи исследования объекта.

Более того, часто в качестве исходной информации приводится полная математическая постановка задачи с необходимыми зависимостями, критериями, ограничениями и допущениями.

Принципиально иной объём и характер исходной информации присущи прикладным задачам системного анализа.

Прежде всего, исходная информация об объекте исследования отличается **неопределённостью, неполнотой, неточностью, нечёткостью и противоречивостью**.

При этом, как правило, отсутствует наиболее важная информация, в том числе о критериях оценивания степени достижения целей исследования. Более того, в ряде случаев, в частности, в задачах системного проектирования сложных систем, ставятся противоречивые цели к заданным техническим, эксплуатационным, технологическим показателям и характеристикам изделия.

Для устранения противоречия в целях необходимо искать рациональный компромисс. Однако условия и критерии компромисса должны быть выбраны и обоснованы в процессе проведения системного исследования.

Аспект 5. Повышенная сложность

Прикладные системные задачи являются концептуально неопределёнными, так как им присущи **принципиальные неопределённости**,

неоднозначности, риски, противоречивости множества целей, наличие элементов различной природы в исследуемых системах и информации различного характера, циркулирующей между этими элементами.

Таким образом, **сложность системных задач принципиально выше сложности задач аксиоматических дисциплин** (теории оптимизации, исследования операций и др.)

Аспект 6. Принципиальная неформализуемость

Приведенный перечень особенностей исходной информации, характерных для прикладных системных задач, можно существенно расширить.

Все они в итоге приводят к тому, что **в общем случае задачи системного анализа для реальных объектов являются принципиально неформализуемыми**, поскольку **содержат принципиально неформализуемые процедуры**, например, **выбор критериев, выбор условий рационального компромисса, декомпозиция целей, формирование системы показателей** и так далее.

На практике формализации поддаются, как правило, лишь отдельные части системных задач.

Пример. Одной из важнейших таких составляющих является определение и формулировка целей в виде целевых функций.

От обоснованности и достоверности этой процедуры зависит конечный результат разработки нового сложного технического изделия или результат анализа сложной проблемной ситуации. В то же время от конечного результата зависит деятельность больших коллективов исполнителей, научных организаций и промышленных предприятий.

Аналогичные свойства присущи не только исходной глобальной задаче, но и многим локальным задачам, полученным в результате декомпозиции исходной задачи. Очевидно, что решение таких задач требует системного подхода, системного мышления и системных исследований.

В связи с рассмотренным отличием системных задач от задач традиционных научных дисциплин **решение системных задач** для реальных объектов осуществляется на основе **рационального объединения возможностей человека-эксперта** и возможностей использования **современных научных знаний** и инструментария, прежде всего **компьютера**, возможностей **эвристических приёмов и процедур**, а также возможностей **математических методов** и алгоритмов.

3.8. Системный анализ как общенаучная методология

Современная структура методологии наук не представляет собой однородное единство знаний. В методологии науки можно выделить **четыре основных уровня**:

- уровень философской методологии;
- уровень общенаучной методологии;
- уровень конкретно-научной методологии;
- уровень методологии прикладных исследований;

Причём более высокие и, соответственно, более общие уровни методологии оказывают преимущественное влияние на более частные [1].

Уровень философской методологии включает в себя анализ общих принципов познания и категориального базиса науки в целом. Эта сфера методологии представляет собой раздел философского знания и разрабатывается специальными методами философии науки.

Уровень общенаучной методологии реализует разработку общенаучных концепций познания и формальных методологических теорий – логики науки, разрабатываемой на основе применения аппарата математической логики и т.п.

Общенаучный характер методологических концепций по существу означает их междисциплинарную природу, то есть их применимость для различных областей науки на стыках традиционных дисциплин, и принципиальную возможность перенесения средств и методов таких концепций из одной области научных знаний в другие.

Поскольку общенаучные методологические концепции не претендуют на решение мировоззренческих, общефилософских задач, их разработка осуществляется в сфере нефилософского знания, а именно в рамках современной логики и методологии науки.

Уровень конкретно-научной методологии включает в себя анализ методов, принципов и процедур исследования, применяемых в специальных научных дисциплинах.

Основная задача этого уровня методологии – выявление и описание совокупности методологических приёмов и принципов, специфических для той или иной дисциплины: физики, химии, биологии, психологии, социологии и др.

Уровень методологии прикладных исследований представляет собой описание способов получения релевантной информации, условий проведения эксперимента, учёта погрешностей, методов обработки экспериментальных данных и так далее. Методологические знания на этом уровне сводятся к требованиям, регламентациям и практическим приёмам при использовании тех или иных научных результатов.

Системный анализ представляет собой общенаучное трансдисциплинарное методологическое знание, то есть относится ко второму уровню – общенаучной методологии.

Таким образом, методология системного анализа имеет большую общность, чем методологические утверждения, формулируемые и принимаемые в конкретных областях научных знаний, но при этом они не претендуют на философский уровень обобщения и разработку общих принципов познания.

Учитывая приведенные особенности системного анализа, сформулируем его содержательное определение как научной методологии.

Системный анализ – это прикладная научная методология, опирающаяся на широкое многообразие системно организованных, структурно взаимосвязанных и функционально взаимодействующих эвристических процедур, методических приёмов, математических методов, алгоритмических, программных и вычислительных средств, обеспечивающая комплексное формирование качественно новых – целостных, междисциплинарных знаний об исследуемом объекте как о системе взаимосвязанных процессов разной природы для последующего принятия решений относительно его дальнейшего развития и поведения с учётом множества конфликтующих критериев и целей, действия факторов неопределённости и риска [1].

Таким образом, по отношению к традиционным научным дисциплинам системный анализ можно рассматривать как следующий шаг в развитии методологии современной науки, а именно **переход от одномерной науки к многомерной**, в которой всесторонне исследуются не только собственно система, но и условия её создания и функционирования, а также условия управления функционированием системы в штатных, нештатных, критических и чрезвычайных ситуациях с учётом факторов риска, а также **неопределённости: неполноты, неточности, нечёткости, противоречивости, несвоевременности и не достоверности информации.**

Вместе с тем, классическое определение научной дисциплины по отношению к системному анализу не может быть строго применено в связи с тем, что **системный анализ находится в процессе становления**. До сих пор среди исследователей не достигнут полный консенсус по многим основополагающим понятиям.

Кроме того, невозможно хотя бы более или менее точно очертить арсенал методов и средств системного анализа, что обусловлено принципиальной трансдисциплинарностью и многовариантностью системного подхода к изучению сложных систем разной природы.

Контрольные вопросы

1. Раскройте суть категории «системность» в узком и широком смысле.

2. Опишите основные проявления системности как всеобщего свойства реальности. В чём проявляется взаимосвязь между системностью и сложностью?

3. Опишите основные классы сложных систем разной природы и их математических моделей.

4. Какими свойствами могут обладать системы? Поясните смысл терминов: открытая система, динамика, нелинейность, эквивифинальность.

5. Сформулируйте определение системного мышления. Какие основные составляющие системного мышления выделяет Каталевский? Чем линейно-корреляционное мышление отличается от операционного мышления?

6. Какие две основные группы традиционных научных дисциплин выделяет Клир и какое место среди них занимает системный анализ?

7. В чем состоит основное отличие задач системного анализа от задач аксиоматических научных дисциплин? Что в системном анализе принято понимать под термином «не-факторы»?

8. Назовите и охарактеризуйте основные уровни методологии науки.

9. К какому уровню современной методологии науки относится системный анализ?

10. В чём проявляются многомерность системного подхода и трансдисциплинарность системного анализа?

Литература

1. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011, 729 с.
2. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособ. / И.А. Прохорова. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. 49 с.
3. *Каталевский Д.Ю.* Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Ю. Каталевский. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 496 с.
4. *Зенгер Х. фон.* Стратегемы. О китайском искусстве жить и выживать. Т. 1, 2. М.: Эксмо, 2004.
5. *Леви-Брюль Л.* Первобытное мышление. Психология мышления / Под ред. Ю. Б. Гиппенрейтер и В. В. Петухова. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 130–140.
6. *Richmond B.* System thinking: critical system thinking skills for the 1990s and beyond // *System Dynamics Review.* 1993. 10 (2–3). P. 128.
7. *Клир Дж.* Наука о системах: новое измерение науки // Системные исследования: методологические проблемы. М.: Наука, 1983. С. 61–85.

4. Некоторые подходы к моделированию объектов системного анализа

4.1. Объект научного познания как философская категория

Традиционно понятие «объект исследования» в науке обозначает часть материи (объективной реальности), которую выделяют из окружающего мира и с которой взаимодействует субъект познавательной деятельности, то есть человек, как носитель сознания (учёный, исследователь) в процессе научного познания.

Научное познание есть процесс активного взаимодействия субъекта познавательной деятельности с объектом познания. На рис. 15 представлена схема, отражающая традиционно выделяемую в философии науки триединую структуру процесса научного познания: «чувственное созерцание–абстрактное мышление–практика».



Рис. 15. Триединная структура процесса научного познания

Вместе с тем в силу бесконечного разнообразия систем и системных задач, а также наличия ряда других факторов понятие «объект» в системном анализе подлежит уточнению.

4.2. Уточнение традиционного понимания понятия «объект» в системном анализе

Основные идеи и особенности известных подходов к описанию и формализации объектов системного анализа достаточно полно отражают цитаты, которые известный системный аналитик Джордж Клир

принял в качестве эпиграфов к разделам своей известной монографии «Системология». Приведём три такие цитаты [1].

Дж. Гоген и Ф. Варела утверждают: «Мир по большей части не делится для нас на системы, подсистемы, среду и так далее. Мы сами его подразделяем, исходя из разных соображений, обычно сводящихся к одному общему: для удобства».

Г. Бейтсон подтверждает удобство такого представления мира, но высказывает определённые сомнения: «Разбиение воспринимаемого мира на части удобно и, возможно, необходимо, но неизвестно точно, как оно должно быть сделано».

С. Ватанабе уточняет особенности проблемы представления мира и выделяет неоднозначность процедуры разбиения: «Возвращаясь к общей проблеме целого и его частей, необходимо признать, что сложность, а следовательно, богатство идей, связанных с этой проблемой, проистекает, по крайней мере, отчасти из-за того, что одна и та же система может быть разбита на части многими способами».

Эти цитаты показывают, что выбор объекта системного исследования, определение его границ и границ окружающей среды являются достаточно сложной задачей. Постановка, формализация и методы её решения зависят от множества факторов. В первую очередь, они зависят во многом от целей исследования, от личных качеств лица, принимающего решения (далее – ЛПР), а также от складывающихся условий и ситуаций при проведении исследования.

Следуя подходу Дж. Клира, отметим, что человек в повседневной жизни взаимодействует с различными объектами из нашего окружения, причём это взаимодействие для любого объекта обычно ограничивается несколькими представительными свойствами, которые характеризуют его качество и возможности. По мере заинтересованности в исследовании определённого объекта подобное взаимодействие может становиться всё разнообразнее, но оно всегда ограничивается пределами восприятия человека, его способностью к оцениванию, выбору, наблюдению и другим возможным действиям.

Иная ситуация характерна для специалистов, активно работающих в любой из традиционных областей науки, техники или других областях практической деятельности человека. Их интересуют достаточно определённые, конкретные типы объектов исследования. Например, врачи работают с людьми разного возраста и разного состояния

здоровья. Экологов интересуют объекты окружающей среды. Инженеры занимаются всевозможными реальными объектами, которые разрабатываются, производятся и используются человеком, обеспечивая его жизнь и деятельность.

Приведенные примеры показывают, что выбор специалистом объекта исследования определяется во многом спецификой его профессии.

Вместе с тем специалисты одной профессии могут работать с разными объектами или с одним и тем же объектом, но в разных условиях, то есть объект исследования зависит не только от профессии исследователя, но и от условий, задач и результатов практической деятельности.

Более того, далеко не всегда объектом исследования является предмет объективной реальности, не зависящий от человека и его сознания. Например, этап концептуального проектирования нового изделия техники характеризуется большим числом различных неопределённостей, в частности: неопределённостью и противоречивостью перспектив конкурентоспособности изделия, неопределённостью рынков сбыта изделия, вызванной активным противодействием конкурентов, а также ситуационной неопределённостью рисков в процессе разработки, производства, сбыта, эксплуатации и утилизации изделия.

Результаты раскрытия неопределённости в значительной степени зависят от человека – главного конструктора изделия как ЛПР, его личных качеств – знаний, умений, опыта, интуиции, предвидения. В свою очередь, эти результаты полностью определяют основные технические решения и показатели разрабатываемого изделия.

Следовательно, до принятия решения ЛПР, последующей разработки на основе проектно-конструкторской документации и её реализации в виде опытного образца не существовало физически разрабатываемого изделия, и оно появляется как объективная реальность только благодаря деятельности человека.

Но необходимо также заметить, что до принятия решения ЛПР по замыслу нового изделия физически не существовало проектно-конструкторской документации, которая необходима для производства и эксплуатации разрабатываемого изделия.

Таким образом, на практике существуют объекты, которые не характеризуются приведенным выше понятием «объект» как философской категорией. Поэтому необходимо уточнить и расширить определение объекта.

Вариант более широкого толкования понятия «объект» даёт Дж. Клир: «Объектом будем называть часть мира, выделяемую как единое целое в течение осязаемого отрезка времени».

Однако данное определение не отражает роли человека при исследовании, выборе, производстве и других действиях. Поэтому, следуя [2], далее будем использовать следующее, более точное, определение.

Объект исследования – это часть мира, которую в течение конечного отрезка времени как единое целое исследует, выбирает, формирует, создаёт, использует или выполняет другие действия с ним человек (специалист) с позиции достижения поставленных целей.

4.3. Классификация объектов по Дж. Клиру

Следуя подходу Дж. Клира, рассмотрим классификацию объектов. Можно выделить **материальные** и **абстрактные** объекты [1].

В свою очередь, материальные объекты можно разделить на объекты **естественные**, не зависящие от человека, и **искусственные**, созданные человеком (рис. 16).

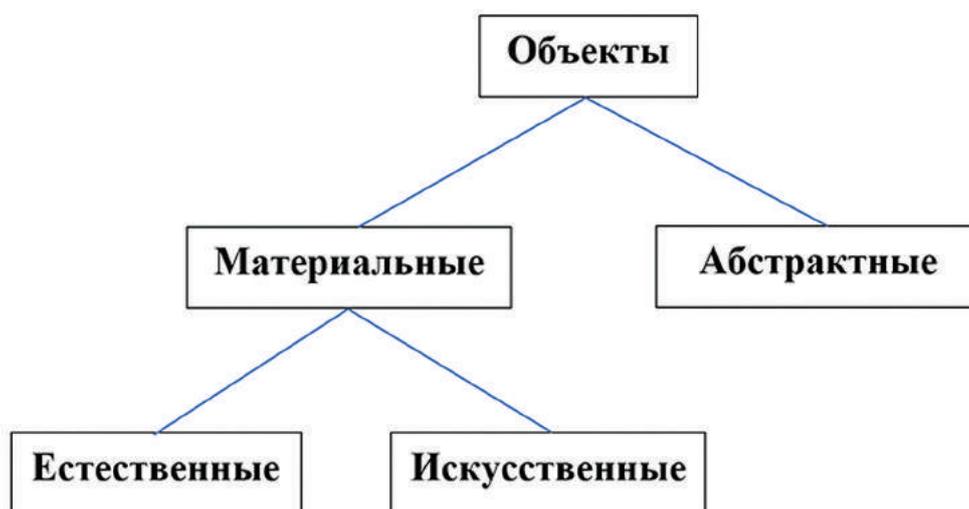


Рис. 16. Классификация объектов по Дж. Клиру

Примерами естественных объектов являются Вселенная; Солнечная система; флора и фауна определённой местности, континента или всей планеты Земля в целом; горные массивы, пещеры, ущелья, каньоны или другие геологические объекты; стада диких животных; клетки различных организмов и так далее.

Примерами искусственных объектов являются техносфера планеты; города, аэропорты, больницы и другая созданная на планете инфраструктура жизни и деятельности человека.

Абстрактные объекты тоже создаются человеком, но в отличие от искусственных они не являются материальными. Примерами таких объектов являются произведения творчества человека, в частности, музыкальные сочинения, сказания, былины, танцы и другие. Они могут передаваться устно, образно, от поколения к поколению, но могут и погибать вместе с их авторами или исполнителями.

Абстрактные объекты могут воплощаться в форме таких материальных объектов как книги, магнитные и оптические носители информации и так далее. При этом указанные материальные средства являются лишь формой воплощения абстрактных объектов, сущностью которых является содержание научной, художественной, правовой и другой информации.

4.4. Система как объект моделирования

В большинстве случаев объекты обладают практически бесконечным числом свойств. Любое из свойств объекта можно вполне осмыслить и изучить. Как следствие, можно исследовать и оценить объект по определённому конечному набору свойств.

Однако любой объект невозможно изучить полностью, исследовать всё множество свойств и особенностей, включая свойства механизмов старения и разрушения. Данное утверждение непосредственно следует из первой теоремы Гёделя.

Следовательно, для материального объекта нереально ставить целью исследование всех свойств и особенностей. Из них нужно выделять и изучать лишь наиболее существенные, то есть те, которые относятся к заданной цели или к исследуемой проблеме.

Это означает, что необходимо отобразить ограниченное и, как правило, достаточно малое число свойств, которые с достаточной для исследователя полнотой описывают данный объект с позиции рассматриваемых целей.

После этого необходимо определить ограниченное множество показателей каждого свойства, которое, в свою очередь, задаёт вектор абстрактных переменных, представляющий образ соответствующего свойства.

Любую систему можно интерпретировать как определённую целостную среду системного исследования, которую с позиции достижения поставленных целей выбирает, формирует или создаёт человек.

Система может быть материальным **объектом** или некоторой **моделью** материального или абстрактного объекта исследования (рис. 17).

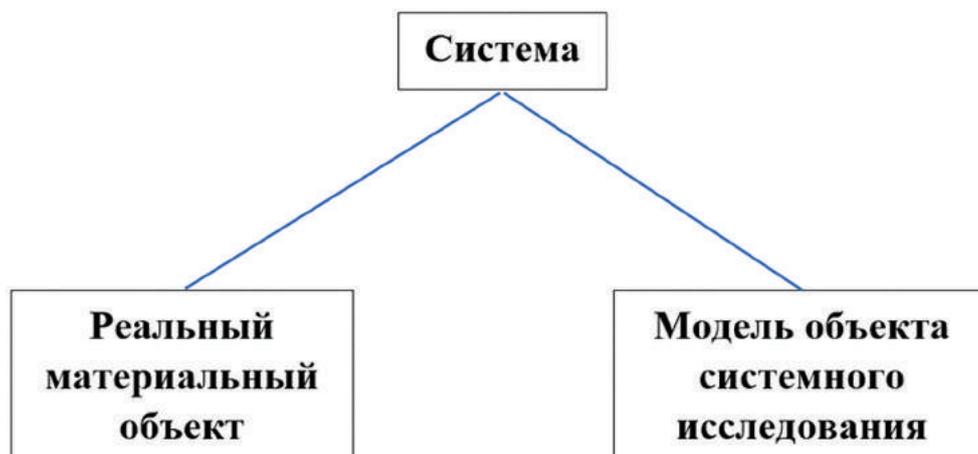


Рис. 17. Два аспекта категории «система»

В первом случае система – это реальный материальный объект, технологическая или организационная структура которого является сложной многоуровневой иерархической системой разнотипных функциональных элементов или однотипных функциональных элементов, разнесённых в пространстве.

Примером реальной системы, организационная структура которой является иерархической, является система государственного управления во многих странах мира.

Как уже говорилось выше, объекты системного анализа представляют собой сложные системы. Повышенная сложность систем и прикладных системных задач актуализирует практическую необходимость упрощения. Такое упрощение реализуется путём моделирования, то есть построения модели объекта.

Модель – это упрощённое представление исследуемого объекта, которое с достаточной степенью достоверности (адекватности) описывает объект с точки зрения достижения поставленных целей исследования.

Моделирование является одним из наиболее универсальных способов изучения сложных процессов и явлений разной природы.

Модель объекта представляет собой формализованное описание свойств и процессов, характеризующих исследуемый объект с позиции поставленных целей и задач, установленных показателей и параметров.

Различают физическое, аналоговое, математическое, компьютерное, в частности, имитационное, моделирование.

Физическое моделирование предполагает создание физической модели, воспроизводящей поведение исследуемого объекта с сохранением его физической природы. Между исследуемым объектом и его физической моделью должны быть сохранены некоторые отношения подобия, вытекающие из закономерностей физической природы явлений.

Аналоговое моделирование является частным случаем физического моделирования и базируется на **методе аналогий**, суть которого состоит в том, что процесс решения конкретной задачи в ряде случаев аналогичен некоторому физическому процессу.

Примером простейшего аналогового компьютера является логарифмическая линейка. В силу узкой специфичности аналогий между физическими процессами и конкретными прикладными задачами аналоговое моделирование в настоящее время имеет ограниченную сферу применения.

Тем не менее, активно проводятся исследования в области создания биоинспирированных алгоритмов, в частности, решение задач с помощью химических компьютеров, ДНК-компьютеров.

Ярким примером является оптимизация маршрутов на графах и сетях, реализуемая на основе «интеллектуальных» возможностей таких грибов как плазмодий (слизевик).

Математическое моделирование, по сравнению с физическим, обладает значительно более широкими возможностями, поскольку позволяет исследовать объекты, **разные по своей природе**, но описываемые, тем не менее, **одинаковыми** уравнениями.

Возможность описания сложных систем разной природы (физических, химических, биологических, экономических и других) одними и теми же математическими уравнениями называют изоморфизмом (эквивалентностью).

Именно **изоморфизм** законов в различных сферах научных знаний стал основой **общей теории систем**, созданной австрийским биологом **Карлом Людвигом фон Берталанфи**.

Пример. Закон всемирного тяготения (четвёртый закон Ньютона), описывающий гравитационное взаимодействие масс (гравитационных зарядов), и закон Кулона, описывающий электростатическое взаимодействие электрических зарядов, имеют одинаковое, с точностью до замены букв, математически формализованное описание:

$$\vec{F} = G \frac{m_A m_B}{r^3} \vec{r}. \quad (35)$$

Этот пример иллюстрирует изоморфизм статических систем.

Пример. Из курса физики известно, что механические и электрические гармонические колебания (математический маятник), несмотря на разную физическую природу, описываются, тем не менее, одним и тем же математическим уравнением:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (36)$$

Любая динамическая система, соответствующая данному уравнению, получила название «гармонический осциллятор».

Последовательно дифференцируя по времени, имеем:

$$\dot{x} = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0); \quad (37)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x. \quad (38)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение гармонического осциллятора имеет следующий вид:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0. \quad (39)$$

Более того, введение вектора состояния данной системы:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \end{pmatrix}, \quad (40)$$

позволяет перейти к эквивалентному представлению гармонического осциллятора в пространстве состояний:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -\omega^2 x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}. \quad (41)$$

То есть модель гармонического осциллятора в пространстве состояний имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Этот пример иллюстрирует изоморфизм динамических систем.

Разумеется, математическое моделирование не сводится только к представленным простым примерам.

Более того, математические модели сложных систем разной природы могут быть представлены не только системами уравнений (алгебраических либо операторных; детерминированных либо стохастических).

В частности, существуют математические модели сложных систем на графах и сетях. Например, моделирование потоков в сетях, модели систем массового обслуживания, цепи Маркова, сети Петри и другие сложные модели.

Кроме того, в синергетике активно создаются и исследуются сложные нелинейные математические модели, в частности, клеточные автоматы, фракталы и другие.

Говоря о математическом моделировании, обычно выделяют два основных класса задач моделирования. Речь идёт о прямых и обратных задачах математического моделирования.

Прямая задача математического моделирования состоит в нахождении (приближённого) решения, удовлетворяющего заданной математической модели. Решение таких задач, как правило, не представляет каких-либо трудностей, так как может быть выполнено либо аналитически, либо численно, то есть приближённо, на компьютере.

Примерами прямых задач моделирования являются, в частности, решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) методом Гаусса; решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты и другие задачи.

Обратная задача математического моделирования состоит в построении (приближённой) математической модели объекта (системы)

по наблюдаемым данным, генерируемым исследуемой системой. Такие задачи возникают во многих областях практической деятельности человека.

В частности, сюда относятся многие задачи классификации, задачи распознавания образов, а также задачи структурной и параметрической идентификации сложных динамических систем разной природы и оценивания их состояния. Структурная идентификация есть определение наиболее подходящей структуры модели (определение порядка модели и выбор приближающих функций), а параметрическая идентификация – это оценивание параметров модели (параметров приближающих функций).

Сложность обратных задач, как правило, гораздо выше сложности прямых задач, что связано с различными системными факторами. В частности, одной из важнейших системных проблем, с которой приходится сталкиваться в процессе решения многих обратных задач, является **проблема некорректности** этих задач.

Суть этой проблемы состоит в том, что в условиях неопределённости решение задачи может оказаться неустойчивым, то есть слишком чувствительным по отношению даже к малым возмущениям исходных данных. Поскольку в прикладных системных исследованиях решение одной задачи нередко используется далее в качестве исходных данных для некоторой другой задачи, то ясно, что преодоление неустойчивости (некорректности) исходной некорректной задачи является критически важным.

Поэтому в теории некорректных задач разрабатываются специальные **методы регуляризации**.

Компьютерное (численное) моделирование неразрывно связано с математическим, так как позволяет проводить сложные вычислительные эксперименты с математическими моделями, существенно дополняя (но не заменяя!) возможности теоретических (аналитических) методов исследования свойств математических моделей и, соответственно, изучения особенностей поведения сложных систем разной природы.

Кроме того, использование возможностей современных компьютеров и специализированного программного обеспечения позволяет осуществлять **графическое моделирование** (например, строить чертежи), а также **имитационное моделирование**, осуществляемое в целях наглядной имитации поведения объекта.

4.5. Подход Дж. Клира к моделированию систем

При решении сложных прикладных системных задач одним из наиболее важных и сложных этапов исследования является выбор и построение моделей.

В простейшем случае модель задаётся множеством интересующих нас свойств объекта и назначением для каждого из них определённой переменной.

Под «переменной» принято понимать некоторый показатель как числовую характеристику или абстрактный образ свойства.

При единичном наблюдении свойство имеет одно конкретное проявление, то есть определённое количественное значение показателя или определённое качественное проявление свойства.

Для определения возможных изменений его проявлений требуется множество наблюдений этого свойства.

Базис наблюдения – это любое существенное свойство, которое можно реально использовать на практике для определения различий в наблюдениях иного, одного и того же свойства [1].

Например, типичным базисом, пригодным для наблюдения изменения практически любого свойства, является **время**.

В некоторых случаях разные наблюдения одного и того же признака неразличимы во времени, но зато отличаются положением в **пространстве**, в котором сделаны наблюдения.

Пример. Плотность твёрдого тела может не зависеть от времени, но быть различной в разных точках этого тела, то есть изменяться в собственном пространстве тела.

Пример. Различные свойства, характеризующие качество акустики концертного зала, можно наблюдать в один и тот же момент времени в разных точках концертного зала.

Пространство как базис играет особо важную роль, например: в космонавтике, астрономии, строительстве, оптике, изобразительном искусстве, анатомии и других дисциплинах.

В связи с возможностью использования времени и пространства в качестве базисов важно отметить, что, помимо физического времени и физического пространства, в качестве базисов могут использоваться так называемые **собственное время** и **собственное пространство** объекта, то есть время и пространство, создаваемые самим объектом.

Например, в медицине, стадии рака можно интерпретировать как собственное время раковой опухоли.

В свою очередь, топологические особенности топографического расположения органов человеческого организма – как собственное пространство человеческого организма.

Множественные наблюдения одного и того же свойства могут отличаться друг от друга по элементам некоторого множества, на котором определено интересующее нас свойство. Такое множество называют **группой**.

Это может быть социальная группа, набор производимых товаров определённого типа, множество слов в каком-то рассказе, множество стран мира и так далее.

Базисы трёх основных типов – время, пространство, группа – можно комбинировать и получать **комбинированные базисы**, особенно распространёнными среди которых являются «**время-пространство**» и «**время-группа**».

Пример комбинированного базиса «время-пространство» – кинофильм, особенно, если он используется в исследованиях – изучение роста растений, дорожных ситуаций на перегруженных перекрёстках и других.

Комбинированный базис «время-группа» может использоваться в качестве базиса, в котором характеризуется положение в экономике, политике, в социальных процессах разных стран мира.

Помимо особого использования пространства, времени и групп в качестве базисов наблюдения они могут выступать и как свойства.

Пример. При ежесуточном наблюдении восхода и захода Солнца в разных местах Земли свойством является время, а его базисом – «**время-пространство**».

Таким образом, в соответствии с подходом Дж. Клира [1] система S исследуемого объекта, формально может быть представлена **обобщённой математической моделью**, представляющей собой упорядоченный набор:

$$S = \langle A, B \rangle, \quad (43)$$

где:

$$A = \{(a_i, A_i) | i \in I\} \text{ и } B = \{(b_j, B_j) | j \in J\}, \quad (44)$$

причём:

a_i – i -ое свойство;

A_i – множество проявлений i -го свойства;

b_j – j -ый базис;

B_j – множество элементов j -го базиса.

Введенное Клиром определение системы в форме модели реального объекта и принятый подход к описанию модели на основе множества свойств исследуемого объекта и множества базисов представляют практический интерес, поскольку открывают возможность решения достаточно широкого класса прикладных системных задач.

Тем не менее, реальные проблемы управления сложными организационными и техническими объектами не всегда вписываются в структуру указанного выше представления модели.

В частности, многоуровневая иерархическая система управления определяет необходимость рационального распределения функций между уровнями иерархии, и на каждом уровне, как следствие, появляется иерархическая структура целей и задач управления. Отсюда вытекает потребность построения такой иерархической системы моделей, на основе которой возможно создать рациональную структуру управления и обеспечить достижение поставленных целей управления. Следовательно, для такого объекта модель должна отражать не только его свойства, но и его структуру.

4.6. Кибернетический подход к моделированию сложных открытых систем в форме «чёрного ящика»

В кибернетике, то есть теории управления сложными системами разной природы (техническими, биологическими, экологическими, экономическими) широко применяется описание сложной открытой системы в форме «чёрного ящика».

Метафора «чёрный ящик» означает, что исследователь априори не знает, что происходит внутри системы, но наблюдает при этом внешние сигналы, которые поступают на вход системы из внешней среды, а также сигналы, генерируемые системой на выходе во внешнюю среду (рис. 18).



Рис. 18. Кибернетическое представление открытой системы в виде модели «чёрный ящик»

Хотя формально в эту схему вписываются любые алгоритмы и статические системы, описываемые, в частности, системами линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), но, как правило, чаще речь идёт всё же о динамической системе, то есть вход и выход являются некоторыми процессами (сигналами) во времени. Причём, в общем случае, эти процессы являются вектор-функциями времени, то есть система имеет несколько скалярных входов и несколько скалярных выходов.

Отметим также, что **сигнал на выходе системы можно интерпретировать двояко.**

Во-первых, сигнал на выходе системы есть реакция системы на входной сигнал, возбуждающий систему.

Во-вторых, этот же сигнал на выходе системы можно трактовать и как результат фильтрации системой входного сигнала. Именно поэтому в кибернетике и системном анализе термин «динамическая система» нередко применяется наравне с термином «фильтр», то есть эти термины являются синонимами.

В наиболее общей, операторной форме детерминированная модель типа «вход-выход» представляется операторным уравнением [3]:

$$y = Ru, \quad (45)$$

где R – **передаточный оператор системы**, преобразующей вход u в выход y .

Причём физически реализуемая динамическая система всегда удовлетворяет **принципу каузальности**, то есть причинной обусловленности, в соответствии с которым возбуждающее воздействие u на входе системы всегда предшествует во времени реакции y системы на выходе.

Более того, в силу **инерционности** динамических систем, система реагирует с некоторым, как правило, ненулевым, **временем**

запаздывания. Например, выздоровление пациента наступает не сразу после начала лечения.

Следует обратить внимание на то, что в организационных системах руководители нередко игнорируют фактор запаздывания и принципиальную инерционность обратных связей. Пытаясь во что бы то ни стало ускорить достижение цели управления, они часто принимают ошибочные управленческие решения, которыми продолжают избыточно стимулировать систему, что приводит в результате не только к недостижению цели управления, но и, более того, к ухудшению функционирования системы.

Математическая модель поведения системы, то есть передаточный оператор R , а также сигналы u и y , может быть представлена как во времени, так и с помощью соответствующих преобразований в операторной области, то есть в частотной области для непрерывных систем либо в области преобразований – для дискретных систем.

Во временной области поведение (динамика) системы описывается обыкновенными дифференциальными либо разностными уравнениями и их системами, причём дифференциальные уравнения применяются для описания динамики систем в непрерывном времени, а разностные уравнения – для описания динамики систем в дискретном времени, соответственно.

Однако дискретная природа вычислений, реализуемых на современных цифровых компьютерах, делает дискретные (разностные или рекурсивные) модели гораздо более предпочтительными, чем непрерывные, которые так или иначе подвергаются предварительной дискретизации с помощью тех или иных разностных схем, разрабатываемых в рамках дисциплины «численные методы».

Отметим также, что описание поведения (динамики) сложных систем в области z -преобразований реализуется с помощью полиномиальных алгебраических уравнений, то есть статическими моделями, и в этом смысле соответствующий математический аппарат является наиболее простым и удобным способом описания динамики систем по сравнению с дифференциальными уравнениями.

В рассмотренной выше модели «вход-выход» динамика системы однозначно детерминирована. Поэтому соответствующие математические задачи называют **детерминированными**.

В математике термин «динамическая система» часто употребляется как синоним термина «детерминированная система». Детерминированность системы означает предсказуемость её поведения во времени и, соответственно, **неограниченный горизонт прогнозирования**.

Однако в реальных условиях на систему оказывают влияние различные факторы неопределённости, включающие в себя случайные флуктуации внутри системы, неконтролируемые воздействия динамически сложной внешней среды, шумы в каналах управления и каналах измерения выходных управляемых координат.

Поэтому в системном анализе сложные открытые системы и соответствующие сложные проблемные ситуации (прикладные системные задачи) рассматриваются **в условиях неопределённости**.

В условиях неопределённости горизонт прогнозирования поведения сложной системы становится ограниченным, а рассмотренная выше схема «чёрный ящик» трансформируется путём включения в неё соответствующих шумовых сигналов (рис. 19).



Рис. 19. Динамическая система в условиях неопределённости

В соответствии с данной схемой множество входных сигналов разбивается на два подмножества.

К первому подмножеству относятся сигналы **управления**, то есть входные сигналы, контролируемые человеком в заданных условиях.

Во второе же подмножество попадают неконтролируемые возмущения (шумы) внешней среды, то есть неопределённость на входе системы.

Реакция системы также зашумляется.

Таким образом, полезные (детерминированные) внешние сигналы (вход и выход) в реальных условиях оказываются зашумлёнными, то есть искажёнными в результате воздействия неопределённости.

В современной теории идентификации систем разработано два **основных подхода к математической формализации неопределённости**, неизбежно содержащейся в наблюдаемых вход-выходных (внешних) данных, генерируемых исследуемой системой.

Первый подход – теоретико-вероятностный (стохастический), в соответствии с которым неопределённость описывается случайными стационарными процессами типа белого гауссовского шума. Такой подход является традиционным и распространён в прикладных задачах очень широко.

Удобство его практического применения связано с тем, что сбор достаточно большого количества данных наблюдения, то есть выборки репрезентативных данных достаточной длины, фактически позволяет системным аналитикам интерпретировать задачу, рассматриваемую в условиях стохастической неопределённости как детерминированную, поскольку срабатывает так называемый фильтрующий эффект известного в теории вероятностей закона больших чисел.

Задачи системного анализа данных, в которых применяется теоретико-вероятностный подход к формализации неопределённости, присутствующей в исходных наблюдаемых данных, генерируемых исследуемой системой, называют **задачами в условиях стохастической неопределённости**.

Несмотря на удобство и широкое распространение данного подхода при решении задач идентификации сложных систем, применение его на практике далеко не всегда научно обосновано. Например, в теории вероятностей известны случайные величины, не имеющие среднего значения (математического ожидания), а дисперсия случайного процесса, представляющего неопределённость, может быть переменной во времени (гетероскедастические процессы).

В таких и некоторых других случаях понятие состоятельности оценок параметров модели часто утрачивает содержательный смысл, и применение математического аппарата теории вероятностей становится невозможным либо научно необоснованным, то есть математически некорректным.

Второй подход – теоретико-множественный, описывает неопределённость в виде произвольных случайных процессов, принадлежащих известным, априори заданным **ограничивающим множествам**.

Эти множества являются **ограниченными** в соответствующих метрических либо нормированных пространствах.

В связи с ограниченностью соответствующих множеств задачи системного анализа данных, в которых применяется теоретико-множественный подход к формализации неопределённости, присутствующей в исходных наблюдаемых данных, генерируемых исследуемой системой, называют **задачами в условиях ограниченной неопределённости**.

В контексте данного подхода вероятностные характеристики случайных процессов не рассматриваются в принципе, то есть математический аппарат теории вероятностей здесь вообще не применяется.

Например, в простейшем случае, речь может идти о шумах, ограниченных по величине амплитуды либо по мощности (энергии).

В общем случае в качестве множеств, ограничивающих неопределённость, на практике чаще всего применяются выпуклые ограниченные множества, такие как выпуклые полиэдры и эллипсоиды в соответствующих многомерных пространствах.

В частности, именно теоретико-множественный подход реализуется в контексте так называемых **методов гарантированного множественного оценивания** состояния и параметров моделей сложных динамических систем (интервальное оценивание, эллипсоидальное оценивание, полиэдральное оценивание), которые широко применяются при решении соответствующих обратных задач математического моделирования, в частности, в сфере космического мониторинга астероидно-кометных угроз.

Отметим, что данный подход к формализации неопределённости является более общим, чем теоретико-вероятностный, так как может быть применён, в частности, в условиях отсутствия некоторых вероятностных характеристик негауссовских шумов, например, отсутствия среднего значения.

Вместе с тем, в тех случаях, когда применение теории вероятностей научно обосновано, уместно применять первый, то есть стохастический подход к формализации неопределённости.

Таким образом, сходство рассмотренных здесь подходов состоит лишь в том, что оба эти подхода признают **случайность** шумовых процессов, порождающих неопределённость в наблюдаемых данных, генерируемых исследуемой системой.

Но на этом их сходство заканчивается. Во всех же остальных аспектах эти подходы кардинально различны.

4.7. Целенаправленные и целеустремлённые системы

Цель – это количественная или качественная мера первичных или вторичных свойств системы, которую при данных обстоятельствах исследователь считает наиболее предпочтительной.

Таким образом, сложная система может рассматриваться с точки зрения различных целей. В этом смысле система удовлетворяет множеству целей.

Характеристика системы относительно цели может быть измерена близостью действительных и желаемых проявлений тех свойств системы, которые предусмотрены целью.

Обычно характеристика системы относительно цели определяется в терминах **характеристической функции**, представляющей собой степень близости рассматриваемой системы x целевой системе x^* .

Характеристическая функция χ может быть определена формулой:

$$\chi_{x^*}(x) = 1 - \frac{\rho(x, x^*)}{d_X}, \quad (46)$$

где:

χ – множество систем, отличающихся только теми свойствами, которые в данном случае определяют понятие цели, в то время как остальные свойства совпадают;

$\rho(x, y)$ – метрика, то есть расстояние между системами x и y , в зависимости от определения которой получаем разные определения характеристической функции;

d_X – диаметр множества χ , то есть максимально возможное расстояние между элементами данного множества:

$$d_X = \sup_{x, y \in X} \rho(x, y). \quad (47)$$

Однако каким бы способом не было определено расстояние (метрика) ρ в метрическом пространстве $\langle X, \rho \rangle$, следует помнить, что в

соответствии с аксиоматикой метрических пространств расстояние обязательно должно обладать тремя свойствами: неотрицательностью и невырожденностью, симметричностью и неравенством треугольника, соответственно.

Во избежание возможного недопонимания напомним соответствующие определения.

Пусть x, y, z – произвольные системы рассматриваемого метрического пространства X .

Тогда **неотрицательность** и **невырожденность** метрики означают следующее:

$$\rho(x, y) \geq 0; \quad (48)$$

$$(\rho(x, y) = 0) \Leftrightarrow (x = y). \quad (49)$$

Симметричность метрики:

$$\rho(x, y) = \rho(y, x). \quad (50)$$

Неравенство треугольника:

$$\rho(x, y) \leq \rho(x, z) + \rho(z, y). \quad (51)$$

Предположим, что цель и соответствующая характеристическая функция определены на некотором множестве систем. С каждой системой этого множества связано значение характеристической функции, определяющее степень соответствия системы заданной цели.

Это позволяет определить понятие **целенаправленных систем**, то есть систем, для которых характеристика относительно заданной цели превышает некоторое априори заданное пороговое значение.

Таким образом, система является **целенаправленной относительно системы y** и цели x^* с учётом характеристической функции χ , если выполняется неравенство:

$$\chi_{x^*}(x) > \chi_{x^*}(y). \quad (52)$$

Степень целенаправленности системы x относительно системы y при заданной цели x^* определяется по формуле:

$$w_{x^*}(x|y) = \chi_{x^*}(x) - \chi_{x^*}(y). \quad (53)$$

Система с положительной степенью целенаправленности относительно другой системы должна обладать некоторыми свойствами, отличными от свойств последней, то есть свойствами, связанными с целью и определяющими улучшение характеристики данной системы с точки зрения заданной цели.

Эти отличающие свойства Клир называет **свойствами выбора цели**. Системы, обладающие свойством целенаправленности, характеризуются отделением переменных выбора цели от остальных переменных и требованием того, чтобы переменные выбора цели способствовали её достижению [1].

Целенаправленные системы – это системы, ориентированные разработчиком на выполнение строго определённых целей.

Такие системы имеют чётко определённое целевое назначение для заданных условий, а также характеризуются набором ограничений по номенклатуре целей и заданным диапазоном допустимых изменений условий функционирования.

Примерами таких систем являются автоматы с жёсткой программой управления или простейшие механизмы, станки-автоматы по производству только определённых механических деталей, бытовые и промышленные холодильники, автономные системы отопления зданий с полуавтоматическим поддержанием температуры в определённом диапазоне, автомобили различного целевого назначения.

Принципиально иным является **класс целеустремлённых систем**.

Целеустремлённые системы – это системы, которые обладают следующими свойствами:

во-первых, воспринимать требования внешней по отношению к системе среды и формировать цели для достижения этих требований при условии существенно меняющихся ситуаций;

во-вторых, определять альтернативы всех изменений внешней среды и осуществлять целесообразный выбор альтернативы для достижения целей в складывающихся условиях функционирования системы.

Таким образом, важнейшим свойством целеустремлённых систем является их **адаптивность**, то есть способность динамично изменять цели и способы их достижения в соответствии с изменением ситуации. Целеустремлённые системы принципиально отличаются от целенаправленных систем высокой гибкостью, динамичностью и способностью реагировать на изменение условий внешней среды путём адаптации потребностей, целей и действий в складывающихся ситуациях.

Системы данного класса могут изменять функции, свойства и даже структуру как функциональных элементов, так и всей системы в целом.

Принципиальной особенностью целеустремлённых систем является то, что они обладают интеллектом – естественным или искусственным, либо их сочетанием.

Большинство известных целеустремлённых систем относится к классу **организационно-технических** или **экспертных**, в которых **главными элементами являются люди-операторы**, а также различного рода **технические средства поддержки принятия решений**, обладающие интеллектуальной составляющей [2].

В качестве примеров таких систем можно привести гибкие автоматизированные производства, способные в процессе функционирования изменять номенклатуру и объём выпускаемой продукции, диспетчерские службы крупных аэропортов и морских портов, способные одновременно обслуживать от нескольких десятков до нескольких сотен воздушных или морских судов в ходе изменяющихся погодных условий, и другие.

Иллюстрацией способности целеустремлённых систем к адаптации к изменяющимся условиям внешней среды являются действия персонала электростанций, крупных металлургических, горнодобывающих, химических и других производств в критических и аварийных режимах.

4.8. Проблема выбора границы системы

Как уже упоминалось ранее, подавляющее большинство систем является открытым.

Открытые системы – это системы, которые взаимодействуют с внешней средой, обмениваясь с ней различными ресурсами, в том числе: веществом, энергией и информацией.

При сборе исходной информации об объекте исследования необходимо учитывать, что практически все объекты являются открытыми системами.

Поэтому всегда важно определить границы открытой системы или, попросту говоря, установить, где заканчивается исследуемый объект и начинается окружающая среда.

При этом определяющим фактором всегда выступает **цель анализа**.

Например, если целью системного анализа является определение источника потерь электроэнергии в некоторой системе, то необходимо анализировать всю электроэнергетическую сеть этой системы.

Если же целью системного анализа является, например, создание экономичного электрогенератора, то все функциональные элементы за его пределами можно полагать внешней средой.

Однако приведенные примеры являются скорее исключением, чем правилом. **В подавляющем большинстве прикладных задач системного анализа определить физические границы объекта исследования по известному множеству целей достаточно сложно.**

Ведь противоречивые цели указывают на различные границы, а ориентация на супремум этих границ ведёт не только к чрезмерному их расширению, но и, что существенно важнее, – к существенному усложнению рассматриваемой задачи.

Кроме того, в ряде случаев, например, на ранних стадиях разработки уникального объекта практически неизвестны количественные данные относительно степени влияния различных функциональных элементов проектируемого изделия на уровень достижения целей и физические границы объекта исследования.

Более того, зачастую нельзя утверждать, что объект исследования определён полностью, так как каждый функциональный элемент описывается, как правило, определённой совокупностью показателей, которые характеризуют определённое множество свойств. Но степень влияния различных свойств на различные цели системной задачи существенно различаются.

Поэтому естественно стремление аналитика исключить из рассмотрения свойства тех функциональных элементов, степень влияния которых достаточно мала. Однако в таких случаях возникает вопрос: что принять за критерий малости влияния? Ответ на него неоднозначен,

причём он усложняется в случае, когда анализ необходимо выполнить для целеустремлённых систем.

Контрольные вопросы

1. Раскройте суть триединства структуры процесса научного познания.

2. Чем понимание термина «объект исследования» в традиционной науке отличается от понимания данного термина в системном анализе? Какие классы объектов выделяет Клир?

3. Сформулируйте определение термина «модель» и охарактеризуйте основные виды моделирования. Что в теории систем и системном анализе принято понимать под изоморфизмом математических моделей?

4. В чем состоит различие между прямыми и обратными задачами математического моделирования? Раскройте суть проблемы некорректности математических задач.

5. Дайте определение термина «базис» по Клиру и назовите основные и комбинированные базисы, используемые при построении математических моделей систем.

6. Опишите обобщенную математическую модель системы по Клиру.

7. В чем состоит суть кибернетического подхода к моделированию сложных систем разной природы? Поясните смысл терминов: «черный ящик», «белый ящик», «серый ящик».

8. Какие составляющие включает в себя неопределенность в контексте моделей типа «вход-выход»? Чем аддитивный подход включения неопределенности в модель отличается от мультипликативного?

9. Сформулируйте понятие цели. В чем состоит различие между целенаправленными и целеустремленными системами. Приведите примеры.

10. Раскройте суть проблемы выбора границы системы и приведите соответствующие примеры.

Литература

1. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 540 с.
2. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011. 729 с.
3. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1960. 434 с.

5. Определение, свойства и базовые принципы системной методологии

5.1. Понятие системной задачи

Прикладные задачи подразделяются на три класса [1]:

- **хорошо структурированные** (well-structured) или количественно сформулированные проблемы, в которых существенные зависимости выяснены очень хорошо; такие задачи называют также формализуемыми, поскольку они хорошо поддаются формализации в виде конкретной математической модели, на основании которой разрабатывается алгоритм решения задачи;

- **неструктурированные** (unstructured) или качественно выраженные проблемы, содержащие лишь описание важнейших ресурсов, признаков и характеристик, количественные зависимости между которыми совершенно неизвестны; такие задачи называют также неформализуемыми. В связи с невозможностью создания математического описания и разработки алгоритма решение неструктурированных задач сопряжено с большими трудностями. Возможности использования информационных систем здесь невелики. Решение в таких задачах принимается человеком, исходя из эвристических соображений, на основе знаний, опыта, интуиции и, возможно, косвенной информации из разных источников.

- **слабоструктурированные** (ill-structured) или смешанные проблемы, в которых доминируют качественные, плохо определённые факторы, а критерии оценки альтернатив принимаемых решений носят, как правило, субъективный характер (сам набор критериев может быть определён ЛПР). Такие задачи занимают промежуточное положение между формализуемыми и неформализуемыми, то есть являются лишь частично формализуемыми. Предельным вариантом слабоструктурированных задач являются неформализуемые задачи.

Неопределённость принятия решений в слабоструктурированных задачах включает в себя:

- объективную неопределённость среды;
- гносеологическую неопределённость, то есть неопределённость, обусловленную отсутствием у ЛПР достоверной информации;

- стратегическую неопределённость, то есть неопределённость, обусловленную зависимостью от действий других субъектов управления;

- лексическую неопределённость, то есть неопределённость, обусловленную нечёткостью данных, описывающих реальные процессы.

Примеры слабоструктурированных задач. Управление рисками чрезвычайных ситуаций, системный анализ биомедицинских данных, задачи биоинформатики, хемоинформатики, анализ текстов, распознавание речи.

Границы указанных трех классов нам представляются размытыми, что может быть продемонстрировано на примере различных прикладных задач, решаемых методами математического моделирования.

Таким образом, эти классы в ряде случаев представляют собою нечёткие множества.

Привлечение методов системного анализа сопряжено со следующими обстоятельствами: в процессе принятия решений часто приходится осуществлять выбор в условиях неопределённости, которая обусловлена наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке. В этом случае все процедуры и методы направлены именно на формирование альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштаба неопределённости по каждому из вариантов и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности.

В наиболее общем виде процедура решения слабоструктурированных и неструктурированных проблем может быть описана следующим образом:

- 1) формулировка проблемной ситуации;
- 2) определение целей;
- 3) определение критериев достижения целей;
- 4) построение моделей для обоснования решений;
- 5) поиск оптимального (допустимого) варианта решения;
- 6) согласование решения;
- 7) подготовка решения к реализации;
- 8) утверждение решения;
- 9) правление ходом реализации решения;
- 10) проверка эффективности решения.

Системные задачи возникают, как правило, в двух основных контекстах: при **исследовании** или при **проектировании** сложных систем (рис. 20).

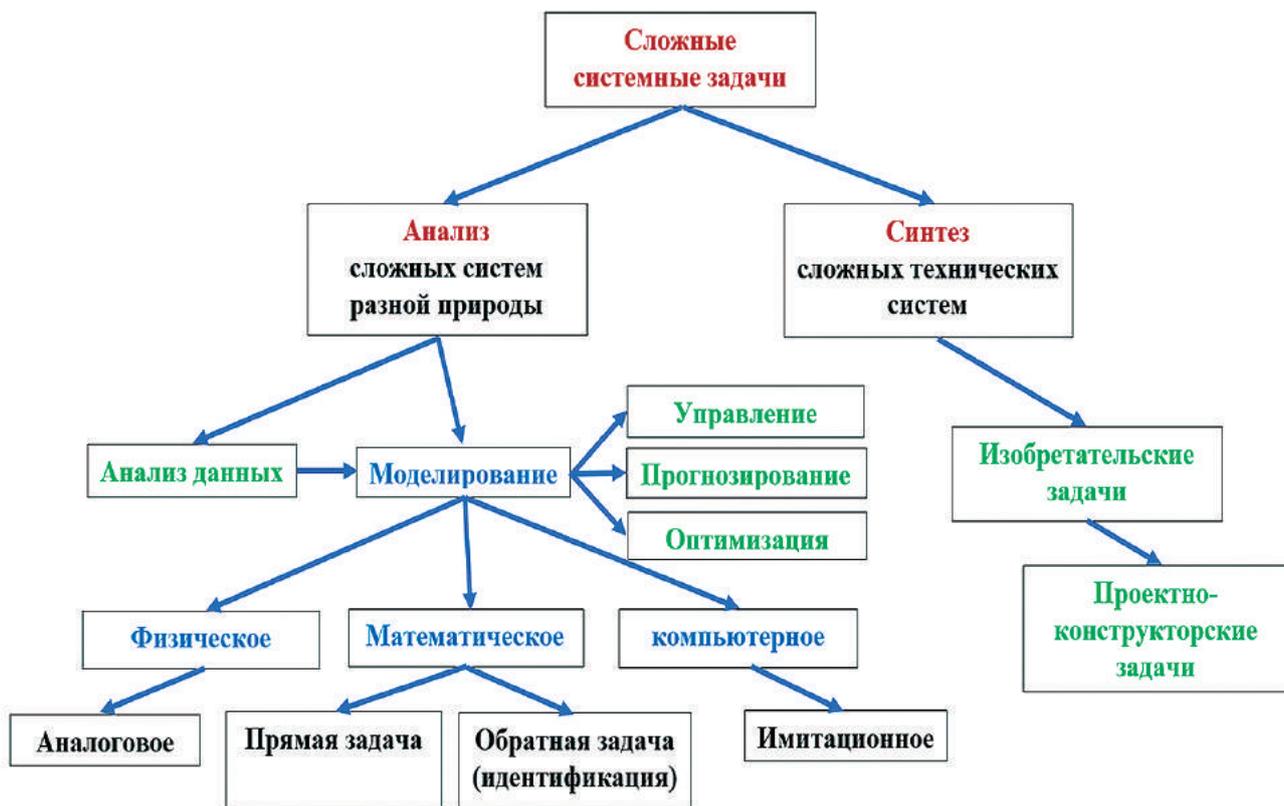


Рис. 20. Иерархия системных задач

Задачей исследования сложных систем является накопление знаний о состоянии их внутренних элементов и связи между ними, а также о характере взаимодействия этих систем с внешней средой, исходя из конкретных целей исследования, как правило, связанных с **моделированием, оптимизацией, управлением или прогнозированием.**

Задачей проектирования сложных систем является их создание на основе использования накопленных знаний для достижения **новых свойств** этих систем и **новых целей** при их взаимодействии с внешней средой.

Наиболее важной чертой проектирования систем является то, что параметрически инвариантные ограничения на некоторые переменные определяются пользователем, в то время как при исследовании систем эти ограничения неизвестны, и задача состоит в том, чтобы адекватно охарактеризовать их с учётом конкретной цели исследования.

В частности, реализация инновационных идей и технических решений отличается **противоречиями и неопределённостями**, важнейшими из которых являются следующие:

- неоднозначность и противоречивость требований к изделию;
- противоречивость целей и неоднозначность условий применения изделия;
- неопределённость и непредсказуемость возможных действий конкурентов;
- неограниченность и непрогнозируемость множества ситуаций риска на различных стадиях жизненного цикла изделия.

В этих условиях на основе разнородной неполной эмпирической, экспериментальной, каузальной и другой исходной информации разработчик должен формализовать и решить задачу проектирования изделия, в том числе сформулировать и обосновать цели создания изделия.

Результаты решения этой задачи должны доказать **практическую необходимость, технологическую возможность и экономическую целесообразность** производства проектируемого изделия. В условиях рыночной экономики должны также оцениваться риски на каждой стадии жизненного цикла изделия и с учётом всех факторов должны приниматься такие решения, чтобы риск являлся допустимым.

Аналогично в условиях неопределённости выполняются процедуры формализации и решения многих других прикладных системных задач.

Системная задача – это задача системного анализа определённого множества свойств объекта исследования с единой позиции системного, то есть целостного, подхода для достижения заданных целей исследования в складывающихся условиях.

Системные задачи бесконечно разнообразны в силу различия количества и видов целей, сложности и уникальности объекта исследования, исходя из качественного разнообразия структуры составляющих его элементов и связей между ними (реального или проектируемого изделия, сооружения, производства; реальной и прогнозируемой ситуации, технологии и так далее), объёма и качества исходной информации, объёма и уровня требований к качеству решения задачи и ряда других факторов.

Вместе с тем можно выделить **ряд общих свойств системных задач**, которые позволяют объединить системные задачи в особый класс:

- структурная упорядоченность и взаимозависимость связей между множествами исходных данных задачи и множествами конечных результатов её решения;

- согласованность и упорядоченность требований к указанным множествам;
- алгоритмическая неразрешимость и повышенный уровень вычислительной сложности системных задач;
- слабая структурированность, высокая степень неопределённости и, как следствие, лишь частичная формализуемость сложных системных задач.

Первые два свойства присущи не только системным задачам, но и задачам различных аксиоматических дисциплин, таких как теория управления, теория игр, теория принятия решений и другие.

Поэтому, следуя подходу Дж. Клира, необходимо обратить внимание на два последних свойства, поскольку именно они являются специфическими признаками системных задач и во многом определяют их основные свойства и особенности [2].

В частности, достоверность формализации реальной системной задачи практически полностью зависит от четвёртого фактора, а достоверность вычислений и результатов решения системной задачи определяется как достоверностью формализации локальных подзадач, так и объёмом и достоверностью исходной информации, а также уровнем вычислительной сложности формализованной части задачи.

Таким образом, большинство задач системного анализа следует интерпретировать как задачи, включающие в себя как формализуемые, так и принципиально неформализуемые составляющие. Например, не существует точного метода или алгоритма поиска рациональной структуры системы, декомпозиции её на иерархические уровни.

Кроме того, к важнейшим особенностям системных задач относятся их слабая структурированность, алгоритмическая неразрешимость, неполнота, неопределённость, неточность, нечёткость, противоречивость исходной информации.

Причём формализуемые и неформализуемые составляющие таких задач часто являются неразделимыми, то есть на каждом этапе анализа локальные подзадачи содержат в себе одновременно как формализуемые, так и неформализуемые части, которые невозможно отделить друг от друга.

Как правило, решение формализуемой составляющей задачи определяется полнотой и качеством основных характеристик её неформализуемой части.

Неформализуемые составляющие задачи формируются на основе опыта, интуиции человека с использованием принципов и методов экспертного оценивания, а также методов дискретной математики и имитационного моделирования.

Эти методы могут также использоваться для проверки достоверности и возможности реализации новых идей, гипотез и предвидения в разных сферах инновационной деятельности.

5.2. Основные свойства системной методологии

К важнейшим свойствам системной методологии следует отнести **результативность, эффективность и масштабность** [3].

Результативность – это способность методологии как рабочего инструментария пользователя обеспечить получение практически приемлемого решения прикладных системных задач в реальных условиях, характеризующихся неполнотой, неточностью, нечёткостью, противоречивостью, неопределённостью исходной информации.

Практически приемлемое решение – это результат, удовлетворяющий исследователя с позиции требуемой точности, достоверности и обоснованности.

Практически приемлемое решение должно обеспечить рациональный компромисс, разрешающий основное противоречие, возникающее при решении системных задач – это противоречие между точностью решения и сложностью процесса его получения.

Эффективность – это способность достигать конечного результата в форме решения реальных системных задач за практически приемлемое время с практически допустимыми затратами вычислительных, финансовых и иных ресурсов.

Смысл данного свойства определяется практической необходимостью сопоставления полезного эффекта от использования полученного результата и затрат ресурсов на его достижение. Он заключается в том, что экономический, социальный, экологический, оборонный или иной ожидаемый эффект от решения системной задачи должен быть соизмерим с затратами.

При этом необходимо обеспечить выполнение **условий**:

- **пессимистического** – полученный эффект должен компенсировать затраты;

- **оптимистического** – полученный эффект значительно превосходит затраты.

Масштабность – свойство применимости методологии для решения широкого круга прикладных задач, существенно отличающихся рядом факторов: природой объектов, областью применения, уровнем информированности исследователя, содержанием задач и другими особенностями. Смысл и значимость этого свойства очевидны из его определения.

5.3. Основные принципы системной методологии и их практическая реализация

Методология системного анализа окончательно не сформирована и по настоящее время находится в стадии становления. В связи с этим, следуя [3], выделим лишь некоторые, наиболее **фундаментальные, принципы системной методологии.**

Принцип целостности предполагает комплексное (системное) исследование на основе *системного подхода* объекта, окружающей среды и системы управления как единого целого, обеспечивающего достижение поставленной цели с заданными показателями качества.

Принцип системной согласованности – методы, подходы, методики, алгоритмы, пакеты прикладных программ должны быть взаимозависимыми структурно и взаимосвязанными функционально в единой системной методологии.

Принцип процедурной полноты – системная методология должна обеспечить выполнение всех процедур: от формализации постановки системной задачи до верификации полученных результатов её решения.

Принцип функциональной ортогональности – каждая процедура в системной методологии реализуется в виде совокупности функций, не зависящих от функций других процедур.

Принцип информационной взаимозависимости – исходная информация и результаты выполнения каждой процедуры должны быть взаимосогласованными информационно с другими взаимозависимыми процедурами этой методологии.

Принцип целенаправленного соответствия – процедуры и приёмы системной методологии должны быть взаимно согласованы и

взаимно соответствовать достижению единой цели обеспечения необходимой достоверности и обоснованности полученных результатов решения задачи.

Принцип функциональной рациональности – в системной методологии не должно быть взаимного дублирования выполняемых функций.

Принцип многоцелевой общности – методы и приёмы системной методологии должны обладать достаточным уровнем общности и обеспечивать решение разнотипных классов системных задач, различающихся назначением, целями, областью применения, природой объектов и другими аналогичными факторами.

Принцип многофакторной адаптивности – процедуры и приёмы системной методологии должны адаптироваться как к особенностям и свойствам системных задач, различающихся уровнем сложности, степенью полноты исходной информации и рядом других факторов, так и к требованиям ЛПР, в интересах которого решается системная задача.

Принцип процедурной открытости – приёмы и методы должны сохранять структурную взаимосвязь и функциональное взаимодействие, обеспечивая общую результативность методологии как при замене определённых процедур другими, так и при их структурном и функциональном агрегировании.

Принцип рациональной дополняемости – методология должна обеспечивать возможность введения дополнительных приёмов, методов, принципов в интересах расширения сферы её применимости при условии их непротиворечивости между собой и по отношению к исходной методологии.

Осуществление данных принципов обеспечивается только на основе **рационального сочетания возможностей человека-эксперта, современных вычислительных средств и методов математического моделирования.**

Поэтому в системной методологии важную роль играют эвристические подходы, основанные на использовании интуиции и опыта человека.

Практическая значимость эвристических приёмов и методов в системном анализе следует из ряда принципиально важных факторов.

Во-первых, задачам системного анализа принципиально свойственны такие особенности, как противоречивость и нечёткость целей,

неопределённость, неполнота, неточность исходной информации и ряд других факторов.

Во-вторых, человеку свойственно на основе интуиции, опыта и знаний дополнять отсутствующую информацию путём построения определённых эвристических гипотез, что принципиально необходимо при решении широкого круга сложных прикладных системных задач.

Например, такие задачи возникают при исследовании динамики критических и чрезвычайных ситуаций в технологических, экологических, социально-экономических системах, в которых важнейшим фактором является **действие пороговых и бифуркационных механизмов** их развития.

Так, действие **порогового механизма** состоит в том, что при переходе через определённое критическое значение (порог) определённых параметров (показателей) принципиально изменяются свойства процесса.

Сущность **бифуркационного механизма** заключается в возможности появления и реализации различных альтернативных траекторий развития ситуации при переходе определённых параметров через порог.

Эти обстоятельства определяют особую актуальность задач системного прогнозирования и предвидения критических и чрезвычайных технологических, экологических, социально-экономических ситуаций и критических режимов функционирования технических систем и технологических процессов.

Решение таких сложных прикладных системных задач невозможно без привлечения знаний, опыта и интуиции экспертов в соответствующих предметных областях. В данном случае используется способность человека воспринимать и различать альтернативы действий, устанавливать приоритеты, формировать предпочтения, предвидеть развитие событий.

Поэтому в методологии системного анализа для решения прикладных системных задач важное место занимают **эвристические подходы, приёмы и методы, принципы и методы экспертных процедур, а также методы и средства искусственного интеллекта.**

Кроме того, эвристические подходы являются составной частью общей системной методологии в задачах оценивания и прогнозирования развития различных техногенно и экологически опасных процессов,

мониторинга и анализа рисков чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных и критически важных объектах.

Рассмотрим также некоторые другие факторы, играющие важную роль в обеспечении достоверности и обоснованности решения сложных прикладных системных задач.

Прежде всего отметим, что общая методология системного анализа является открытой в том смысле, что при её применении имеется возможность обмена информацией с внешней средой по отношению к пространству решения задачи. В силу данного обстоятельства системная методология должна обеспечивать возможность использовать информацию, поступающую из внешней среды, для проверки корректности принимаемого решения на различных этапах системного анализа объекта или ситуации.

В этом смысле можно считать, что системная методология обладает механизмом обратной связи. Такой механизм является важной составляющей методологии, поскольку открывает возможность сопоставлять расчётные и реальные результаты. Сравнение результатов позволяет, например, корректировать процессы управления, что особенно важно в реальных условиях управления сложными техногенно или экологически опасными объектами при развитии нештатных, критических или аварийных ситуаций.

Однако следует учитывать, что **механизм обратной связи принципиально обладает свойством инерционности**. Поэтому для проверки правильности решения системных задач требуется определённое время.

В то же время, в условиях возникновения критических и чрезвычайных ситуаций ЛПР может не иметь резерва времени, позволяющего выполнить проверку правильности принятого решения.

В таких случаях весьма полезным является **метод многофакторного имитационного моделирования** для определения реакции системы на различные альтернативные варианты принимаемых решений.

Отметим также, что в системном анализе понятию «имитационное моделирование» отводится более широкое толкование, чем это традиционно принято.

Главное принципиальное отличие состоит в том, что при решении сложных прикладных системных задач **имитационное моделирование необходимо проводить с позиции принципа целостности**, суть

которого состоит в системном согласовании целей, задач, условий, свойств исследуемого объекта в процессе решения задачи.

Причём принцип целостности необходимо реализовывать с позиции **теории рисков**, а именно требуется учитывать уровень риска принимаемого решения в реальных условиях, для которых характерны как неполнота, неопределённость, неточность исходной информации, так и противоречивость целей исследования. Поэтому традиционный метод имитационного моделирования при решении задач системного анализа должен быть дополнен принципами и методами ситуационного моделирования и теории рисков. Это позволяет сформировать целостный рациональный инструментарий, способный работать в интерактивном режиме при рациональном использовании потенциальных возможностей вычислительной техники, программного обеспечения, а также знаний, умений, опыта, интуиции и возможностей предвидения человека.

Таким образом, для того чтобы системная методология была результативной, эффективной и масштабной, она должна обладать следующими важнейшими свойствами:

1. Целостность методологии с позиции достижения заданных целей исследования.

2. Системность учёта факторов, присущих реальным исходным условиям функционирования объекта: неполнота, неопределённость, неточность, нечёткость исходной информации, противоречивость и неоднозначность целей.

3. Возможность объяснения, обоснования и реализации осуществления рационального компромисса при решении системной задачи с позиции получения наилучших результатов достижения поставленных целей и снижения рисков.

4. Возможность предварительного прогнозирования эффективности различных альтернативных решений и последующей верификации принятого решения в реальной ситуации.

Дополнительно к приведенным свойствам необходимо сформулировать ряд **эвристических гипотез**, достоверность которых интуитивно очевидна и вытекает из опыта прикладных междисциплинарных исследований [3].

Необходимость введения этих гипотез диктуется рядом факторов, среди которых в первую очередь следует выделить возможность

различного субъективного подхода к выбору различных методов и процедур системного анализа для одних и тех же объектов различными специалистами.

Гипотеза 1. Объект системного анализа характеризуется своим общим назначением, определяемым позицией ЛПР, его пониманием целей и задач исследования объекта.

Гипотеза 2. Объект системного анализа изучается только в процессе его взаимодействия с окружающей средой (**открытая система**).

Гипотеза 3. Цели и задачи системного анализа по отношению к объекту определяются с позиции субъективного понимания ЛПР рационального компромисса между противоречивыми целями или требованиями, уровнем допустимого риска.

Гипотеза 4. Полагается, что штатным режимом для объекта является режим устойчивого функционирования в заданных условиях.

Гипотеза 5. Непредвиденный выход из режима устойчивого функционирования требует применения специальных методов системного анализа для таких ситуаций, в качестве которых могут быть использованы, в частности, методы теории надёжности, методы теории катастроф и другие.

Задачи системного анализа рассматриваются с позиции **принципа целостности**, то есть исследования объекта, окружающей среды и системы управления как единого целого, обеспечивающего достижение поставленной цели с заданными показателями качества.

Причём, в соответствии с **принципом декомпозиции и агрегирования** задача системного анализа разбивается на две подзадачи:

рациональная декомпозиция общих требований к системе на требования к функциональным подсистемам и функциональным элементам всех иерархических уровней;

агрегирование результатов анализа, реализуемости требований на каждом иерархическом уровне для каждой функциональной подсистемы и каждого функционального элемента в итоговый результат, определяющий технические характеристики системы и рациональные параметры её функционирования при заданных требованиях в заданных и прогнозируемых ситуациях.

Также, в связи с необходимостью решения системных задач повышенной сложности, важную роль играет их упрощение, реализуемое с учётом **принципа рационального компромисса**.

Особенно актуален такой принцип в связи с тем, что при этом **основное противоречие при решении системных задач связано с рациональным согласованием эффективности (точности, качества, практической полезности) получаемого решения и сложности процедуры его построения.**

Таким образом, при решении многих системных задач важнейшую роль играет принцип декомпозиции исходной задачи на последовательность более простых локальных подзадач с последующим агрегированием результатов их решения в итоговое решение исходной общей задачи системного анализа.

В свою очередь, каждая частная задача системного анализа декомпозируется на последовательность более простых задач.

Процесс декомпозиции происходит до такого уровня, когда полученная частная задача имеет формализованную часть, разрешимую с помощью известных или специально разработанных методов и алгоритмов. Аналогично осуществляется агрегирование полученных результатов.

Методологическая парадигма – это субъективный подход исследователя к решению конкретной прикладной системной задачи, оформленный в виде системно согласованного множества идей, подходов, методов, предположений и ограничений, выбираемых исследователем для решения конкретной прикладной системной задачи.

Если задача решается на основе использования определённой методологической парадигмы, то найденное решение не должно содержать особенностей, несовместимых с этой парадигмой. Целесообразно рассматривать парадигму, являющуюся подмножеством другой парадигмы, как частный случай последней.

Содержательная парадигма – это системно согласованное множество идей, подходов, методов, предположений и ограничений, гарантирующее возможность решения всех конкретных задач данного класса.

В последние годы наблюдается тенденция к обобщению парадигм, стимулируемая новыми достижениями в развитии системной математики и вычислительной техники. Любое обобщение парадигмы расширяет класс решаемых задач и во многих случаях позволяет получить лучшее решение.

Метаметодология систем – это новая область, предметом исследования которой является выявление связей между возможными методологическими парадигмами и классами системных задач.

Важным аспектом метаметодологии систем является разработка таких парадигм, которые для различных классов системных задач и современного состояния системной математики и вычислительной техники обеспечивали бы наилучший (оптимальный) компромисс между двумя противоречивыми целями – качеством и сложностью решения системных задач.

Основная трудность подобного исследования состоит в том, что для данной задачи при использовании одной и той же методологической парадигмы может быть разработано множество альтернативных процедур решения.

В то же время каждая математическая теория, имеющая смысл с точки зрения схемы решения системных задач, является по существу методологической парадигмой. Она связана с типом задач и представляет собой локальную систему, с использованием которой могут разрабатываться методы решения конкретных системных задач данного класса.

Одна из задач метаметодологии систем – это компиляция, то есть составление математических подходов и определение их места для решения полного пространства задач данного класса.

Другой задачей является построение новых содержательных парадигм для решения задач каждого типа. Поскольку выявление новой парадигмы служит толчком для создания нового математического подхода или совокупности методов, всесторонние исследования метаметодологии систем являются мощным стимулом для получения новых фундаментальных и прикладных научно обоснованных результатов в области системной математики, теории сложных систем и других разделах системных знаний.

5.4. Краткий обзор методов системного анализа

Системный анализ как прикладная общенаучная методология опирается на комплекс общенаучных, экспериментальных, естественнонаучных, математических методов.

Математические методы системного анализа восходят к самым разным фундаментальным теоретическим и прикладным математическим дисциплинам, таким как математический анализ, линейная алгебра, функциональный анализ, теория вероятностей и прикладная

математическая статистика, теория случайных процессов, дифференциальные уравнения, теория оптимизации и её приложения – исследование операций (теория принятия решений), дискретная математика, теория графов и сетей, теория автоматов, теория алгоритмов, теория управления (кибернетика) и другие.

В частности, системы дифференциальных и разностных уравнений и методы их решения используются в целях математического моделирования динамики сложных процессов разной природы. Простейшими примерами являются гармонический осциллятор и модели роста популяции. Более сложные примеры возникают при моделировании распределённых систем, в краевых задачах математической физики (уравнение теплопроводности и другие).

Методы оптимизации позволяют решать экстремальные задачи, то есть задачи поиска оптимальных альтернатив, минимизирующих либо максимизирующих заданный в конкретной задаче целевой критерий эффективности, причём такие задачи часто рассматриваются в условиях заданных ограничений на множество допустимых альтернатив.

Важнейшими прикладными разделами теории оптимизации являются задачи выпуклого, в частности, линейного, программирования; задачи нелинейного, в частности, квадратичного, программирования; задачи целочисленного программирования; задачи динамического программирования и другие. Во избежание возможных недоразумений отметим, что здесь термин «программирование» необходимо понимать в смысле «планирование», а не в смысле написания компьютерной программы.

Задачи оптимизации потоков на графах и сетях требуют применения специальных методов теории графов.

Модели сложных систем на графах и сетевые модели широко распространены в приложениях. В качестве примеров можно привести транспортные сети, интернет-сеть и другие. Примерами сетевых моделей являются сети Петри, искусственные нейронные сети, аналитические сети Саати.

В результате интеграции теории дифференциальных уравнений и методов оптимизации возникла новая теория, получившая название «вариационное исчисление», которая изучает методы решения вариационных задач, то есть задач оптимизации функционалов в условиях ограничений, заданных в условии задачи.

В отличие от конечномерных задач классической теории оптимизации задачи вариационного исчисления являются бесконечномерными.

Исторически первой прикладной задачей, инициировавшей создание вариационного исчисления, стала задача о брахистохроне – траектории наискорейшего спуска.

Другим примером вариационных задач является задача о геодезической линии, то есть задача о поиске кратчайшей кривой, соединяющей две заданные точки заданной поверхности.

Необходимость решения задач управления (синтеза алгоритмов управления) объектами разной природы актуализировало развитие методов теории управления (кибернетики).

А на стыке теории дифференциальных уравнений, оптимизации и кибернетики возникла качественно новая теория оптимального управления, в контексте которой решаются сложнейшие задачи поиска управления динамической системой в течение определённого периода времени таким образом, чтобы это управление обеспечивало экстремум (максимум или минимум) заданного в условии задачи целевого критерия эффективности.

Теория оптимального управления имеет важное прикладное значение, в частности, при решении задач запуска космических спутников и оптимального управления их полётом вдоль заданной траектории в заданных условиях.

Принятие решений представляет собой важнейшую функцию любого управленца. Принято считать, что область принятия решений сравнительно хорошо изучена. Однако и сегодня вопрос эффективности принятия решений в стремительно изменяющейся окружающей среде остается открытым [4].

Современная экономическая реальность такова, что ЛПР вынуждено принимать решения, действуя в рамках сложной и быстроменяющейся окружающей среды [5]. С конца 1970-х гг. исследователями был введен в оборот термин «принятие решений в динамической среде», который, как принято считать, наиболее полно охарактеризовал Б. Бремер [6].

Согласно представлениям Бремера для ситуации принятия решений в динамически сложной среде характерно **следующее**:

- необходимость принять несколько решений для достижения поставленной цели, каждое из которых должно рассматриваться в контексте остальных решений;

- принимаемые решения не являются независимыми: каждое последующее решение ограничено последствиями принятых ранее и, в свою очередь, накладывает ограничения на последующие решения;
- среда принятия решений изменяется как сама по себе, так и вследствие принимаемых решений;
- решения принимаются в режиме реального времени, то есть непосредственно в процессе изменения среды принятия решений.

Принятие решений в динамически сложной среде характерно для таких распространенных явлений, как, например, выбор маршрута при движении автомобиля, инвестирование на фондовом рынке в условиях высокой волатильности цен, командование армией в ходе боя, диспетчерский контроль за авиаперевозками, управление поставками и логистикой и т. п.

Исследования в этих областях и актуализируют необходимость развития системного анализа.

Широкий арсенал аналитических методов, используемых в системных исследованиях при решении сложных прикладных проблем, имеющих, как правило, междисциплинарный характер, включает в себя методы теоретических и прикладных математических дисциплин (математическое моделирование, планирование эксперимента, теория некорректных задач и др.), а также эвристические методы решения изобретательских задач, основанные на использовании принципа рациональности с привлечением знаний, опыта и интуиции экспертов соответствующих предметных областей.

В частности, математическая формализация содержательной постановки формализуемых составляющих системных задач осуществляется специальными методами **математического моделирования**, в контексте которого различают прямую и обратную задачу моделирования.

Смысл **прямой задачи математического моделирования** состоит в построении решения по заданной математической модели и технически не представляет трудностей.

Обратная задача математического моделирования, называемая также задачей идентификации, гораздо сложнее, так как состоит в построении приближённой математической модели по наблюдаемым вход-выходным данным, сгенерированной исследуемой системой. Важной особенностью обратных задач, затрудняющих процесс их решения,

является **проблема некорректности**, то есть неустойчивости решения (его повышенной чувствительности) к вариации исходных данных.

Практическая реализация всей совокупности методов решения сложных системных задач должна выполняться на специализированном программном обеспечении с использованием труда не только математиков, аналитиков, но и высококвалифицированных программистов.

В силу чрезмерной широты, многообразия и повышенной математической и алгоритмической сложности большинства методов прикладного системного анализа ограничимся здесь лишь кратким обзором основных идей и методов системного анализа, широко применяемых, в частности, при решении слабоструктурированных, трудноформализуемых задач сценарного анализа и моделирования будущего.

Согласно представлениям Згуровского М.З. и Панкратовой Н.Д. **методология сценарного анализа** реализуется в четыре этапа [3]:

Этап 1. Предварительное исследование проблемы.

Этап 2. Качественный анализ проблемы.

Этап 3. Написание сценариев.

Этап 4. Анализ и отбор сценариев.

На **первом этапе** сценарного анализа применяется два основных метода: **метод сканирования** и **метод мозгового штурма**.

На **втором этапе** сценарного анализа применяется другая группа методов, наиболее известными из которых являются **метод Делфи**, **метод перекрёстного влияния**, **метод Саати**, **метод морфологического анализа**.

На **третьем этапе** сценарного анализа реализуется **метод написания сценариев**.

На **четвёртом этапе** осуществляется комплексный анализ сценариев.

Метод сканирования используется при первом осмыслении проблемы в широком диапазоне (фокусе) идей и подходов, которые могут применяться для её решения.

Как правило, данный метод используется для предварительного исследования новых проблем, для которых отсутствует опыт практического решения.

Алгоритм применения метода сканирования состоит из следующих шагов.

1. Создать группу экспертов – специалистов в области, к которой может быть отнесена исследуемая проблема.

2. Каждый эксперт должен сгенерировать идею, касающуюся способа решения рассматриваемой проблемы или, по крайней мере, охарактеризовать возможные подходы к её решению. Мнения экспертов оформляются в виде аннотаций концептуального характера. На этом этапе идеи, сформулированные каждым экспертом, не обсуждаются. Иногда предпочтения отдаются анонимному способу высказывания и накопления мнений экспертов.

3. Специалисты, которые должны принимать решения, часть которых может относиться к группе экспертов, рассматривают все аннотации экспертов. Целью данного рассмотрения является **кластеризация**, то есть распределение на группы, всех идей и мнений, сгенерированных экспертами.

4. Специалисты, принимающие решения, из всего множества кластеров отбирают так называемые **конструктивные кластеры**, которые исследуют и используют на последующих этапах решения проблемы.

Метод мозгового штурма предназначен для глубокого и интенсивного исследования проблемы в узких направлениях, диапазонах или фокусах идей и подходов.

Сначала определяются узкие направления, например, путём кластеризации на основе использования метода сканирования.

Алгоритм применения метода мозгового штурма сводится к следующим шагам.

1. Сформировать проблему в заданном узком фокусе – узкой постановке задачи или узкой платформы.

2. Создать группу экспертов – специалистов в узкой области знаний в соответствии со сформулированной проблемой.

3. В условиях ограниченного времени и заданного перечня критериев эксперты должны сгенерировать множество идей и подходов к решению проблемы для определённого диапазона возможных решений и отнести их к временной перспективе исследования. Обсуждение сформулированных суждений, исходя из их преимуществ и недостатков, не проводится. Иногда работу экспертов организуют в анонимном формате, чтобы обеспечить независимость мнения каждого эксперта.

4. Сгенерированные мнения укрупненно разделяют на **две временные группы** – мнения, актуальные на будущее, например, на период,

не менее 5 лет, и мнения на текущий период времени, которые не используются для предвидения.

5. Отобрать и задокументировать те идеи и подходы к решению проблемы, которые будут использоваться на последующих этапах её решения. Такой отбор может осуществлять иная группа специалистов, ответственных за принятие решений. Эта группа также задаёт перечень критериев, с учётом которых эксперты должны генерировать свои суждения.

Примеры основных критериев, характерных для создания новых видов конкурентоспособных технологий с использованием метода мозгового штурма:

К1. Существующие и потенциальные рынки для создаваемой продукции и технологий, которые используются в конкурентной борьбе.

К2. Прямое влияние на внешнюю торговлю.

К3. Социальная приемлемость создаваемых технологий и важнейшие стимулы.

К4. Интересы в поддержке конкурентоспособной продукции.

К5. Уязвимость и риски индустриальной зависимости продукции.

К6. Вклад в национальные потребности в области обороны, энергетики, экологии, охраны здоровья и культуры, соответственно.

К7. Взаимосвязи с национальной промышленностью.

К8. Возможность внедрения технологий в национальную промышленность и их всестороннее признание.

К9. Устойчивость в условиях глобального влияния конкуренции.

Таким образом, на этапе предварительного анализа проблемы целесообразно последовательно использовать оба описанных метода.

При первом ознакомлении с проблемой применяют метод сканирования с целью формулирования и кластеризации всех конструктивных идей и подходов к её решению в широком диапазоне (фокусе) исследований.

Затем, для каждого из предварительно определённых направлений исследований, которые соответствуют своему кластеру, исследуют проблему с учётом группы заданных критериев, в узком фокусе исследований, с помощью метода мозгового штурма. Отобранные и задокументированные идеи и подходы к решению сформулированной проблемы используются для подготовки решений на дальнейших этапах системного анализа.

Метод Делфи известен в отечественной литературе как **метод экспертных оценок**. Метод назван в честь древнегреческого города Дельфы, где жили оракулы. За длительную историю своего существования данный метод был существенно развит, приобрёл разнообразные интерпретации и широкое практическое применение.

Несмотря на многочисленные модификации, основная идея вышеупомянутого метода сохранилась. Идея состоит в необходимости получения группой экспертов вывода о поведении в будущем одной или нескольких связанных между собой характеристик (свойств) исследуемой системы. Полученные результаты используются для построения возможных сценариев поведения исследуемой системы.

С этой целью на первом этапе разрабатываются так называемые **опросные формы**, которые применяются для сбора оптимальных оценок значений исследуемых характеристик, предложенных экспертами.

Алгоритм применения метода Делфи состоит из следующей последовательности шагов.

1. Подобрать группу экспертов в соответствии с характером и темой исследуемой проблемы.

2. Сформулировать цели, которых предполагается достичь в результате решения проблемы.

3. Разработать форму для опроса сформированной группы экспертов.

4. Опросить экспертов в соответствии с разработанной формой.

5. Провести статистическую обработку данных опроса с целью синтеза новых результатов.

6. Проанализировать полученные результаты каждого эксперта и предоставить эксперту возможность учесть ответы и вывод всей группы.

7. На случай, если некоторые эксперты скорректируют свои ответы, после пункта 6 требуется выполнить повторную обработку данных опроса в соответствии с пунктом 5.

8. Пункты 5-7 следует выполнять до тех пор, пока эксперты не прекратят корректировать свои ответы.

Таким образом, достигается **консенсус**.

Правда, иногда случается ситуация, в которой, несмотря на многочисленные попытки, в ответах экспертов так и не удаётся достичь стабильности, что указывает на невозможность разрешения

сформулированной проблемы или на не совсем удачный подбор экспертов.

В таких случаях нужно, начиная с пункта 1, пройти заново все шаги.

9. Проанализировать консенсусное решение экспертов дополнительно для его интерпретации и разработки сценариев развития исследуемой системы.

Метод перекрёстного влияния основывается на применении метода Делфи для получения экспертных оценок относительно наиболее существенных событий, которые могли бы охарактеризовать будущее на определённом отрезке времени.

На основании полученных результатов строится квадратная **матрица перекрёстного влияния** событий, порядок которой равен числу событий.

Затем, с помощью методов моделирования сложных систем, в частности: многофакторного имитационного моделирования, стохастического моделирования и других методов, вычисляются оценки соответствующих безусловных и условных вероятностей рассматриваемых событий.

Далее проводится ещё один этап моделирования с применением одних и тех же методов для получения оценок реализации каждого возможного сценария.

Множество наиболее вероятных сценариев составляет основу для прогнозирования будущего.

Метод Саати разработан в конце 1970-х гг. американским математиком **Томасом Л. Саати (Thomas L. Saaty)** и базируется на его результатах в сфере **неструктурированного принятия решений**.

В литературе данный метод известен также под названием «**Метод анализа иерархий**» (МАИ) (в оригинале **Analytic Hierarchy Process**).

Несмотря на то, что метод Саати на ранних этапах применения рассматривался исключительно как вспомогательный инструмент теории принятия решений, со временем его начали использовать при решении задач прогнозирования, что делает его довольно перспективным.

В отличие от других методов идея метода Саати состоит в обязательном условии **фокусирования**, то есть схождения к чему-то единому, например, **миссии** или **главной стратегической цели**, по отношению к выводам экспертов и действиям многочисленных исполнителей

сложного процесса. То есть в этом случае метод основывается на причинной перспективе процессов, закладываемых в основу разработки сценариев будущего.

Применение метода базируется на построении так называемых **иерархических сетей** при построении модели, предназначенной для расчёта вероятностей реализации каждого возможного сценария в будущем.

В начале группа специалистов должна хотя бы вербально определить, чем являются реально возможные альтернативные сценарии будущего.

Вероятность реализации или степень неопределённости каждого возможного сценария вычисляется далее путём формального применения метода анализа иерархий (МАИ – для иерархий) или метода аналитических сетей (МАС – для иерархических сетей с обратной связью).

Метод морфологического анализа предложен в 1969 году швейцарским математиком и астрономом **Фрицем Цвикки (Fritz Zwicky)** для изучения новых геометрических форм, которые могут приобретать создаваемые технологические системы.

Данный метод основывается на применении системного подхода и в этом плане предполагает идентификацию **параметров (свойств), характеризующих исследуемую систему.**

Например, для создаваемого автомобиля нового образца характеризующими параметрами являются: подвижная система; система торможения; двигатель; система передач; компьютерная система управления; система электрического питания и другие.

Для каждого характеризующего параметра необходимо определить его **возможное морфологическое пространство**, то есть **множество возможных значений** (как имеющихся, так и желаемых) этого параметра.

Например, возможное морфологическое пространство параметра «Двигатель» есть множество, состоящее из трёх элементов: внутреннего сгорания; электрического; турбоэлектрического.

Морфологический ящик (возможное морфологическое пространство создаваемой системы) с теоретико-множественной точки зрения есть декартово произведение возможных морфологических пространств характеризующих её параметров. Морфологический ящик можно рассматривать как многомерную матрицу, в которой

число измерений равно числу характеризующих параметров. Поэтому мощность (число элементов) пространства системы есть произведение мощностей возможных морфологических пространств характеризующих её параметров.

Из возможного морфологического пространства системы с помощью целевых **критериев ранжирования (многомерной классификации)** выделяют так называемое **морфологическое пространство реального достижения системы**, в котором в качестве решения останутся лишь те элементы, которые реально могут быть достигнуты.

Таким образом, разрешение проблемы создания системы достигается тогда, когда элементы возможных морфологических пространств для различных характеризующих параметров **совместимы**.

Метод написания сценариев разработан Дэвидом Лоувириджем – известным специалистом в области технологического предвидения из Великобритании (Манчестер).

Алгоритм применения данного метода включает в себя девять шагов:

1. Определение цели написания сценария.
2. Разработка программы STEEPPV – инструмента анализа окружения, который позволяет выявить возможности и угрозы по отношению к анализируемой системе с точки зрения достижения поставленной цели, реализуемой в условиях действия 6 групп факторов:
 - социальных (Social);
 - технологических (Technological);
 - экономических (Economic);
 - окружающей природной среды (Environmental);
 - политических (Political);
 - индивидуальных ценностей (Personal Values).
3. Введение допущений в сценарий.
4. Построение альтернативной схемы событий.
5. Написание сценария.
6. Анализ сценария с учётом ответвлений и поворотных моментов.
7. Формулировка политики для субъектов сценария.
8. Разработка альтернативных стратегий поведения субъектов сценария.
9. Оценивание эффективности альтернативных стратегий методом имитационного моделирования.

На **четвёртом этапе** сценарного анализа сценарии предоставляются группе специалистов, которые должны принимать стратегические решения и проводить их комплексный анализ этих сценариев в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Оценка уровня реалистичности и реализуемости каждого сценария. Такая оценка осуществляется на основе поиска к каждому событию сценария контрпримера или антисобытия, исключающего возможность реализации анализируемого события. Если такие антисобытия удаётся найти, то уровень доверия к исследуемому сценарию снижается. Процедура реализуется на основе применения **методов комбинаторного анализа**.

2. Оценка вероятностей событий, лежащих в основе сценариев, проводится с применением известной в теории вероятностей **формулы Байеса**, то есть в оценке соответствующих условных вероятностей.

3. Оценка рисков, связанных с каждым сценарием, должна быть комплексной (многофакторной) и учитывать как вероятность нежелательных событий, так и ущерб от их реализации.

4. Многофакторное имитационное моделирование осуществляется при использовании широкого арсенала методов и алгоритмов моделирования в целях комплексного исследования каждого сценария в условиях различных комбинаций внешних факторов и вероятностей реализации событий, определяющих данный сценарий.

5. Выбор наиболее приемлемых сценариев с точки зрения указанных выше критериев осуществляется группой специалистов, принимающих стратегические решения, с учётом приведенных выше критериев и характеристик, а также других соображений, относящихся исключительно к компетенции и ответственности этих людей.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит различие между хорошо структурированными, неструктурированными и слабоструктурированными задачами? К какому из указанных классов в наибольшей мере относятся системные задачи?

2. Сформулируйте определение системной задачи и назовите наиболее важные свойства системных задач.

3. Как соотносятся между собой формализуемые и неформализуемые составляющие сложных прикладных системных задач?

4. Перечислите основные принципы системной методологии и назовите ее основные свойства.
5. Поясните суть действия порогового и бифуркационного механизмов развития сложных систем разной природы.
6. Сформулируйте следующие принципы: целостности, декомпозиции и агрегирования, рационального компромисса.
7. Какое основное противоречие становится наиболее актуальным при решении сложных системных задач?
8. Чем отличается методологическая направленность методов сканирования и мозгового штурма?
9. Опишите основные шаги реализации метода Делфи.
10. Охарактеризуйте предназначение и основную идею методов морфологического анализа.

Литература

1. *Дрогобыцкий И.Н.* Системный анализ в экономике: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. 423 с.
2. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 540 с.
3. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011, 729 с.
4. *Каталевский Д.Ю.* Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 496 с.
5. *Sterman J.* Misperceptions of Feedback in Dynamic Decision Making // *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. 1989. 43 (3). P. 301–335.
6. *Brehmer B.* Dynamic decision making: Human control of complex systems // *Acta Psychologica*. 1992. 81 (3). P. 211–241.

6. Системное представление объекта исследования и основных аналитических процедур в концептуально-функциональных пространствах

6.1. Первое концептуально-функциональное пространство

В подавляющем большинстве прикладных задач имеют место сложные, качественно разнотипные взаимосвязи, взаимозависимости и взаимодействия трех составляющих – объекта, внешней среды и человека.

Объект – материальный объект естественного или искусственного происхождения, используемый или производимый в процессе практической деятельности человека, либо ситуация, сложившаяся в результате воздействия природных, техногенных, антропогенных факторов.

Внешняя среда – внешнее окружение человека и объекта его исследования – природная среда, внешние объекты, взаимосвязанные или взаимодействующие с рассматриваемым объектом.

Человек – разработчик, производитель, пользователь объекта, ЛПР или специалист-исследователь соответствующей предметной области, к которой принадлежит исследуемый объект.

Взаимосвязи в системе «человек–объект–среда» имеют **принципиальные особенности**, такие как неполнота, неопределённость, неточность, нечёткость и противоречивость исходной информации. В совокупности эти особенности кратко обозначают термином «**не-факторы**».

Действительно, в процессе разработки, эксплуатации и исследования объекта не удаётся в полной мере учитывать свойства и влияние среды. Внешнее окружение объекта, как правило, не имеет чётких границ, так как любой объект имеет сложные, многообразные, качественно разнотипные связи и взаимодействия с внешним миром – энергетические, материальные, информационные, природные и так далее.

Более того, не существует в принципе системы универсальных постоянных, которые позволяли бы чётко и количественно однозначно характеризовать все возможные связи и взаимодействия. К примеру, нельзя количественно однозначно определить унифицированные природные условия эксплуатации техники, в частности, для спасательных средств.

Так, условия Крайнего Севера принципиально отличаются от условий пустынь и полупустынь, а те, в свою очередь, резко отличаются от условий джунглей. И даже в пределах одной климатической зоны различные группы факторов, по многим характеристикам являясь противоположными, предъявляют противоположные требования к объекту: сооружению, технологии, транспортному средству и так далее.

Ещё одной важной особенностью взаимодействия в системе «человек–объект–среда» является **неопределённость и неоднозначность целей**.

Невозможно количественно однозначно охарактеризовать цели разработки или исследования объекта. Ведь любой создаваемый объект должен одновременно удовлетворять не одной, а множеству целей (критериев), которые, как правило, противоречивы или противоположны.

Например, противоречивыми являются цели достижения высокой надёжности изделия и его низкой стоимости, высокой прочности и малого веса и так далее.

Кроме того, цели разработки должны учитывать многие латентные, скрытые факторы, которые могут иметь решающее значение при рассмотрении конкурентных альтернативных решений.

Примерами таких факторов являются эстетические, эргономические, этнические и другие факторы, в том числе, привычки и навыки потенциального пользователя объекта.

Отсюда следует необходимость поиска рационального компромисса как между различными группами факторов взаимодействия в системе «человек–объект–среда», так и внутри каждой группы, соответственно.

В частности, при определении границ объекта при формализации общей постановки системной задачи важно обеспечить рациональный компромисс между такими определяющими обобщёнными противоположными критериями, как качество решения (которое требуется

максимизировать) и сложность процедуры получения решения (которую требуется минимизировать).

Итак, **решение сложных прикладных системных задач**, возникающих в практической деятельности человека, **требует поиска рационального компромисса**.

Но такая процедура является **субъективной**, так как **критерии сравнения и предпочтения альтернативных вариантов выбирает ЛПР**.

Многие исследователи склонны считать, что для ЛПР характерно принятие решений в условиях так называемой **ограниченной рациональности (bounded rationality)** – термин, который ввел в оборот известный ученый-экономист Герберт Саймон [1].

То есть, даже в случае умеренно сложной ситуации в процессе принятия решений ЛПР значительно упрощает картину мира, что способствует принятию далеко не самых оптимальных решений [2].

Поэтому, при одних и тех же исходных данных, различные ЛПР могут получать существенно различающиеся между собой решения.

Кроме того, в силу **принципа дополнительности Гёделя**, для оценки качества и эффективности решений, генерируемых ЛПР на основе его субъективной системы критериев, **необходимо перейти к более мощной системе критериев**, открывающей возможность использования дополнительного аппарата оценки [3].

Таким образом, возникает объективная необходимость привлечения **системного аналитика**, наблюдающего за системой «человек – объект – среда» как бы сверху.

Полученная расширенная система, представленная в форме тетраэдра, образует так называемое **первое концептуальное функциональное пространство** (рис. 21).

Необходимость наличия системного аналитика обуславливается не только и даже не столько его ролью как эксперта, наблюдающего «сверху» всю систему отношений «человек–объект–среда», сколько высоким уровнем сложности системных задач.

Кроме того, для решения сложных системных задач на разных стадиях жизненного цикла сложных многоуровневых иерархических систем или для исследования многоуровневых, многоцелевых, многофакторных проблемных ситуаций необходимо создавать адекватную многоуровневую иерархическую организационную систему, на каждом

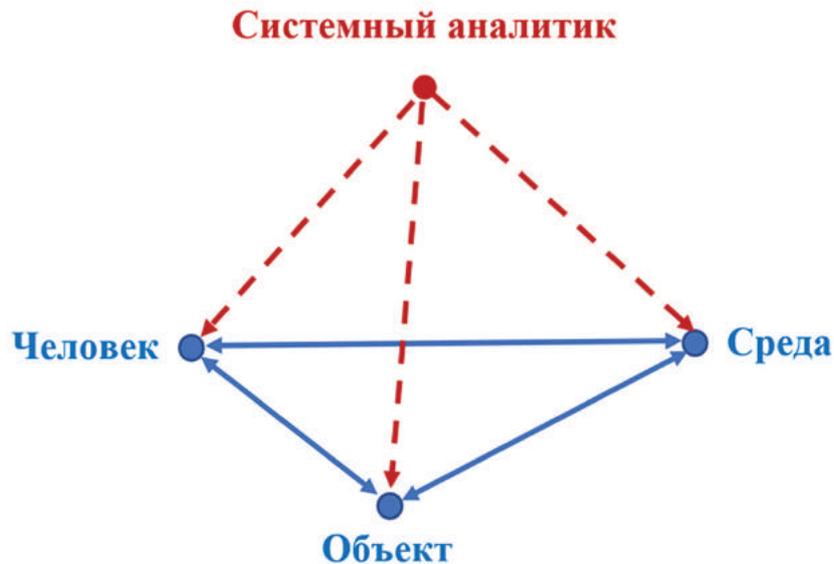


Рис. 21. Первое концептуально-функциональное пространство

уровне которой должны присутствовать группы системных аналитиков, способные решать сложные прикладные задачи или анализировать возникающие проблемные ситуации.

Привлечение системного аналитика или даже аналитических групп, создаваемых на каждом уровне иерархии управления (принятия решений) в динамически сложной среде, обеспечивает целостное, системно согласованное (по целям, срокам реализации, ограниченным ресурсам и ожидаемым результатам) представление проблем принятия решений.

6.2. Пространство условий функционирования системы

При решении сложных прикладных системных задач, помимо первого, выделяют также второе и третье концептуальное функциональное пространство.

Второе концептуально-функциональное пространство – это пространство условий функционирования системы (рис. 22).

Координатными измерениями в данном пространстве являются три обобщённых параметра: сложность целей, сложность ситуации, энтропия [3].

В данном пространстве выполняется три вида анализа: целевой, ситуационный и информационный.

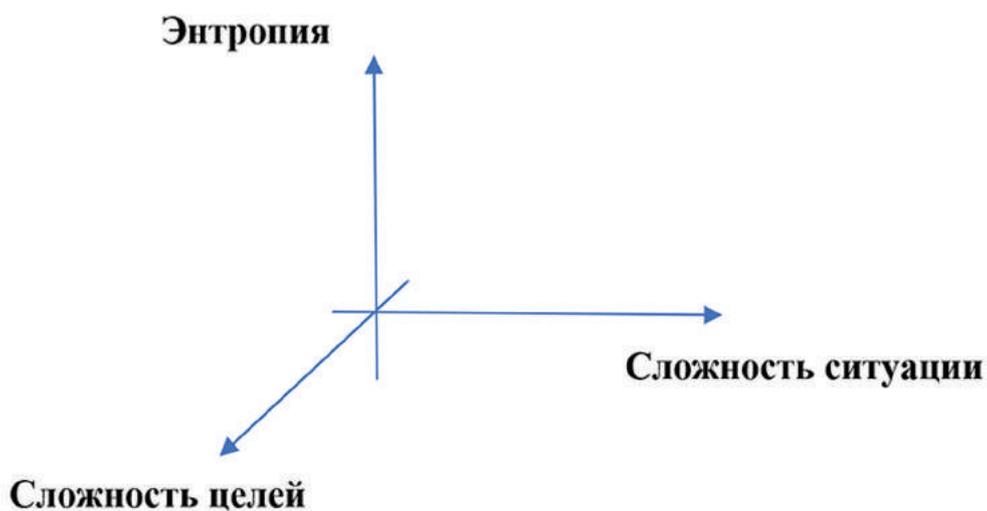


Рис. 22. Пространство условий функционирования системы

Целевой анализ позволяет определить множество точек оси «Сложность целей», количественно характеризующих всё многообразие свойств и особенности целей.

Ситуационный анализ позволяет определить множество точек оси «Сложность ситуации», количественно характеризующих свойства и особенности всего многообразия штатных и прогнозируемых нештатных ситуаций.

Информационный анализ позволяет определить множество точек на оси «Энтропия», количественно характеризующих уровень дефицита информации о целях и ситуациях функционирования объекта исследования.

6.3. Пространство свойств системы

Третье концептуально-функциональное пространство – это **пространство свойств системы** (рис. 23).

Координатными измерениями в данном пространстве являются три обобщённых параметра: сложность объекта, сложность управления объектом, технико-экономическая эффективность [3].

В этом пространстве выполняется три вида анализа: структурно-функциональный, организационно-процедурный и технико-экономический.

Структурно-функциональный анализ позволяет определить множество точек оси «Сложность объекта», количественно характеризующих допустимые значения сложности показателей структуры

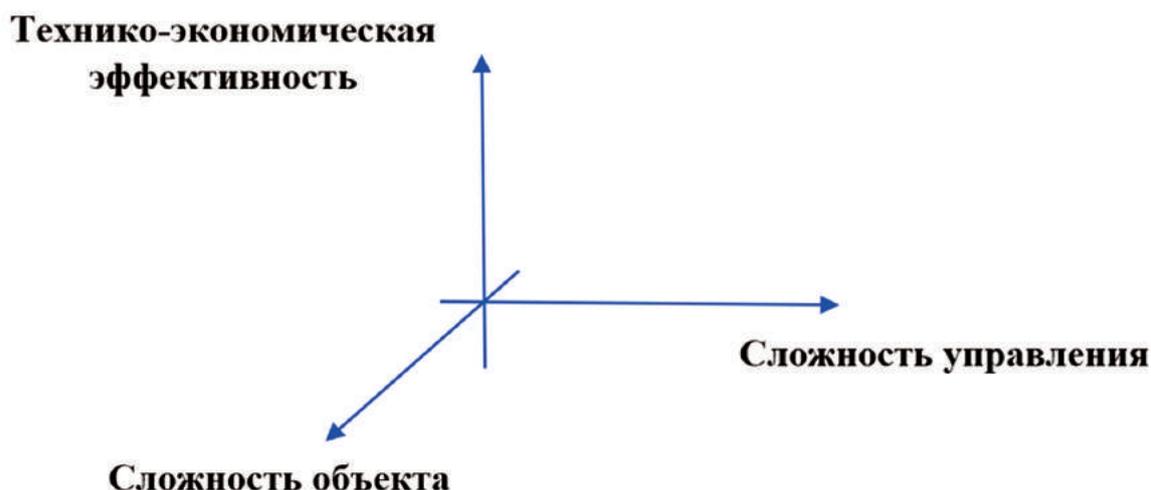


Рис. 23. Пространство свойств системы

и функций объекта, необходимые для достижения заданных целей в заданных ситуациях, определяемых функциональным пространством условий функционирования.

Организационно-процедурный анализ позволяет определить множество точек оси «Сложность управления», количественно характеризующих свойства, структуру и функции системы управления объектом для заданных условий его функционирования.

Технико-экономический анализ позволяет определить множество точек оси «Технико-экономическая эффективность», количественно характеризующих получаемый эффект и затраты на его достижение в заданных условиях, а также технико-экономическую эффективность объекта.

6.4. Основные аналитические процедуры в концептуально-функциональных пространствах

Взаимосвязь этих процедур определяется целями и особенностями функционирования исследуемой системы и особенностями решаемой задачи: моделирования, проектирования системы, оптимизации, а также прогнозирования потенциальных возможностей эксплуатации созданной системы в новых нестандартных ситуациях, технического тестирования работоспособности системы и другие.

В зависимости от особенностей и постановки задачи могут изменяться взаимосвязь и степень применения указанных процедур.

Рассмотрим более подробно свойства процедур, положив последовательность основных процессов заданной [3].

Целевой анализ – определение целей функциональных элементов на основе заданных целей системы.

Процедура целевого анализа включает в себя следующую последовательность действий:

1. Последовательная многоуровневая иерархическая декомпозиция заданного множества целей на цели подсистем и элементов каждого из заданных иерархических уровней.

2. Формирование количественных показателей, определяющих степень и уровень достижения общей цели системы и локальных целей её подсистем и элементов.

3. Установление функциональной взаимосвязи целевых показателей подсистем и элементов для различных иерархических уровней с показателями общей цели системы.

4. Установление допустимых интервалов изменений целевых показателей функциональных подсистем и элементов иерархических уровней в соответствии с допустимыми интервалами изменения показателей целевой функции системы.

При разработке сложных технических систем процедура целевого анализа заключается в определении корректности технического задания таким образом, чтобы различные показатели технического задания достаточно полно определяли цели разрабатываемой системы, допустимые интервалы их изменений.

Значения и допустимые интервалы изменения показателей должны быть взаимно согласованными и технически реализуемыми.

На данном этапе осуществляется декомпозиция требований создаваемой системы в соответствии с требованиями к основным подсистемам и функциональным элементам, из которых состоит проектируемая система.

Ситуационный анализ – выбор рациональных условий функционирования системы.

В целях корректности понимания дальнейшего изложения введём следующие определения.

Ситуация – это определённое состояние рассматриваемой системы и среды её функционирования, которые характеризуются априорно

установленными интервалами изменения значений показателей системы и функциональных характеристик среды.

Штатные ситуации – это ситуации, при которых показатели системы и функциональные характеристики среды находятся в априорно заданных интервалах. Например, работа автомашин в определённых климатических условиях, в частности, в условиях Крайнего Севера.

Нештатные ситуации – это ситуации, при которых отдельные показатели системы или отдельные функциональные характеристики среды выходят за пределы границ допустимых интервалов, но не создают условий полного нарушения функционирования или разрушения объекта.

Критические ситуации – это ситуации, при которых ряд показателей системы или функциональных характеристик среды выходит за пределы границ допустимых интервалов и создаёт условия для такого нарушения процессов функционирования объекта, которое ведёт к частичному или полному его разрушению, создаёт опасные условия для обслуживающего персонала или приводит к экологически опасным последствиям.

Процедура ситуационного анализа включает в себя следующую последовательность действий:

1. Формирование множества управляемых штатных ситуаций системы и прогнозирование наиболее вероятных нештатных и критических ситуаций в процессе её функционирования.
2. Определение количественных характеристик штатных ситуаций и допустимых интервалов их изменения.
3. Прогнозирование возможного множества нештатных ситуаций и выделение наиболее вероятных из них.
4. Выявление особенностей и определение характеристик наиболее вероятных нештатных ситуаций.
5. Выявление множества критических ситуаций, условий их появления и их характеристик.
6. Выявление условий возможного перехода штатной ситуации в нештатную или критическую.
7. Выявление условий возможного перехода из нештатной ситуации в штатную.
8. Выявление условий предотвращения критических ситуаций.

Информационный анализ – формирование основных сведений о системе для достижения заданных целей.

Процедура информационного анализа включает в себя следующую последовательность действий:

1. Определение полноты, достоверности и своевременности получения информации, необходимой для управления системой в интересах достижения заданных целей в штатных и нештатных ситуациях.

2. Определение характеристик информационных систем, соответствующих заданному уровню информационного обеспечения управления объектом в штатных и нештатных ситуациях (полнота, достоверность, своевременность информации).

3. Выбор и анализ процедур получения, хранения, обработки информации для обеспечения управляемости системы в штатных и нештатных ситуациях.

4. Выбор и анализ процедур формирования, обоснования и принятия решения при управлении системой в штатных ситуациях и в процессе перехода системы из нештатной ситуации в штатную.

5. Определение показателей информационного обеспечения процедур прогнозирования нештатных и критических ситуаций и их последствий.

Структурно-функциональный анализ – определение рациональной структуры и функций подсистем и элементов системы, необходимых для достижения заданных целей.

Процедура структурно-функционального анализа включает в себя следующую последовательность действий:

1. Определение полного состава функций, обеспечивающих достижение заданных целей в заданных условиях функционирования, например, перечень всех функций управления, необходимых для получения электроэнергии;

2. Установление рациональной иерархической структуры системы, обеспечивающей достижение заданной цели при заданных ограничениях на ресурсы.

3. Определение функционально полного состава подсистем и элементов для каждого иерархического уровня системы.

4. Нахождение рациональных характеристик функциональных подсистем и элементов для каждого иерархического уровня.

5. Получение условий достижения заданных характеристик функциональных подсистем и элементов для каждого уровня иерархического представления системы.

Организационно-процедурный анализ – организация и реализация процедур управления в условиях изменения внешней среды.

Процедура организационно-процедурного анализа включает в себя следующую последовательность действий:

1. Определение функционально полного состава процедур управления объектом в штатных и нештатных ситуациях.

2. Определение рационального распределения процедур управления между человеком (ЛПР) и комплексом программно-технических средств;

3. Нахождение рациональной организационной структуры системы управления объектом в штатных и нештатных ситуациях.

4. Определение рациональной структуры технической системы управления объектом в штатных и нештатных ситуациях.

5. Получение функционально полного состава подсистем и элементов технической системы управления.

6. Определение характеристик функциональных подсистем и элементов технической системы управления в штатных и нештатных ситуациях.

7. Обоснование степени и уровня интеллектуализации программно-технических средств поддержки принятия решений в штатных и нештатных ситуациях.

8. Определение рациональной структуры управления в критических ситуациях.

9. Обоснование рационального интеллектуального уровня программно-технических средств поддержки принятия решений в системе управления в критических ситуациях.

Технико-экономический анализ – определение ресурсов, необходимых для достижения заданных целей с требуемыми показателями качества.

Процедура технико-экономического анализа включает в себя следующую последовательность действий:

1. Определение затрат всех видов ресурсов на технические средства, реализующие основные функции объекта.

2. Определение затрат всех видов ресурсов на реализацию процедур управления объектом.

3. Определение затрат всех видов ресурсов на предотвращение нештатных и критических ситуаций.

4. Установление социально-экономической и технико-экономической эффективности функционирования системы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные особенности внутренних взаимодействий характерны для системы «человек–объект–среда»?

2. Поясните суть термина «ограниченная рациональность» ЛПР.

3. Обоснуйте необходимость расширения системы «человек – объект – среда» путем обязательного включения в нее системного анализа в качестве отдельного измерения.

4. Какие измерения включает в себя пространство условий функционирования системы?

5. Какие виды анализа выполняются в пространстве условий функционирования системы?

6. Какие измерения включает в себя пространство свойств системы?

7. Какие виды анализа выполняются в пространстве свойств системы?

8. Какова общая логика взаимосвязи основных аналитических процедур в концептуально-функциональных пространствах?

9. Сформулируйте определения и опишите алгоритмы реализации основных аналитических процедур в пространстве условий функционирования системы.

10. Сформулируйте определения и опишите алгоритмы реализации основных аналитических процедур в пространстве свойств системы.

Литература

1. *Simon H. A. Models of Bounded Rationality. Cambridge, MA: The MIT Press, 1982.*
2. *Hogarth R., Makridakis S. Forecasting and Planning: An Evaluation// Management Science. 1981. Vol. 27. 2. P. 115–138.*
3. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011, 729 с.

Заключение

Часть 1 учебного пособия содержит шесть разделов.

В разделе 1 рассмотрена взаимосвязь системного анализа со смежными научными дисциплинами. Обсуждается содержательный смысл категории «система» с акцентом на супераддитивность (эмерджентность) как наиболее важный аспект данного понятия. Рассматриваются фундаментальные научные предпосылки формирования идей системности и системного мышления, а также основные исторические этапы развития системного анализа в XX веке.

В разделе 2 определяются основные аспекты сложности как фундаментальной категории теории систем и системного анализа. Особое внимание уделяется классификации прикладных задач с точки зрения спектра сложности. Обсуждаются подходы к оценке сложности систем, основные классы алгоритмической сложности, а также возможные пути преодоления трансвычислительной сложности системных задач.

В разделе 3 рассматриваются категория системности в узком и широком смысле, а также ее тесная взаимосвязь со сложностью как наиболее фундаментальной категорией системного анализа. Дается определение системного мышления с учетом его важнейших составляющих. Определяются место системного анализа в иерархии уровней методологии науки и основные отличия задач системного анализа от задач традиционных научных дисциплин.

В разделе 4 приводятся основные подходы к моделированию объектов системного анализа. Рассматриваются обобщенное представление системы по Дж. Клиру, а также кибернетическая метафора сложных открытых систем в виде черного ящика. Также обсуждаются понятия и основные отличия целенаправленных и целеустремленных систем.

В разделе 5 определяется понятие системной задачи, рассматриваются основные свойства и базовые принципы системной методологии, а также приводится краткий обзор методов системного анализа.

В разделе 6 научно обосновывается необходимость включения системного аналитика в систему взаимодействия «человек–объект–среда». Кроме того, даются определения концептуально-функциональных пространств условий функционирования и свойств системы,

соответственно. Описываются взаимосвязь и порядок проведения основных аналитических процедур в указанных пространствах.

Таким образом, содержание части 1 учебного пособия раскрывает историю развития, понятийно-категориальный аппарат и философско-методологические аспекты системного анализа как трансдисциплинарной общенаучной методологии, что способствует формированию навыков системного мышления обучаемых.

Рекомендуемая литература

1. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.
2. *Берталанфи Л. фон.* Общая теория систем. 2-е изд. М.: Мир, 1960. 328 с.
3. *Богданов А.А.* Всеобщая организационная наука, или тектология. В 3 т. М., 1913–1929.
4. *Дрогобыцкий И.Н.* Системный анализ в экономике: Учебн. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. 423 с.
5. *Зенгер Х. фон.* Стратегемы. О китайском искусстве жить и выживать. Т. 1, 2. М.: Эксмо, 2004.
6. *Каталевский Д.Ю.* Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 496 с.
7. *Клир Дж.* Наука о системах: новое измерение науки // Системные исследования: методологические проблемы. М.: Наука, 1983. С. 61-85.
8. *Клир Дж.* Системология. Автоматизация решения системных задач / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 540 с.
9. *Леви-Брюль Л.* Первобытное мышление. Психология мышления / Под ред. Ю. Б. Гиппенрейтер и В. В. Петухова. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 130–140.
10. *Нахман А.Д.* Вопросы алгоритмической разрешимости математических задач: Моногр. // Инновации в образовании. Издательская платформа Российской академии естествознания. 2018. Спец. вып. 88 с.
11. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения / М.З. Згуровский, Н.Д. Панкратова. Киев: Наукова думка, 2011, 729 с.
12. Системный анализ: Учеб. для вузов / А.В. Антонов. М.: Высш. шк., 2004. 454 с.
13. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособ. / И.А. Прохорова. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. 49 с.
14. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 167 с.
15. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1960. 434 с.
16. *Brehmer В.* Dynamic decision making: Human control of complex systems // Acta Psychologica. 1992. 81 (3). P. 211–241.

17. *Hogarth R., Makridakis S.* Forecasting and Planning: An Evaluation// Management Science. 1981. Vol. 27. 2. P. 115–138.
18. *Richmond B.* System thinking: critical system thinking skills for the 1990s and beyond // System Dynamics Review. 1993. 10 (2–3). P. 128.
19. *Simon H. A.* Models of Bounded Rationality. Cambridge, MA: The MIT Press, 1982.
20. *Sterman J.* Misperceptions of Feedback in Dynamic Decision Making // Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1989. 43 (3). P. 301–335.

Для заметок

Учебное пособие

Жуков Алексей Олегович

Системный анализ
Часть 1. Философско-методологические аспекты

Подписано в печать 27.09.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Объем 10,5 п. л. Тираж 300 экз. Печать цифровая.

Отпечатано в ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)
121353, Москва, ул. Давыдовская, 7.
Завод № 1. Тираж 25 экз.