

А.В. Андрейчиков

**МЕТОДЫ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
СИСТЕМЫ АНАЛИЗА
И СИНТЕЗА НОВЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

МОНОГРАФИЯ

Москва
РИОР

УДК 004.896
ББК 32.965
А63

ФЗ
№ 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1

Автор:

Андрейчиков А.В. — д-р техн. наук, профессор кафедры менеджмента качества Российского университета транспорта (г. Москва). Автор более 400 печатных работ и 60 изобретений. Научная деятельность связана с развитием приоритетного научного направления в области разработки компьютерных средств и методик генерации новых решений на основе комплексного использования эвристических методов проектирования, многокритериальных методов теории принятия решений, комбинаторно-морфологических и статистических математических методов, методов искусственного интеллекта. Действительный член Международной академии системных исследований, член-корреспондент Российской академии естественных наук, эксперт национального информационно-аналитического центра по мониторингу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в области информационно-телекоммуникационных систем

Андрейчиков А.В.

А63 Методы и интеллектуальные системы анализа и синтеза новых технических решений : монография / А.В. Андрейчиков. — М. : РИОР, 2019. — 544 с. — DOI: <https://doi.org/10.29039/2005-0>

ISBN 978-5-369-02005-0

В монографии рассмотрены подходы к анализу и синтезу технических инноваций, основанные на системном использовании закономерностей строения и развития новой техники, математических, эвристических и интеллектуальных методов, баз данных запатентованных изобретений. Изложенные в книге методы концептуального проектирования инноваций отражают две парадигмы системного анализа: редукционизм, основанный на попытках познания системы путем разложения ее на части и исследования этих частей, и холизм, предполагающий проведение исследования системы через объяснение взаимодействия ее элементов и функций с точки зрения отношений с окружающей средой.

Книга предназначена для научных работников, инженеров и студентов, работающих в таких сферах, как системный анализ, управление качеством инноваций, концептуальное проектирование, разработка интеллектуального программного обеспечения и др.

УДК 004.896
ББК 32.965

ISBN 978-5-369-02005-0

© Андрейчиков А.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАДИГМЫ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ	10
1.1. Обзор методологий концептуального проектирования технических объектов	10
1.1.1. Классические методологии проектирования	13
1.1.2. Эвристические методы проектирования	17
1.2. Системный подход к проектированию	21
1.2.1. Свойства и закономерности технических систем	26
1.2.2. Подходы к моделированию сложных систем	31
1.2.3. Задачи синтеза в проектировании ТС	36
1.2.4. Формальные модели проектирования	38
1.3. Современные направления развития проектирования ТС	43
1.3.1. Эволюционный подход к проектированию	43
1.3.2. Методы повышения эффективности и качества проектирования	47
1.3.3. Компьютерная поддержка процессов проектирования	50
1.4. Обзор задач, методов и систем принятия решений	54
1.4.1. Парадигмы выбора	54
1.4.2. Методы принятия индивидуальных решений при многих критериях	59
1.4.3. Задачи и методы принятия коллективных решений	69
1.5. Методы и системы для получения прогнозов поведения сложных систем	74
Глава 2. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	82
2.1. Анализ множества технических систем, соответствующих основным этапам и задачам проектирования	82
2.2. Влияние неопределенностей на процессы исследования сложных систем	88
2.3. Информационная модель концептуального проектирования	90
Глава 3. МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	96
3.1. Система для поддержки процессов принятия решений на базе методов теории нечетких множеств	97
3.1.1. Постановки задач принятия решений на нечетких моделях	98
3.1.2. Описание программной системы «Нечеткий выбор»	102

3.2.	Экспертные системы для поддержки процессов принятия решений	107
3.2.1.	Оболочка ЭС производственного типа	107
3.2.2.	Оболочка экспертной системы с нечетким выводом	108
3.3.	Система для поддержки процессов принятия решений на основе метода анализа иерархий	115
3.3.1.	Состав и структура системы	116
3.3.2.	Описание задач, методов и алгоритмов	119
3.3.3.	Прогнозирование предпочтений и приоритетов.	125
3.3.4.	Учет взаимного влияния элементов иерархии	128
3.3.5.	Методы представления и процедуры извлечения знаний из данных	133
3.4.	Система для поддержки процессов коллективного выбора.	142
3.4.1.	Задачи двухстороннего выбора.	142
3.4.2.	Постановка задачи бинарного синтеза	144
3.4.3.	Разрешение конфликтов при коллективном выборе решений	149
3.4.4.	Способы представления и обработки знаний	154
3.5.	Методология принятия решений в условиях неопределенности с использованием разработанного программного обеспечения	157
3.5.1.	Многокритериальный выбор рациональной виброзащитной системы с применением методов теории нечетких множеств	157
3.5.2.	Анализ эволюции технических систем с применением МАИ	164
3.5.3.	Выбор перспективной системы виброзащиты в условиях взаимного влияния рассматриваемых факторов окружения	170
3.5.4.	Коллективный выбор технологии производства виброзащитных устройств для транспортных средств.	179

Глава 4. ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ 188

4.1.	Морфологический подход к структурному синтезу технических объектов	190
4.1.1.	Задачи, критерии и алгоритмы синтеза технических систем на ранних стадиях проектирования	192
4.1.2.	Способы представления знаний об объектах структурного синтеза	205
4.1.3.	Методы извлечения знаний из морфологических множеств	212
4.1.4.	Методика анализа морфологического множества на примере синтеза системы виброзащиты для оператора локомотива	220

4.2.	Структурно-логический подход к синтезу технических объектов	240
4.2.1.	Способы представления знаний.	241
4.2.2.	Алгоритмы обработки знаний в процессе интеллектуального синтеза.	249
4.3.	Эволюционный подход к синтезу технических решений	253
4.3.1.	Представление знаний о технических решениях	255
4.3.2.	Алгоритмы эволюционного синтеза	260
4.4.	Эвристический синтез рациональных технических решений	263
4.5.	Методология решения задач синтеза с использованием разработанного программного обеспечения	270
4.5.1.	Морфологический синтез ВЗС с переменной структурой	270
4.5.2.	Анализ синтезированных виброзащитных систем человека-оператора локомотива и гусеничного трактора	277
4.5.3.	Морфологический синтез виброзащитных систем с основными и дополнительными функциями.	281
4.5.4.	Эвристический синтез ВЗС на морфологических таблицах	287
4.5.5.	Синтез ВЗС на основе структурно-логического подхода	295
4.5.6.	Эволюционный синтез ВЗС	306
Глава 5. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЗАДАЧ ВНЕШНЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ		316
5.1.	Обзор методов прогнозирования поведения сложных систем	316
5.2.	Интеллектуальная система для синтеза сценариев	321
5.2.1.	Способы представления и обработки знаний	322
5.2.2.	Подходы к оценке синтезированных сценариев	335
5.2.3.	Описание программной реализации и анализ полученных результатов	338
5.3.	Компьютерная поддержка процессов стратегического планирования на базе метода анализа иерархий.	344
5.3.1.	Задачи, методы и алгоритмы планирования	346
5.3.2.	Состав и структура программной системы стратегического планирования	351
5.4.	Стратегическое планирование защиты от вибрации на железнодорожном транспорте	361
5.5.	Решение задач внешнего проектирования при поддержке экспертных систем	373
5.6.	Выбор технических решений с учетом изменения экспертных предпочтений во времени	381
5.7.	Формирование требований к объекту проектирования с применением методик QFD/АНР	386

Глава 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПАТЕНТНЫХ РЕСУРСОВ НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	391
6.1. Построение патентных ландшафтов и позиционирование патентообладателей на рынке высоких технологий (на примере спутниковых систем навигации)	391
6.2. Исследование эволюции технологий	434
6.2.1. Выявление закономерностей эволюционного развития техники на основе патентных баз данных . . .	434
6.2.2. Исследование эволюции аэрокосмических технологий на основе патентных и научных публикаций	439
6.3. Системный подход к проблеме замещения импортной техники на основе анализа патентной и финансовой информации	469
6.4. Разработка подхода по выявлению и устранению технических противоречий при совершенствовании показателей качества изобретений	489
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	525

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование технических объектов является развивающейся междисциплинарной областью знаний, значительную часть которых составляют эвристические и эмпирические знания. Для концептуального проектирования (начальных стадий проектирования) характерны некорректные и плохо формализуемые задачи, для решения которых предложены различные методологии: системное проектирование; поисковое конструирование; теория решения изобретательских задач (ТРИЗ); функционально-стоимостной анализ (ФСА) и т.д.

Обострение конкурентной борьбы на рынках, усложнение технических объектов, уменьшение времени, отводимого на разработку изделий, сокращение времени их жизненного цикла, бурное развитие вычислительной техники, экологические и социальные факторы обусловили в последнее десятилетие развитие методологий по созданию интеллектуальных цифровых технологий проектирования.

Это развитие происходит в следующих направлениях:

1. Активизация исследований в области концептуального проектирования, которые определяют примерно 80% интегральной стоимости изделия в процессе всего жизненного цикла.
2. Расширение границ проектирования происходит в связи с рассмотрением всех стадий жизненного цикла объекта в процессе проектирования. При этом задачи внешнего проектирования становятся более значимыми. Учет всех стадий жизненного цикла приводит к расширению множества участников в процессах принятия проектных решений. При

этом возникают задачи разрешения конфликтов и задачи кооперации.

3. Повышение качества проектируемых объектов. Понятие качества приобретает все более широкий смысл, включая в себя не только качество выполнения основных функций, но и экологические, эргономические, технологические и т.п. аспекты.
4. Сокращение сроков и повышение эффективности процесса проектирования.
5. Развитие теоретических основ проектирования путем обобщения опыта, приобретенного при разработке конкретных методологий, направленных на достижение определенных целей.
6. Компьютеризация проектирования, включающая разработку САПР, экспертных систем (ЭС), баз данных (БД) и баз знаний (БЗ), систем поддержки принятия решений (СППР), систем моделирования, распределенных систем поддержки проектирования и виртуальных студий.

В настоящем учебнике изложены основные методы и интеллектуальные цифровые технологии концептуального проектирования, которые позволяют решать важнейшие задачи структурного синтеза, принятия решений и прогнозирования в условиях неопределенности на ранних стадиях проектирования технических объектов. Условия неопределенности означают наличие неполной, неточной, неколичественной, ненадежной, нечеткой информации, привлекаемой для решения указанных задач. С развитием средств информатизации существенно возрастают объемы данных, которые могут быть использованы для синтеза, анализа, прогнозирования и планирования решений. Это, в свою очередь, требует развития средств представления и обработки разнородной информации, а также эффективных методов извлечения необходимых сведений из мощных информационных потоков. С каждым годом уменьшается время, отводимое на принятие решений, а сложность процедур возрастает в связи с увеличением числа участников этих процессов, а также объемов привлекаемой информации, с быстрым и плохо предсказуемым изменением условий, в которых происходит постановка и решение задач, а также реализация принятых решений. В условиях быстро изменяющегося окружения традиционные технологии анализа, синтеза и прогнозирования решений не всегда являются приемлемыми, главным образом из-за жестких ограничений по времени и недоста-

точного количества и качества информации. Все это делает необходимым получение прогнозов возможных изменений окружающей среды задач проектирования и разработку методов для оценки последствий принимаемых решений. Проблема планирования решений в кризисных и нестабильных ситуациях, которые характерны для России в последние годы, имеет особое значение, поскольку в условиях переходной экономики механизмы саморегуляции или не работают, или работают крайне неэффективно, так как процессы являются несбалансированными. Поэтому представляется важным определить типы задач, которые имеют место в подобных ситуациях, и разработать подходы к их решению с использованием информационных систем.

Анализ методов и компьютерных систем, применяемых для синтеза, прогнозирования и принятия решений, позволяет сделать вывод о том, что наиболее перспективными являются методы и системы, основанные на технологии обработки знаний.

Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПАРАДИГМЫ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ

1.1. Обзор методологий концептуального проектирования технических объектов

Проектирование в широком смысле можно рассматривать как процесс составления описания, которое необходимо для создания в заданных условиях еще не существующего объекта, и выбор соответствующих действий [151]. Проектирование тесно связано с познавательной деятельностью и инженерным творчеством. Этот процесс составляет важный элемент жизненного цикла любой сложной технической системы (ТС) [173]. В жизненном цикле ТС проектирование охватывает начальные стадии и составляет основу научно-исследовательских работ (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Жизненный цикл технического объекта

Проектирование включает две основные стадии [108]:

1. Внешнее проектирование (макропроектирование) — выяснение целей проектирования, исследование внешней среды, уточнение круга решаемых задач, формирование требований к объекту проектирования и разработка технического задания (ТЗ).

2. Внутреннее проектирование (микропроектирование) — определение внутренней структуры объекта проектирования, выбор технического решения (ТР), разработка проектно-конструкторской документации. Внутреннее проектирование вместе с изготовлением опытного образца называют опытно-конструкторскими работами.

Начальные стадии проектирования (разработка ТЗ, предварительное и эскизное) выделяют в особую фазу концептуального, или исследовательского, проектирования, отличительной чертой которого являются творческие задачи и процедуры принятия решений в условиях неопределенности. Составную часть проектирования, связанную с конструктивным воплощением ТР, называют конструированием. Основными стадиями конструирования являются поиск вариантов ТР, их сравнение и выбор наилучшего.

В. Гаспарский выделяет прагматическую и апрагматическую методологии проектирования [112]. Прагматической методологией проектирования называется научная дисциплина, занимающаяся методами, процедурами и технологиями проектно-творческой деятельности. Предметом апрагматической методологии проектирования является объект проектирования. В области исследования объектов проектирования накоплены и систематизированы обширные знания и разработаны множества частных методологий. Прагматическая методология инвариантна к объектам проектирования, она включает следующие основные задачи:

1. Выбор типов действий, совершаемых во время проектирования, и их анализ.
2. Обобщенное описание проектной процедуры, используемой в разных видах проектирования.
3. Выявление целей, к достижению которых стремятся проектировщики, и установление критериев правильности действий в проектировании. Эффективность действий оценивается как степень достижения цели при заданных затратах.

Дж. Диксон [132] различает два рода деятельности проектировщика: изобретательство и инженерный анализ. К методам изобретательства он относит мозговой шторм, инверсию, аналогию, эмпатию, системотехническое исследование новых решений, полученных комбинаторными способами. Инженерный анализ

базируется на применении широкого набора знаний в процессе проектирования. Дж. Диксон выделяет семь основных этапов проектирования: 1) уяснение задачи; 2) выбор пути решения задачи; 3) формирование идеи; 4) инженерный анализ; 5) конкретизация решения; 6) производство; 7) распределение, сбыт и использование.

П. Хилл в книге [311] выделяет следующие этапы проектирования: 1) определение потребности; 2) определение цели — формулировка в общих выражениях характеристик проектируемого объекта, которые удовлетворяют потребность; 3) научные исследования — сбор всей доступной информации для решения задач, конкретизирующих цель; 4) формулировка задания; 5) формирование идей; 6) выработка концепций; 7) анализ концепций; 8) эксперимент; 9) описание выбранного варианта проектируемого объекта; 10) производство; 11) распределение продукции; 12) потребление.

Особое значение П. Хилл придает морфологическому подходу к проектированию [53], позволяющему генерировать идеи на основе морфологических матриц, элементами которых являются альтернативные характеристики проектируемого объекта. Выбор наилучшего решения из совокупности вариантов основан на построении матрицы решений. Сущность метода заключается в выборе критериев для сравнения вариантов, определении их относительной значимости и оценке вариантов по каждому критерию по десятибалльной шкале. Наилучшим вариантом считается тот, который имеет максимальное значение взвешенной суммы.

В книге А. Холла [312] выделено шесть основных процедур проектирования:

1. Уяснение задачи. На этом этапе проводится исследование потребностей и окружения, при этом под окружением понимается множество внешних объектов, взаимодействующих с проектируемой системой. Основными факторами окружения считаются состояние технологии, естественное окружение, политика организации, экономические условия, человеческие факторы. Успех проектирования измеряется близостью соответствия объекта проектирования факторам окружения.
2. Выбор целей. Цели определяются в системе ценностей, специфичной для каждого объекта проектирования. Общими для большинства систем являются прибыль, конкурентоспособность, стоимость, качество, технические характеристики, совместимость с существующими системами, стойкость к моральному старению, безопасность, время на разработку, простота и изящество.

3. Синтез систем. Для синтеза систем А. Холл предлагает использовать мобилизацию идей и функциональное проектирование.
4. Анализ систем состоит в выявлении всех возможных следствий для каждого варианта проектируемой системы.
5. Выбор наилучших альтернатив.
6. Планирование действий.

1.1.1. Классические методологии проектирования

Методы системного проектирования, называемые сегодня классическими, были разработаны в Европе, в основном в Германии. Системные исследования методологии проектирования начались с работ Ф. Ханзена, Г. Паля и В. Бейтца, Р. Колера, В. Роденаккера, К. Рота, В. Хубки, П. Хилла, Дж. К. Джонса и других авторов. Ассоциация немецких инженеров (WDI) до сих пор является ведущей организацией в сфере стандартизации методов проектирования, а также в организации сотрудничества между исследователями и практиками.

Ф. Ханзен [310] предложил методику систематизации творческого процесса конструирования, базирующуюся на обследовании области возможных технических решений и комбинаторном подходе к генерации новых идей. Он выделил четыре основных этапа конструирования. На первом этапе формулируется ядро задания, определяющего основной принцип создаваемой технической системы (ТС). На втором этапе производится описание возможных рабочих принципов и выполняемых функций. Третий этап посвящен анализу ошибок в выполнении функций по каждому рабочему принципу. Четвертый этап заключается в выборе и улучшении рабочего принципа.

Обобщение работ немецкой школы методологии проектирования и конструирования [53, 8, 28, 29, 36, 38] приведено в книге К. Рота [264], где рассмотрены вопросы представления и использования каталогов конструкторских знаний в процессе проектирования. Формирование унифицированных конструкторских каталогов, содержащих информацию о часто применяемых технических решениях, возможно тогда, когда сформулированы требования к этой информации со стороны методики конструирования, которую К. Рот делит на три фазы: 1) формулировка задачи; 2) функциональная реализация, или проектирование; 3) предметная реализация, или конструирование. Первая фаза тесно связана с предшествующим процессом планирования изделия. Здесь формируются списки требований и функциональное положение (описание воздействий, процессов и явлений, необходимых для реализации главной

функции). Выделение функционального положения из списка требований позволяет формировать представление об идеальной функции циклически, при этом требования (ограничения) остаются неизменными. Функциональная фаза разделяется на два этапа. На первом этапе идеальная функция описывается через абстрактные функции, связанные только с накоплением, передачей и преобразованием вещества, энергии и информации. Второй этап состоит в сопоставлении элементов абстрактной функциональной структуры определенных физических эффектов, после чего формируется физическая функциональная структура. Если полученная структура мало соответствует идеальной, происходит повторение процедур второй фазы или возврат на первую. Переход от функциональной фазы к предметной вызывает наибольшие трудности из-за огромного разнообразия возможностей. Именно здесь важную роль могут сыграть конструкторские каталоги. К. Рот отмечает полезность морфологического подхода для решения задач на второй и третьей фазах конструирования. Для реализации конкретных этапов конструирования необходимо применять конкретные средства, называемые моделями изделия. У Ф. Ханзена [24] выделено семь уровней моделей: 1) уточненная задача; 2) техническая функция; 3) топология; 4) технический принцип; 5) конкретизированный принцип; 6) технический проект; 7) полное описание системы. Г. Паль и В. Бейтц [35] предлагают другой набор моделей изделия: 1) постановка задачи; 2) функциональная структура; 3) принципы решения; 4) технико-экономическая оценка; 5) грубая и тонкая конструктивные структуры; 6) окончательная конструктивная структура; 7) технологическая документация. В алгоритмическом методе выбора по каталогам К. Рота используются 15 моделей изделия. В фазе формулирования — постановка задачи и функциональное положение. В функциональной фазе — модель общей функции, абстрактная функциональная структура, абстрактная диаграмма потоков, логическая функциональная структура, специальная функциональная структура, векторная функциональная структура, геометрическая функциональная структура. Последняя используется также и в предметной фазе, где могут применяться модели: геометрическая цепная структура, логическая матрица связей, геометрическая материальная реализация, масштабный проект, рабочие чертежи. Чтобы эффективно использовать модели изделия в процессе проектирования, необходимо предоставить проектировщикам замкнутые системы со строго определенными элементами, продуманными операциями и четкими указаниями по применению. На основе названных моделей должно генерироваться достаточно

большое множество разнообразных вариантов решений на разных этапах конструирования. Использование большого числа моделей на практике вызывает проблемы, связанные с их несовместимостью и разнообразием свойств изделий, которое скачкообразно возрастает с повышением уровня конкретизации [314], поэтому использование различных моделей в процессе конструирования определяется практической целесообразностью. Сравнение подходов к проектированию исследователей немецкой школы приведено в табл. 1.1. Подход К. Рота достаточно близок к подходу Г. Паля и В. Бейтца. Самым существенным отличием этих планов является то, что у Г. Паля и В. Бейтца решения, описанные предметными признаками (принципы решений), относятся к функциональной фазе, а у К. Рота такие решения вырабатываются в предметной фазе.

Рабочий план Р. Колера имеет существенно больше отличий от выше рассмотренных как номенклатурой используемых элементов, так и операциями. Особое значение у Р. Колера придается эффектам. В рабочем плане проектирования по В.Г. Роденаккер у задача понимается как требуемая взаимосвязь воздействия. Функции рассматриваются с логической точки зрения, при этом основой их реализации в технической системе становится «физическое событие».

Таблица 1.1

Сравнение рабочих планов проектирования
исследователей немецкой школы

К. Рот	Г. Паль и В. Бейтц	Р. Колер	В. Роденаккер
Фаза формулировки задачи <ul style="list-style-type: none"> • постановка задачи • функциональное положение • список требований 	Уяснение задачи <ul style="list-style-type: none"> • уяснение постановки задачи • список требований 	Уяснение постановки задачи	Требуемая взаимосвязь воздействий
Функциональная фаза <ul style="list-style-type: none"> • абстрактная функциональная структура • физическая структура • логическая функциональная структура 	Предварительное проектирование <ul style="list-style-type: none"> • функциональная структура • принципы решений • технико-экономическая оценка 	Синтез функциональной структуры <ul style="list-style-type: none"> • структура из частных функций • структура из элементарных функций • структура из основных операций • технико-экономическая оценка 	Функция логическая взаимосвязь воздействий Физическое событие физическая взаимосвязь воздействий

К. Рот	Г. Паль и В. Бейтц	Р. Колер	В. Роденаккер
Предметная фаза <ul style="list-style-type: none"> • <i>Разработка формы</i> — геометрическая материальная реализация <ul style="list-style-type: none"> • <i>Разработка структуры</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Разработка контура</i> — технико-экономическая оценка <ul style="list-style-type: none"> • <i>Разработка технологии</i> — конструирование с учетом требований изготовления, сборки и т.д. — технико-экономическая оценка — разработка инструкций	Проектирование <ul style="list-style-type: none"> • грубое конструирование • точное конструирование • оценка вариантов • заключительное конструирование <hr/> Разработка Разработка технологической документации, инструкций по сборке, транспортировке и т.д.	Качественный синтез <ul style="list-style-type: none"> • варианты эффектов • варианты носителей эффектов • варианты принципов работы • варианты конструкции деталей, узлов и систем • технико-экономическая оценка <hr/> Количественный синтез <ul style="list-style-type: none"> • расчет параметров • определение размеров • технико-экономическая оценка • испытание • окончательный проект • детализация • технологическая документация 	Метод воздействия <ul style="list-style-type: none"> • кинематическая • взаимосвязь воздействий • конструктивная • взаимосвязь воздействий • технологическая • взаимосвязь воздействий

Дж. К. Джонс [129] отмечает, что традиционные методы проектирования сосредоточены на рассмотрении объекта проектирования и слабо затрагивают социальные, политические и другие аспекты, связанные с жизненным циклом проектируемого объекта. Системный подход к проектированию требует применения новых методов.

Все новые методы Джонс разделяет на три группы в соответствии с тремя концепциями проектирования:

1. *Проектировщик — «черный ящик»*. Эта концепция основана на предположении полной алогичности процесса творчества. Удачные решения получают на основе интуиции конструктора, который не в состоянии объяснить, каким образом он к ним пришел. С этой концепцией связаны методы мозгового штурма и синектики.

2. *Проектировщик — «прозрачный ящик»*. В данном случае предполагается, что проектировщик вполне осознанно продвигается к удачному решению. Логическое поведение проектировщика

включает циклическое повторение следующих процедур: анализ доступной информации; синтез технических решений; сравнительную оценку технических решений. Методы, базирующиеся на данной концепции, характеризуются предварительным заданием целей и критериев, использованием формальных логических процедур, а также методов анализа и экспертной оценки решений. Особенностью методов этой группы является применение фиксированных стратегий. Одна из таких стратегий известна как метод функционального изобретательства, предложенный самим Дж.К. Джонсом [26]. Метод основан на определении функций всех элементов ТР и выделении среди них главной функции. Ключевая идея метода состоит в последовательном преобразовании главной функции, направленном на совершенствование всей конструкции. Этот метод особенно эффективен в условиях существенного изменения среды функционирования ТС.

3. *Проектировщик — «самоорганизующаяся система»*. Подход к проектировщику, как к самоорганизующейся системе, продиктован стремлением сузить область возможных технических решений за счет обоснованного выбора стратегии. Методы данной группы основаны на применении средств моделирования, позволяющих описать зависимости между стратегией и проектной ситуацией и предсказать вероятные результаты альтернативных стратегий, для того чтобы выбрать наилучшую.

Дж. К. Джонс выделяет три ступени проектирования: 1) *дивергенция* — расширение границ проектной ситуации в целях обеспечения обширного пространства для поиска решений; 2) *трансформация* — создание принципов и концепций; 3) *конвергенция* — окончательный выбор варианта технического решения. Стратегии проектирования представляют собой последовательности этапов, на каждом из которых применяется тот или иной метод проектирования. Стратегии могут быть линейными, циклическими, разветвленными, адаптивными, случайными. Выбор стратегии зависит от содержания и объема исходной информации и от схемы поиска. Одной из главных целей методологии Дж. К. Джонс считает уменьшение цикличности проектирования. Достижение этой цели зависит от умения прогнозировать результаты этапов проектирования.

1.1.2. Эвристические методы проектирования

Эвристические подходы к проектированию получили серьезное развитие в России в работах Г.С. Альтшуллера, Г. Буша, А.И. Половинкина, Е.П. Балашова, А.В. Кудрявцева и других ученых [97, 98,

56, 58, 66, 68, 67, 69, 71, 82, 119, 121, 120, 127, 175, 176, 230, 242, 251, 286, 291, 293, 197].

В работе [56] предложен обобщенный эвристический алгоритм поиска новых технических решений, содержащий следующие основные этапы:

1 этап. Предварительная постановка задачи. Основные процедуры: формулирование функции технической системы; выбор существующих ТС, удовлетворяющих сформулированной функции; составление списка недостатков существующих ТС.

2 этап. Изучение и анализ задачи. Процедуры данного этапа направлены на выявление возможности усиления отдельных показателей функционирования ТС на основе изучения тенденций развития рассматриваемого класса устройств и функционально близких классов. Определяются главные факторы, влияющие на развитие ТС рассматриваемого класса, проводится ранжирование недостатков, выявляются их причины, производится анализ целей, изучение условий их достижимости, составляется представление об идеальной ТС.

3 этап. Уточнение и детализация постановки задачи. Формируются требования к создаваемой ТС, производится их анализ, определяются входные и выходные параметры системы и выявляются функциональные связи между ними, выявляются противоречия улучшения ТС.

4 этап. Поиск технических идей, решений и физических принципов действия. На данном этапе производится генерация технических решений путем преобразования найденного прототипа с использованием фонда эвристических приемов либо синтез ТС с применением морфологического метода или других методов инженерного творчества.

5 этап. Выбор наилучших технических решений. Полученные решения проверяются на физическую и техническую реализуемость, на соответствие сформулированным требованиям, экономическим, технологическим и прочим критериям.

6 этап. Доработка выбранных технических решений. Данный этап направлен на детальную проработку технических решений и их дальнейшее улучшение. Он включает процедуры преобразования недопустимых решений в допустимые, а также процедуры экспериментальной и опытной проверки.

7 этап. Анализ технико-экономических показателей найденных решений и оценка перспектив их внедрения.

Обобщенный эвристический алгоритм базируется на использовании следующих массивов информации и методов ее обработки:

- 1) массив требований, предъявляемых к проектируемому объекту;
- 2) фонд физических эффектов;
- 3) фонд технических решений;
- 4) фонд эвристических приемов;
- 5) методы выявления недостатков ТР;
- 6) методы выявления причин возникновения недостатков ТР;
- 7) методы оценки и выбора ТР;
- 8) набор поисковых процедур.

Первые фонды эвристических приемов, а также технология их применения в процессе изобретения были разработаны Г.С. Альтшуллером [66–68]. В основе теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) лежит представление о закономерном развитии технических систем и анализ обширного патентного фонда изобретений. На базе ТРИЗ разработаны алгоритмы решения изобретательских задач АРИЗ-77, АРИЗ-85, представляющие собой процедуры направленного поиска эффективных инженерных решений. Ключевыми понятиями ТРИЗ являются:

- изобретательская ситуация — описание технической системы с указанием недостатков, подлежащих устранению;
- техническое противоречие.

Решение изобретательской задачи сводится к выявлению и устранению основного противоречия. Последовательность, направленность и активизация мышления достигаются путем ориентации на идеальный конечный результат.

АРИЗ-85 включает следующие основные этапы:

1. Анализ задачи. Основная цель этого этапа — четкая формулировка изобретательской ситуации (формулировка модели задачи).
2. Анализ модели задачи. Здесь производится поиск и учет имеющихся ресурсов, которые можно использовать при решении задачи.
3. Определение идеального решения и физического противоречия, препятствующего получению идеального решения.
4. Мобилизация и применение вещественно-полевых ресурсов.
5. Применение информационного фонда эвристических приемов.
6. Изменение или замена исходной задачи.
7. Анализ способа устранения физического противоречия.
8. Испытание и применение полученного решения.
9. Анализ процесса решения задачи.

В [175] процесс проектирования рассматривается как последовательность решения некоторой проблемы, включающей ряд этапов:

1. Поиск направлений решения проблемы, в процессе которого применяются интуитивные методы инженерного творчества (мозговой штурм, синектика и т.д.).

2. Поиск вариантов конфигурации объекта, обеспечивающих достижение цели в выбранном направлении. Для решения этой задачи рекомендуется применять систематические методы поиска новых решений (морфологический анализ и синтез).
3. Устранение противоречий и согласование подсистем в объекте заданной конфигурации, для чего применяется АРИЗ.

К проблемно ориентированным методам относится метод систематической эвристики [214]. Метод базируется на иерархической системе эвристических программ, включающих наборы предписаний разработчикам, из которых они получают нужную информацию и указания к действиям при решении задач проектирования определенного класса.

К методическим инструментам проектирования относится также функционально-стоимостной анализ (ФСА), основными принципами которого являются системность, функциональный подход, стоимостная оценка функций, коллективное творчество [281, 156, 164, 308, 252, 111, 59, 78, 99, 104, 204, 213, 276]. В процессе ФСА применяются следующие приемы: 1) объект рассматривается как комплекс абстрактных функций; 2) функции рассматриваются системно; 3) техническая и экономическая отработка решений проводятся параллельно; 4) в процессе проектирования используются ограничения на затраты по функциям; 5) бесполезные и вредные функции устраняются; 6) анализируется множество ТР, реализующих заданную функцию; 7) коллективный поиск решений.

ФСА включает следующие этапы:

1. *Подготовительный этап.* Здесь осуществляется выбор конкретного объекта, создание исследовательской рабочей группы, подготовка к проведению анализа, составление рабочего плана проведения ФСА. Объектом анализа может быть существующая или несуществующая техническая или организационная система.
2. *Информационный этап.* На этом этапе проводится сбор, систематизация и анализ всей необходимой информации о проблеме.
3. *Аналитический этап.* Основными задачами данного этапа являются следующие: 1) выявление функций объекта и его частей; 2) определение необходимого и достаточного ресурса функций анализируемой системы; 3) изучение внешних функций и связей объекта; 4) изучение внутренних функций и установление их связей с внешними функциями; 5) выде-

- ление зон с наибольшим сосредоточением затрат и выявление резервов; 6) построение функциональных моделей; 7) постановка задач поиска вариантов реализации моделей при заданных требованиях эффективности и стоимости; 8) классификация видов анализируемых затрат и выбор способа их калькуляции; 9) поэлементный анализ затрат на осуществление функций; 10) оценка значимости функций.
4. *Творческий этап.* На этом этапе проводится уточнение задач поиска новых решений, выбор методов активизации творческого процесса, анализ информации о путях решения подобных проблем, поиск или генерация альтернативных вариантов структуры объекта, отбор наиболее приемлемых вариантов.
 5. *Исследовательский этап.* Здесь выполняются разработка эскизов вариантов, их сравнительная технико-экономическая оценка, выбор наиболее рациональных вариантов и создание опытных образцов.

1.2. Системный подход к проектированию

Проектирование больших систем включает макропроектирование и микропроектирование. В процессе макропроектирования решаются функционально-структурные вопросы системы в целом. К ним относятся задачи определения целей системы и действующих на нее внешних факторов, а также задача выбора показателей эффективности функционирования системы. Микропроектирование связано с разработкой элементов системы. Задачи макропроектирования сложных систем являются исследовательскими по своей природе, так как в них всегда имеют место различные неопределенности. Для решения таких задач применяется методология системного подхода, научной основой которого является теория систем.

Основными задачами теории систем являются:

- определение общей структуры системы;
- организация взаимодействия между подсистемами и элементами;
- учет влияния внешней среды;
- выбор оптимальной структуры системы;
- выбор оптимальных алгоритмов функционирования системы.

Общими этапами для любой методики системного анализа являются этапы постановки задачи, формирования описания системы и этап выбора наилучших решений. На этапе постановки задачи

определяются цели исследования, производится выделение системы из среды, рассматриваются способы взаимодействия системы со средой, формулируются основные допущения. Этап формирования описания системы включает следующие действия: а) расчленение системы на элементы; б) выделение подсистем; в) определение общей структуры системы; г) определение связей системы со средой и выявление факторов, подлежащих учету; д) выбор подхода к представлению системы; е) формирование вариантов представления системы. Для выбора наилучшего варианта необходимо осуществить следующие действия: 1) выбор подхода к оценке вариантов; 2) выбор критериев и ограничений; 3) проведение оценки вариантов; 4) обработка результатов оценки; 5) анализ результатов и выбор наилучшего варианта.

Особенностью методик системного анализа [234, 115, 220, 263, 162] является то, что они опираются на понятие системы и используют закономерности строения, функционирования и развития систем. Специфическими для конкретного исследования этапами могут быть синтез возможных структур изучаемой системы, прогнозирование поведения системы при заданных условиях, определение способов достижения определенных состояний и т.п.

Стандартного определения понятия «система» не существует. Основоположник теории систем Л. Бераланфи [84] определил систему «как совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом и со средой». Позднее в определении системы появилось понятие цели [64, 63]. У.Р. Эшби [326] указал на необходимость учета взаимодействия исследователя с изучаемой системой, что привело к включению исследователя в систему наряду с элементами, связями, свойствами и целями.

С философской точки зрения природа систем является двойственной, т.е. это понятие одновременно отражает объективное существование и субъективное восприятие некоторой реальности [157]. Двойственная природа систем и отсутствие четких границ, отделяющих их от среды, в которой они находятся, послужила причиной множественности определений и трактовок этого понятия. Значительным вкладом в теорию систем является определение системы, данное академиком П.К. Анохиным [79]. «Системой можно назвать только такой комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействие и взаимоотношение приобретают характер взаимодействия компонентов на получение фокусированного полезного результата». Отличительными особенностями этого определения являются следующие: 1) системой

считается не любая совокупность элементов, а «избирательно вовлеченных», т.е. существует причина избирательности; 2) процессом взаимодействия П.К. Анохин называет взаимодействие в условиях целенаправленного ограничения степеней свободы компонентов; 3) наличие системообразующего фактора в виде образа результата.

Дж. Клир [162] пишет о том, что общее определение системы можно сделать более полезным для практики, введя определенные классы элементов и отношений между ними. При этом классификация систем по типам элементов имеет экспериментальную, а классификация по типам отношений — эпистемологическую основу, позволяющую выделять изоморфные классы систем. Иерархия эпистемологических уровней систем приведена на рис.1.2. Дж. Клир [162] выделяет два класса системных задач — задачи исследования и задачи проектирования. *Задачей исследования* систем является накопление знаний о свойствах и отношениях существующих объектов в соответствии с конкретными целями. *Задача проектирования* систем заключается в создании новых объектов с заданными свойствами на основе накопленных знаний. Следует заметить, что проектируемые системы всегда являются направленными, т.е. описывающие их переменные разделены на входные и выходные.

Уровни 4, 5, ...	<i>МЕТАСИСТЕМЫ</i> Совокупность систем более низкого уровня, между которыми существуют определенные отношения. Метахарактеристики — это правила, отношения и процедуры, описывающие изменения в системах более низкого уровня
Уровень 3	<i>СТРУКТУРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ</i> Совокупность порождающих систем, имеющих отношения друг с другом
Уровень 2	<i>ПОРОЖДАЮЩИЕ СИСТЕМЫ</i> Модели, порождающие определенные ниже данные
Уровень 1	<i>СИСТЕМЫ ДАННЫХ</i> Наблюдения, описанные на определенном ниже языке
Уровень 0	<i>ИСХОДНЫЕ СИСТЕМЫ</i> Язык описания данных

Рис. 1.2. Иерархия эпистемологических уровней систем

Сложным системам присущи следующие основные закономерности [234]:

- целостность, проявляющаяся в том, что свойства системы не являются суммой свойств ее элементов, хотя и зависят от них;
- коммуникативность, связанная с тем, что любая система является подсистемой в системе более высокого уровня;
- иерархичность;
- эквифинальность, отражающая способность системы достигать не зависящего от времени состояния, полностью детерминированного начальными условиями;
- историчность;
- закон необходимого разнообразия;
- закономерности целеобразования, связанные с зависимостью целей от стадии познания объекта, а также от внешних и внутренних факторов.

В статье И.В. Прангишвили [253] главными системообразующими атрибутами названы: 1) первичные элементы системы; 2) отношения между элементами; 3) законы композиции отношений систем; 4) фон системы. Там же сформулированы восемь законов композиции, которым подчиняется функционирование любых сложных систем.

1. Закон перевода системы из одного качественного состояния в другое с помощью минимального воздействия в точке критического состояния.
2. Закон эволюции, утверждающий, что любая система в ходе развития проходит определенные стадии эволюции.
3. Закон пирамиды, основанный на реализации в системе первого и второго законов термодинамики, следствием которых является уменьшение начального запаса энергии по мере продвижения к конечной цели.
4. Закон «островного эффекта» устанавливает зависимость обособленной системы от окружения.
5. Закон единства и борьбы противоположностей.
6. Закон причинно-следственных связей.
7. Закон проявления нестабильностей или кризисов системы, выражающихся в нарушении когерентного взаимодействия с фоном.
8. Закон существенной зависимости потенциала системы от изменения характера взаимодействия между элементами системы.

Свойства сложных систем можно разделить на три основные группы:

1) свойства, характеризующие взаимодействие системы с внешней средой;

2) свойства, характеризующие внутреннее строение системы (структура);

3) интегральные свойства, характеризующие поведение системы.

Свойства первой группы характеризуют потоки вещества, энергии и информации, которыми рассматриваемая система обменивается с внешней средой. Важнейшие среди них — это устойчивость и характеристики состояний системы.

При рассмотрении информационных потоков важными понятиями являются ценность, избыточность, скорость передачи информации, избирательность системы при восприятии информации, а также информационная емкость системы.

Вторая группа свойств характеризует внутреннее строение изучаемой системы. К ним относятся структура и уровень организации системы. Структура — это внутренняя организация системы, которая способствует связи составляющих систему элементов, определяет существование системы как целого и ее качественные особенности. Любая связь в системе характеризуется направлением, силой и характером.

Структура системы любой природы может изменяться как в результате взаимодействия с внешней средой, так и в результате некоторых внутренних процессов. Параметром, характеризующим изменение структуры во времени, является энтропия. В открытых системах энтропия может не только увеличиваться, но и уменьшаться за счет ее увеличения во внешней среде.

Уровень организации в отличие от структуры включает представление о смене структур в ходе развития. Самоорганизацией системы называют изменение структуры, обеспечивающее согласованность поведения благодаря наличию внутренних связей и связей с внешней средой, при отсутствии дополнительных влияний.

В третью группу свойств входят такие свойства систем, как полезность, эффективность, надежность, управляемость, безопасность, живучесть и т.д. Некоторые свойства системы наследуются от свойств входящих в нее элементов, другие определяются как некоторая комбинация свойств элементов, ряд свойств системы представляют собой новые свойства, отсутствующие у элементов системы. В общем случае интегральные свойства системы не являются суммой свойств ее частей.

1.2.1. Свойства и закономерности технических систем

Наряду с общими признаками существуют принципиальные отличия технических систем от систем, содержащих живое начало. В теории управления техническими системами понятие цели, как правило, связано только с внешними факторами, а в открытых, развивающихся системах цель формируется внутри системы, поэтому внутренние факторы в таких системах являются столь же объективными, сколь и внешние.

В работе [58] дано следующее определение технической системы (ТС): «Под ТС понимаются совместимые и в известной степени обособленные комплексы в общем случае разнородных технических средств, увязанных в единое целое устойчивыми внутренними взаимосвязями и внешними отношениями, обусловленными непосредственным функциональным взаимодействием этих технических средств при выполнении возлагаемых на них общих внешних целевых функций, вытекающих из решения тех или иных народно-хозяйственных программ».

А.И. Половинкин дает следующее определение технического объекта, являющегося, по его мнению, синонимом ТС: «Техническим объектом будем называть созданное человеком или автоматом реально существующее устройство, предназначенное для выполнения определенной функции...» [242]. Автор книги [54] отмечает, что это определение не соответствует основным положениям системного подхода, так как в нем не выделяются целостность и взаимосвязь множества элементов. Согласно Дж. Клиру, необходимо установить различия между понятиями «система» и «объект» во избежание возможных недоразумений. Он предлагает пользоваться термином «система» для обозначения операционально описанных абстрактных представлений множеств свойств и отношений реальных объектов.

Разработчики комплексного метода поиска новых технических решений [121, 120, 176] дают следующее определение ТС: «Техническая система — искусственно созданное материальное единство закономерно организованных в пространстве и во времени и находящихся во взаимной связи элементов, имеющих целью своего функционирования осуществление некоторой общественной потребности».

Я. Дитрих [133] отмечает, что проект является результатом умственной деятельности в сфере информации, а изделие — в сфере массы и энергии. К исследовательской деятельности в области тех-

нических средств он относит проектирование и конструирование (деятельность с замыслами), а также изготовление и эксплуатацию (деятельность с изделиями). К основным понятиям, характеризующим процесс конструирования, Я. Дитрих относит потребность, действие, систему, структуру, состояние и конструкцию. Система олицетворяет проект и является формальным отображением действий, направленных на удовлетворение потребности при заданных условиях эксплуатации технического средства. Логическим следствием системы является структура изделия, которая вначале создается воображением в некотором конструктивном виде. Объектом конструирования является конструкция, которая определяет возможные структуры и состояния изделия. Конструирование логически следует из отношения субъекта творчества к изделию. Процесс проектирования предшествует конструированию. Этот процесс обусловлен отношением субъекта творчества к потребности. Системным проектированием называют решение технической задачи для части с учетом целого. Выбор критериев оценки систем и конструкций в процессе проектирования Я. Дитрих считает одной из важнейших задач. Случайный выбор критериев может привести к случайным, далеко не оптимальным решениям, поэтому необходимым этапом системного проектирования является обоснование целесообразности существования и развития технических средств. Рассмотрение объекта проектирования как части целого вызывает необходимость исследования условий действия ТС, в том числе возможных изменений этих условий.

А.Ф. Каменев понимает под ТС «объективное единство машин, предназначенных для осуществления всего технологического цикла производства готового продукта, способное к усовершенствованию и самостоятельному функционированию благодаря кибернетической части» [154]. Отличительной чертой ТС является их искусственное «происхождение». На ТС оказывают постоянное воздействие эксплуатирующие ее люди и внешняя среда. Под воздействием этих изменяющихся факторов происходит развитие ТС. Главные тенденции развития элементов и связей ТС — это сменяемость, дифференциация и интеграция.

В. Хубка [314] называет системой конечное множество элементов, между которыми существуют определенные отношения. Всякая искусственная система имеет назначение, описываемое множеством целей, и обладает поведением, которое можно определить как множество последовательных состояний во времени. Целенаправленное поведение системы называют функцией. Структура

характеризует внутреннюю организацию, порядок и построение системы. Структура — это совокупность элементов и отношений между ними. Функционирование системы задается ее структурой, при этом реализация одной и той же функции возможна разными структурами.

В теории технических систем [314] системы делятся на системы-объекты и системы-процессы. Искусственный процесс, в котором желаемое изменение состояния объекта достигается путем целенаправленного использования природных явлений, называют преобразованием. Технический процесс — это особый вид преобразований, в которых ТС выступает в качестве орудия труда, используемого человеком. Назначением технической системы является выполнение определенного воздействия в техническом процессе. На стадиях возникновения, использования и ликвидации ТС находится в различных состояниях и играет различные роли, в зависимости от того, к какой системе преобразований она принадлежит. Способность ТС в определенных условиях преобразовывать входную величину в требуемую выходную величину называется технической функцией. Функционирование структуры реализуется исполнительными органами на основе определенных принципов действия. Исполнительные органы конкретизируются в виде конструктивных элементов. Конструктивная схема ТС воплощает все требуемые свойства и признаки ТС. Общими признаками ТС являются: сложность, многообразие элементов, осуществление преобразования как цель функционирования.

В. Хубка выделяет три типа задач в теории технических систем:

1. Задача синтеза, в которой заданы характер функционирования и другие требования к системе, при этом необходимо определить структуру, удовлетворяющую требованиям.
2. Задача анализа, в которой задана структура и необходимо определить функционирование системы.
3. Задача «черного ящика», в которой задана система с неизвестной или частично известной структурой, при этом требуется определить функционирование и структуру.

Свойства ТС по потребности в конструкторской работе В. Хубка разделяет на категории, приведенные в табл. 1.2. Важнейшим свойством систем в этой классификации является функция. Функция ТС обычно детализируется определенной иерархией. Между свойствами ТС существуют сложные отношения различного рода, для изучения которых привлекаются методы математической логики и статистики.

Таблица 1.2

Классификация свойств ТС по потребности в конструкторской работе

Категория	Вопросы	Примеры
Функция	Каковы функции системы?	Рабочая функция
Действие	Что делает система?	Вспомогательная функция Подготовительная функция Функция управления
Функционально обусловленные свойства	Какие условия характерны для данной функции?	Производительность Скорость Масса Размеры
Производственные свойства	Насколько система пригодна для производственного процесса?	Безопасность эксплуатации Надежность Расход энергии Занимаемая площадь Ремонтопригодность
Эргономические свойства	Как обслуживается система и какое влияние оказывает на человека?	Удобство обслуживания Виды помех Требования к оператору
Эстетические свойства	Как система воспринимается эстетически?	Форма Цвет Привлекательность
Манипуляционные свойства	Насколько система пригодна для целей транспортировки, хранения, упаковки?	Соответствует условиям транспортировки Пригодна для непосредственного пуска в ход
Характеристики поставок и планирования	Когда система может быть поставлена? В каком количестве изготавливается?	Доступность Продукция серийного производства
Правовые нормы	Соответствует ли система правовым юридическим нормам и положениям?	Соответствует юридическим нормам Нарушение патентного права
Технологические свойства	Насколько система соответствует принятой технологии?	Соответствует технологии Соответствует условиям монтажа
Экономические свойства	Насколько экономичен процесс производства?	Издержки производства Эксплуатационные расходы Стоимость Экономическая эффективность
Конструктивные свойства	Как реализуются внешние свойства?	Структура Форма Габариты Материал Качество поверхности
Качество изготовления	Кто и как изготовил систему?	Изготовитель Достоинства и недостатки изготовления

К общим методам исследования ТС относятся системный анализ, регуляция и моделирование [69]. Разновидностями системного анализа ТС являются функциональный и морфологический анализ. Сущность методов регуляции заключается в упорядочении структуры рассматриваемого объекта с целью приведения его в «должное состояние», которое характеризуется отсутствием физических и технических противоречий, а также соответствует оптимальному многообразию реализаций развивающейся ТС.

Построение формального описания сложной системы является необходимым этапом исследования. Формальные модели необходимы для изучения внутреннего строения систем, для прогнозирования, а также для определения оптимальных режимов функционирования. Наиболее высокий уровень абстрагирования имеют лингвистический и теоретико-множественный способы описания систем. Лингвистический подход к описанию систем [162] исходит из «характерных черт» системы. Этот подход весьма привлекателен, так как знания в виде высказываний являются наиболее доступным видом информации. Лингвистический подход уступает теоретико-множественному способу описания в плане компактности. Чисто алгебраический подход к описанию систем, развитый Месаровичем и Тахакарой [201], во многих случаях позволяет получить полезные результаты, но существуют задачи, для которых более естественными являются описания других типов. Поэтому теоретико-множественный способ описания является наиболее распространенным на сегодняшний день. При этом наиболее развитым направлением теории систем является феноменологическое, которое основано на представлении системы S как некоторого преобразования входных воздействий X в выходные величины Y , т.е. $S \subset X \times Y$.

Открытые системы невозможно представить в виде функции, позволяющей получить выход по входу, в связи с наличием неопределенностей. Входные воздействия в открытой системе можно разделить на две составляющие: определенные U и неопределенные M , тогда $X = U \times M$, $S \subset U \times M \times Y$.

В классическом смысле система считается открытой, если на нее действует источник информации или энергии, поведение которого непредсказуемо и им нельзя управлять. В условиях неопределенности традиционным приемом является усиление степени размытости языка описания, поэтому часто в таких случаях переходят от рассмотрения входных и выходных величин к рассмотрению подмножеств их элементов. Это приводит к вероятностным и нечетким описаниям систем.

Антропогенные системы являются целенаправленными системами. Разработка теории сложных целенаправленных систем является актуальным направлением общей теории систем. Для описания целенаправленных систем применяется подход, отличный от феноменологического. Он заключается в том, что система описывается с помощью некоторой задачи принятия решений (ЗПР).

Система $S \subset X \times Y$ называется системой принятия решений, если найдется такое семейство ЗПР $D_x, x \in X$, решения которых принадлежат множеству D_x , и такое отображение $T: Z \rightarrow Y$, что для любого $x \in X$ и $y \in Y$ пара (x, y) принадлежит системе S тогда и только тогда, когда найдется такое $z \in Z$, что z является решением задачи D_x , а $T(z) = y$.

Любую систему преобразования входов в выходы можно формально представить как систему принятия решений и наоборот [234], поэтому для конкретной системы можно получить как феноменологическое, так и целенаправленное описание, если определена цель.

На более низких уровнях абстракции применяются следующие уровни описания:

- *логико-математический* особенно продуктивен для описания автоматов;
- *динамический уровень* связан с представлением системы в виде объекта, имеющего входы и выходы и находящегося в определенном состоянии в каждый момент времени. Процессы в таких системах могут быть непрерывными и дискретными;
- *эвристический* базируется на основе имеющегося опыта;
- *кибернетический* основан на рассмотрении всякого целенаправленного поведения системы как управления. Под управлением в широком смысле понимают процесс организации целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую объектом управления, в результате которого удовлетворяется потребность субъекта, взаимодействующего с этим объектом. (Среда — объект — субъект.)

1.2.2. Подходы к моделированию сложных систем

Взаимодействие системы со средой, а также взаимодействия элементов системы друг с другом могут быть представлены моделями структуры и моделями функционирования. Модель структуры в зависимости от цели исследования может иметь следующие разновидности:

- внешняя модель, в которой система представляется в каноническом виде, а ее связи с внешней средой выражаются посредством входов и выходов;
- иерархическая модель, в которой система расчленяется по уровням согласно принципу подчинения низших уровней высшим;
- внутренняя модель, в которой отражаются состав и взаимосвязь между элементами системы.

Функционирование системы может быть представлено:

- моделью жизненного цикла системы, характеризующей процессы существования системы от зарождения замысла на ее создание до гибели;
- моделью операции системы, представляющей совокупность процессов функционирования системы по основному назначению.

Существуют различные подходы к моделированию сложных систем.

Структурно-функциональный подход связан с построением модели структуры, элементами которой являются функции. Обычно бывает необходимо рассмотреть несколько вариантов структуры системы, которые отличаются типом отношений между элементами. Для построения механизма, порождающего функции, используют теоретико-множественный аппарат и математико-лингвистические средства. Основным инструментом анализа деятельности системы является декомпозиция. Декомпозиция по родам деятельности комбинируется с декомпозицией по частям. Совокупность возможных видов структуры системы называется полиструктурой. Средством описания элементов структуры и полиструктуры является формальный язык функций и видов структуры. Слова языка составляют из символов языка по правилам грамматики.

Ситуационное моделирование. Этот подход разработан для задач динамического управления сложными системами в условиях неопределенности [248]. В данном случае неопределенность означает отсутствие строгой математической модели в виде уравнений. Система описывается конечным набором возможных ситуаций и соответствующих им управленческих решений. Главным условием применимости этого подхода является возможность классификации ситуаций. В реальных системах число возможных ситуаций неизмеримо больше числа допустимых решений. Из этого следует, что ЗПР может быть сформулирована как задача поиска такого разбиения множества ситуаций на классы, при котором каждому

классу соответствует решение, оптимальное с точки зрения функционирования данного объекта. При наличии такого разбиения поиск решения в конкретной ситуации сводится к поиску класса и соотносению ему решения по управлению.

Синергетический подход к моделированию сложных систем учитывает нелинейность сложных систем, одним из проявлений которой является нарушение принципа суперпозиции. Основным инструментом данного подхода является динамическая имитационная модель системы, описывающая процесс ее развития [62]. Основной особенностью, отличающей развитие от других динамических процессов, является качественное, скачкообразное изменение переменных состояния системы во времени.

Согласно общей схеме иерархического строения материи [200], дискретные объекты определенного уровня, вступая в специфические взаимодействия, участвуют в образовании и развитии принципиально новых объектов с иными свойствами и формами взаимодействия. При этом устойчивость и самостоятельность исходных объектов обуславливает повторяющиеся и сохраняющиеся свойства, отношения и закономерности объектов более высокого уровня. Это положение справедливо для систем различной природы. В процессе эволюции не перебираются все мыслимые соединения элементов, а методом проб и ошибок находится удачная комбинация, которая затем размножается и используется в качестве цельного элемента, связанного с небольшим числом других таких же элементов. Большое значение в иерархических системах имеет преемственность или наследование, без которых развитие было бы невозможным. Не менее важной проблемой в теории развития является выявление объективных критериев прогресса, которые определяют переход от одного уровня к другому. В результате прогресса системы число уровней возрастает, при этом усложнение системы связано не только с увеличением числа уровней, но и с появлением новых взаимосвязей между уровнями и средой. В этих взаимосвязях все большее значение имеет информация [87, 316].

Основополагающими понятиями в теории развития и в теории самоорганизации являются понятия информации и энтропии. Наиболее полное выражение идея о связи энтропии и информации получила в виде негэнтропийного принципа Бриллюэна [92]. *Энтропия есть мера недостатка информации о действительной структуре системы.*

В эволюционной теории для описания процессов развития используют триаду: изменчивость, наследственность, отбор [209].

Н.Н. Моисеев называет изменчивостью любые проявления стохастичности и неопределенности. Он выделяет два возможных вида механизмов отбора. Это адаптационные механизмы и бифуркационные механизмы. Развитие — это борьба двух противоположных тенденций — сохранение гомеостаза (способность биологических систем противостоять изменениям внешней среды и сохранять состояние равновесия) и поиск новых организационных форм, уменьшающих локальную энтропию.

Согласно концепции развития, базирующейся на понятии диссипативной структуры [255], при воздействии возмущений, угрожающих структуре системы, последняя достигает точки бифуркации. В такой точке выбор состояния происходит случайным образом, после чего в силу вступает детерминированное поведение, до следующей точки бифуркации. Таким образом, возникающая в процессе развития неустойчивость создает возможность скачкообразного перехода системы в новое состояние. Абсолютно устойчивая система не способна к развитию, так как она подавляет любые отклонения от устойчивого состояния. Опираясь на данное представление о развитии, можно выделить два основных параметра, характеризующих этот процесс. Это устойчивость и мера организованности. Устойчивость развивающихся систем связывают со структурной устойчивостью и функционированием системы. Система, не обладающая способностью к адаптации, не может функционировать в меняющемся окружении [304].

Самоорганизующиеся системы обладают механизмом непрерывной адаптации с учетом прошлого опыта. Адаптация системы к меняющимся условиям происходит благодаря появлению элементов, обладающих необходимыми для функционирования системы свойствами, или появлению новых признаков у имеющихся элементов.

Для эволюции существенно не количество информации, а ее ценность, которая непосредственно связана с использованием информации в системе. Ценность — это степень незаменимости информации. Ценность информации оказывается тем больше, чем меньше способов выполнить заданную функцию. В процессе использования информации происходит отбор тех элементов-признаков, которые дают преимущества в ходе развития [299, 309].

При моделировании сложных систем дифференциальные уравнения можно составить только для идеализированной структуры при усредненных значениях параметров. Чем больше усреднение по пространству и во времени, тем более точной и информативной

является модель. Примером может служить модель мировой динамики Дж. Форрестера [306], где все переменные усреднены для всего земного шара. Статистические данные применялись только для масштабирования кривых в точке, соответствующей 1970 году. В остальных точках кривые строились согласно априорным предположениям автора. В модели Форрестера предполагается экспоненциальный рост населения, производства и некоторых других переменных. Результаты моделирования имеют неустойчивый характер и весьма чувствительны к выбору показателей экспонент.

Имитационное моделирование приводит к множественности моделей, так как широко использует субъективные предположения исследователей. Точечные модели дают хорошие результаты, когда они достаточно просты и когда оперируют с большими усредненными переменными. Усложнение обычно сопровождается переходом к моделям, распределенным в пространстве. При этом возникают серьезные затруднения с заданием граничных условий, определением параметров уравнений, а также сложности вычислительного характера [192].

Имитационное моделирование дискретных систем и процессов до недавнего времени в основном было связано с разработкой специализированных языков (GPSS, SIMULA и т.д.). Эти средства редко применялись для построения моделей функционирования ТС. Основная сфера их приложения — моделирование технологических процессов производства, а также моделирование функционирования организационных систем [260]. Развитие технологий программирования и искусственного интеллекта позволило сделать более доступной разработку имитационных моделей. Появились языки и системы интеллектуального имитационного моделирования [139], доступные широкому кругу пользователей. На рынке программного обеспечения популярны визуальные пакеты системной динамики *Ithink* и *PowerSim*; симулятор *SIMUL8* для моделирования динамики многоэлементных систем, структуру которых можно задавать; пакет имитационного моделирования деятельности предприятий *Optima!* и т.д. [1]

А.Г. Ивахненко [148] предложен переборный метод моделирования, претендующий на объективный характер результатов. Метод группового учета аргументов (МГУА) основан на использовании статистических данных для построения математической модели. В основу МГУА заложен итерационный алгоритм многорядной селекции, реализующий принцип самоорганизации математических моделей. Основными задачами переборного моделирования

являются генерирование множества моделей-кандидатов и выбор критериев перебора. В отличие от других статистических методов МГУА дает возможность работать с выборками небольшого объема.

Имитационные модели имеют весомую субъективную составляющую, требуют для построения значительного объема данных и, как правило, сопряжены с длительностью и высокой стоимостью разработок. Главным их достоинством является познавательное значение. Самоорганизующиеся модели в большей степени защищены от субъективизма исследователя и не требуют очень большого количества данных, однако они не вскрывают механизма развития и функционирования систем.

1.2.3. Задачи синтеза в проектировании ТС

В задачах проектирования важное место занимают методы синтеза сложных систем. Любая сложная система может быть реализована на различных элементах и с различными взаимосвязями между ними. Задача синтеза заключается в определении такой структуры ТС, которая оптимизирует критерий качества функционирования системы при заданных ресурсах. При этом различают формальную и материальную структуры. Под формальной структурой понимают организацию структуры системы из отдельных элементов, а под материальной — реальное наполнение формальной структуры. Одной формальной структуре может соответствовать множество материальных структур. Амальгированная структура объединяет формальную и материальную структуры. В процессе синтеза структуры возникают следующие задачи:

- определение состава системы;
- описание и классификация допустимых структур;
- определение классов преобразований структур, инвариантных по отношению к заданной цели, направленных на отыскание оптимальных решений (изоморфные и гомоморфные структуры);
- анализ соотношений между формальными и материальными структурами;
- исследование возможности построения системы с переменной структурой.

В зависимости от исходных данных различают три класса задач синтеза [234]:

1. Синтез структуры системы при заданных алгоритмах ее функционирования.

2. Синтез оптимального поведения и алгоритмов функционирования системы при известной структуре.
3. Синтез структуры и алгоритмов функционирования системы, распределение функций по элементам системы и определение их оптимального состава.

Требования, предъявляемые к синтезируемым системам, зависят от конкретных условий задачи и определяющим образом влияют на качество получаемых решений. В [9] сформулированы следующие принципы хорошей архитектуры, справедливые для систем любой природы:

- согласованность;
- ортогональность (независимость функций);
- соответствие требованиям (отсутствие ненужных функций);
- экономность (отсутствие дублирующих функций);
- прозрачность;
- общность (многофункциональность);
- открытость;
- полнота.

Задача структурного синтеза считается наиболее трудной для формализации проектной процедурой [223, 221]. Для синтеза необходима информация о базовых элементах системы, макроэлементах (типовая совокупность взаимосвязанных элементов), законченных и обобщенных структурах проектируемого объекта. Автоматизация структурного синтеза требует разработки интеллектуальных систем. Для представления знаний об объектах синтеза обычно используются объектно-ориентированные модели. Распространенным средством представления обобщенных структур являются И-ИЛИ-деревья. Известны следующие подходы к алгоритмизации структурного синтеза: 1) перебор законченных структур; 2) наращивание структуры; 3) выделение варианта из обобщенной структуры; 4) трансформация описаний.

Существующие подходы к синтезу технических и организационных систем подробно рассмотрены в [75, 74]. Их можно разделить на три группы: 1) эвристические (интуитивные) методы [121, 120, 214, 251, 242, 175, 176, 119]; 2) систематические (морфологический, АРИЗ) [227, 68, 67, 56, 291, 73, 72, 71, 197]; 3) структурно-логические, применяемые для синтеза специализированных устройств, например механических систем [178, 80, 135], электронной аппаратуры или химико-технологических схем [158].

1.2.4. Формальные модели проектирования

Применение системного подхода к проектированию привело к появлению теории технических систем и к термину «системное проектирование» и попыткам построения формальных моделей проектирования.

А.В. Дабагян [126] полагает, что системный подход к проектированию заключается в рассмотрении всего комплекса проблем, возникающих в течение жизненного цикла изделия. Он отмечает необходимость совместного проектирования и планирования производства изделия и вспомогательных устройств, учета тенденций социально-экономического и научно-технического развития, выработки единого критерия качества проектируемой системы, создания имитационных моделей и банков знаний.

В работе [249] приведены основные аксиомы системного проектирования:

1. Из неразрешимости общей задачи проектирования вытекает необходимость ее декомпозиции на совокупность локальных задач, упорядоченных многоуровневой параллельно-последовательной логической схемой проектирования.
2. Из неопределенности исходных данных и ограничений в общей задаче проектирования вытекает необходимость их прогнозирования и обмена проектными решениями между функциональными ячейками системы проектирования в соответствии с определенной логической схемой.
3. Из логической противоречивости общей задачи проектирования вытекает необходимость организации итерационных циклов, которые определяют сходимость системных решающих процедур.
4. Из невозможности сконструировать априори «сквозное» правило предпочтения следует необходимость «индивидуального» построения многоуровневого критерия оценки проектных решений, который может быть получен эвристически только в конце итерационного цикла.

В системном проектировании общая задача G описывается набором формализованных множеств $G = \langle M, A, C, R, K, T \rangle$, где M — множество моделей объекта проектирования; A — множество исходных данных; C — множество ограничений; R — множество проектных решений; K — множество оценок проектных решений; T — множество решающих процедур.

Декомпозиция сложной ТС — одна из главных процедур системного проектирования. Математическое обоснование приложе-

ния методов декомпозиции в задачах проектирования представлено в работах коллектива авторов под руководством П.С. Краснощекова [170, 171, 172]. Формальные подходы к задаче оптимального проектирования, развитые в этих работах, основаны на теории математического программирования и π -оптимальности. Авторы отмечают, что такой подход не всегда применим на практике из-за трудностей формализации и нарушения условий выпуклости и монотонности. Логическим продолжением данного подхода является переход от критериальных функций к отношениям предпочтения. Декомпозиция исходной задачи оптимального проектирования позволяет свести большую часть сравнений многомерных альтернатив к сравнению их характеристик.

Как альтернатива декомпозиционному подходу может рассматриваться композиционный подход к проектированию ТС, описанный в работе [178], где сложная ТС проектируется путем синтеза из элементов специальным образом развиваемой элементной базы.

В работе [305] выделены следующие основные этапы системного проектирования:

1. Рассматриваемая система декомпозируется на q уровней, при этом проектируемый объект находится на уровне $n \in 1, \dots, q$ и имеет вертикальные и горизонтальные связи с другими элементами системы.
2. n -ный уровень вырезается из системы для более детального рассмотрения, при этом разрываемые связи представляются формально в виде чисел или параметрически заданных функций. Из всего множества связей выделяются наиболее существенные, которые учитываются при дальнейшем рассмотрении. Изменение параметров, замещающих связь, соответствует изменению условий проектирования и функционирования исследуемого объекта.
3. Формируются наборы частных критериев эффективности для уровней $n, n - 1, n + 1$ и проводится их согласование.
4. Объект проектирования разрабатывается обособленно при заданных параметрах связей и критериях. При этом оптимальные решения отбираются на основе частных критериев эффективности для данного уровня, а параметры связей рассматриваются как ограничения.

Параметрическое описание объектов и связей позволяет использовать методы исследования операций для получения оптимальных проектных решений. При этом авторы выделяют следующие типовые задачи параметрического синтеза:

- Получение полного множества допустимых альтернатив Z в виде их описания в пространстве критериев эффективно-сти с помощью отображения $V = \{v \mid v = v(z), z \in Z\}$.
- Проектирование объекта по ТЗ. Задача содержит требова-ния, обычно заданные в виде неравенств $v_j(z) \geq v_{j1}(z)$, при этом требуется найти решения $z_j \in Z$, удовлетворяющие за-данным неравенствам. Если не существует ни одного тако-го решения, следует искать новую структурную схему объ-екта или изменить требования.
- Предельное решение задачи проектирования [102]. При за-данной номенклатуре показателей $v_j, j = 1, \dots, p$ путем вариации ограничивающих параметров $v_l = \{v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{lp}\}$ выпол-няется поиск такого вектора значений v_l , при котором об-ласть решений Z стягивается в точку z_l^* . Метод поиска предельного решения состоит в последовательном переводе ограничений в разряд целевых функций и последующей их максимизации. Если пространство параметров является фи-зически неоднородным, то применение приемов нормиро-вания может приводить к множеству возможных решений z_l^* .
- Оптимизация в случае скалярного критерия $F = C(v)$. Вы-бор в качестве критерия единственного показателя $C = v_j$ приводит к созданию негармоничных конструкций, кото-рые, как правило, если и имеют успех, то весьма недолгое время. В многокритериальных задачах скалярная функ-ция C может быть построена как свертка того или иного вида на множестве рассматриваемых критериев.
- Многокритериальная оптимизация с выделением множе-ства Парето.

Проектирование подчиняется общим законам целенаправлен-ной деятельности, которая содержит следующие этапы: замысел, подготовка к действию, решение, действие. Существуют разные подходы к замыслу и формированию целей проектирования. Сложившийся на практике стереотип — ясно поставленная цель есть главнейшее условие успеха, — противоречит опыту специалистов по системному анализу, утверждающих, что цель создания системы и ее составляющие уточняются в ходе работы. Цель деятельности формируется на начальных стадиях проектирования, а достигается в момент времени $t = T$, где T — определенный момент жизненно-го цикла создаваемого объекта. Поэтому в процессах проектиро-вания необходимо осуществлять исследование и разработку обра-зов будущего на интервале $0 < t < T$. Формирование концепции объекта требует построения множества прогнозов, а именно:

- прогноз состояния или поведения внешних систем, взаимодействующих с объектом;
- прогноз задач, возлагаемых на объект, типовых операций и условий их проведения;
- прогноз развития конкурирующих или противоборствующих систем, их характеристик и стратегий применения.

Увеличение времени, отводимого на НИР и сокращение времени на ОКР (рис. 1.1), а также разработка в одной программе двух объектов — «нового» и «новейшего», приводит к повышению эффективности процессов проектирования [305].

Применение макромоделей для проектирования больших технических систем (БТС) рассмотрено в [196]. Для моделирования БТС используется три типа макромоделей: теоретико-множественная, лексикографическая и топологическая.

Теоретико-множественная модель отражает процесс взаимодействия системы со средой, который можно представить в виде $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, где каждое A_i может рассматриваться как формальное отображение некоторого объекта или фактора, входящего в состав БТС или среды. Теоретико-множественная модель БТС является собственным подмножеством макромоделей взаимодействия БТС со средой: $A_S \subset A$. A_S можно выявить путем отображения на конечном множестве A конечного множества отношений R , определяющих внешнюю структуру БТС $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$. Множество A_S , на котором R истинно, можно рассматривать как теоретико-множественную модель БТС.

Эта модель содержит информацию, позволяющую определить границы БТС и ее связи с внешней средой. При этом на модель не накладывается никаких ограничений, за исключением ограничения конечности. Недостатком подобной модели является то, что она не отображает непосредственно существующие связи и случайный характер взаимодействия. На базе этой модели могут быть сформированы остальные модели.

Лексикографическая модель строится на базе теоретико-множественной, при этом производится декомпозиция подмножеств A_i , $i = 1, \dots, n$ и ранжирование полученных компонентов по значимости. Декомпозиция и ранжирование производится методом экспертиз. В результате получается цепь (упорядоченное множество), включающая как сами A_i , так и их компоненты, вплоть до тупиковых. Любое упорядоченное множество может быть представлено в виде графа, который является топологической моделью БТС и отражает иерархичность, как характеристическое свойство системы.

Корнем графа является назначение БТС, листьями являются внутренние параметры. Топологическая модель БТС является основой для определения эффективности БТС в процессах системного проектирования. Лексикографическая модель позволяет получить несколько альтернативных возможностей организации БТС и выбрать из них оптимальную.

Следовательно, макро модель БТС может быть задана в терминах общей теории систем с помощью многоместного отношения n -ного порядка: $A_S = R[A_1, A_2, \dots, A_n]$.

Если множество A_S представить как совокупность входов X_S и выходов Y_S БТС $A_S = X_S \cup Y_S$, макро модель принимает следующий вид: $|X_S, R_S, Y_S| \subset A$, где R_S — множество отношений между входами и выходами, или множество состояний БТС.

Открытые системы всегда содержат элементы неопределенности состояний, которые обусловлены взаимодействием системы со средой. В связи с этим естественно предположить статистический характер состояний БТС. Макро модель БТС с учетом влияния среды в терминах теории функциональных пространств определяется как вероятностное пространство $|D_S, P_S|$, где D_S — компактная замкнутая область евклидова пространства, соответствующая множеству возможных состояний БТС; P_S — счетно-аддитивная функция, характеризующая характер взаимодействия БТС со средой. Влияние человека на состояние БТС определяется зависящим от него распределением ресурсов по пространству D_S , что выражается с помощью некоторого функционального отношения $f = f(q)$, определяющего состояние БТС и непрерывного на D_S . Предполагается, что человек может реализовать конечное множество таких отношений $D_F = \{f\}$.

Таким образом, макро модель БТС в терминах теории функциональных пространств определяется как вероятностное пространство $|D_S, P_S, D_f|$. Она дает представление о зависимости состояния БТС от поведения человека и среды, но не учитывает связательный характер развития и не включает представления об эффективности.

Определяя эффективность как неотрицательную меру, определенную на пространстве D_S , аддитивную для частей системы, макро модель БТС приобретает вид $|D_E, D_S, P_S, D_f|$, где D_E — компактное линейное пространство значений эффективности БТС. Рабочую макро модель БТС на непрерывном пространстве представляют в виде: $E = E(D_S, f(q), g(q))$, где $g(q)$ — функция внешних условий, отражающая воздействие среды на БТС. Выдвигая определенные

предположения о свойствах компонентов макромоделли, автор вычисляет эффективность БТС на основе информации о ее состоянии как интеграл Лебега-Стилтьеса

$$E(f) = \int_{D_S} E[f(q)]dP_S,$$

где $E[f(q)]$ — качество БТС, соответствующее состоянию q при реализации человеком стратегии f .

1.3. Современные направления развития проектирования ТС

Основная идея методов системного проектирования связана со стремлением придать творческому процессу целенаправленный характер. Основными процедурами системного проектирования можно считать декомпозицию, анализ и синтез рассматриваемых систем. Поскольку состояния этих систем изменяются во времени, развитие методов системного проектирования происходит в следующих направлениях:

- Эволюционное проектирование, основанное на рассмотрении систем в развитии.
- Расширение границ проектирования. Во время проектирования рассматриваются все стадии жизненного цикла создаваемого объекта (Product Development), увеличивается роль прогнозирования поведения надсистем, объектами проектирования становятся надсистемы
- Повышение качества разрабатываемых объектов (QFD, методы Тагучи).
- Повышение эффективности процесса проектирования (Concurrent Engineering).
- Развитие средств компьютерной поддержки процессов проектирования (конструкторские базы данных, автоматизация инженерных расчетов, СППР, ЭС).
- Интеллектуальное проектирование.

1.3.1. Эволюционный подход к проектированию

Концепцию эволюционного синтеза (ЭСС) антропогенных систем (АГС) сформулировал Е.П. Балашов в работе [82]. АГС притупляет противоречия между необходимостью эффективной и экономичной реализации определенной совокупности функций и сложностью соответствующей структуры, предназначенной для

их реализации. В мире живой природы подобные противоречия разрешаются с помощью механизмов приспособления, естественного отбора и гомеостатического регулирования. Аналогом этих механизмов в антропогенных системах является закон динамического уравнивания, который указывает на определенную тенденцию изменения системы в направлении состояния равновесия, т.е. уменьшения количественных характеристик ее противоречий, при этом движение к состоянию равновесия происходит с минимальными отклонениями от оптимального пути. Проблема проектирования систем сводится к «уравниванию» противоречивых показателей качества. К важнейшим принципам разрешения противоречий, свойственных техническим системам, Е.П. Балашов относит следующие:

- принцип многофункциональности; следует различать два основных аспекта многофункциональности: многофункциональные элементы и многофункциональное использование элементов;
- принцип миниатюризации;
- принцип повышения однородности систем и регулярности их структуры.

Концепция ЭСС основана на рассмотрении ТС в непрерывном развитии, что выражается в преемственности функционально-структурной организации и технической реализации систем определенного целевого назначения, в формировании систем с возможностью потенциального расширения их функциональных возможностей. Стратегия ЭСС сводится к последовательным формированиям и преобразованиям ряда моделей системы, соответствующим различным уровням функционально-структурной организации системы.

Начальные фазы эволюционного синтеза систем связаны с анализом функционально-структурной организации и технической реализации систем-прототипов. Такой анализ позволяет сформулировать основные противоречия системы и установить их причинно-следственные связи. На последующих этапах исследуется дерево противоречий систем рассматриваемого класса и формируется дерево функций проектируемой системы, являющейся основой для синтеза структуры системы на базе функциональных и конструктивных модулей. На основе дерева функций и эвристических приемов разрешения противоречий в технических системах

формируется структура системы на основе функциональных модулей. Далее осуществляется покрытие этой структуры конструктивными модулями. Стратегия преобразования дерева функций в структуру на основе функциональных модулей и покрытие этой структуры конструктивными модулями предполагает преимущественное использование многофункциональных модулей. Это позволяет минимизировать структуру системы и обеспечить ее высокие технико-экономические показатели. На следующем этапе порождается ряд альтернативных вариантов системы. Производится их сравнение по основным технико-экономическим показателям. Принимается решение о выборе окончательного варианта системы.

К наиболее эффективным способам разрешения противоречий в ТС Балашов относит следующие эвристические приемы:

1. Количественное изменение функциональной нагрузки (увеличение числа активных элементов; увеличение числа пассивных элементов; многократное их использование).
2. Изменение структуры системы (изменение состава элементов; изменение связей и перераспределение функций элементов; изменение состава элементов и связей между ними).
3. Использование функционально полных наборов элементов. Изменение параметров системы.
4. Инверсия функций.
5. Инвариантные системы (инвариантность к источнику энергии; инвариантность к виду рабочего тела; инвариантность к виду обрабатываемой информации).
6. Системы с регенерацией.
7. Пространственное совмещение функций.
8. Композиция качеств (получение новых функций на основе определенного набора функций; материалы с гибридными свойствами; системы с «широким выходом»).

В работах Б.М. Якобсона [329, 328] *задача эволюционного проектирования* сформулирована следующим образом: определить некоторое множество элементов X ; выбрать из него подмножество элементов $X' \subset X$; разместить их в пространстве и соединить с помощью L связей так, чтобы они в совокупности выполняли некоторое множество функций F , обеспечивая достижение системой S заданной общей цели Z . Полученная система должна удовлетворять некоторому множеству ограничений C и быть предпочтительной (оптимальной) относительно векторного критерия W с учетом правил предпочтения.

Отсутствие строгого общего решения задачи синтеза сложной неоднородной системы обусловлено следующими причинами:

1. Начальная информация о составе элементов и отношений между ними ограничена; различным уровням описания системы соответствуют свои составы элементов.
2. Возможны альтернативные способы членения сложной системы на элементы.
3. Не все свойства системы можно получить суммированием свойств ее частей.
4. В процессе формализации связи между элементами обычно выражаются через бинарные отношения или отношения, сводимые к бинарным, но известно, что система, представляя собой целостную организацию, несводима к бинарным отношениям.
5. Проектирование новых систем часто является поиском принципиально новых решений, следовательно, эффективный метод решения задачи должен включать процессы, ведущие к образованию новых структур с новым составом элементов и отношениями между ними.

Процесс проектирования технических систем — это синтез вариантов, удовлетворяющих заранее сформированным проектным решениям. Отбор вариантов происходит поэтапно — отбор структур, режимов, параметров и т.д. На каждом этапе существует свой отбор критериев и учитывается вся информация, которая меняется при переходе от этапа к этапу. Отличительными признаками подходов к проектированию являются декомпозиция целей, иерархичность и многокритериальность. Эволюционный подход к проектированию систем обладает всеми этими признаками.

Эволюционный подход к проектированию развит в работах И.Л. Букатовой [94, 93], где описан многоуровневый процесс создания проектных вариантов. Любой из заданных целей ставится в соответствие некоторое множество известных или прогнозируемых общих принципов построения систем. Целью может служить, например, выполнение некоторой функции $f \in F$. Множество принципов можно рассматривать как множество общих решений $\{R\}$. Выбор наилучшего решения R^* осуществляется с помощью информации об ограничениях, критериях и правилах предпочтения.

На первом этапе эволюционного проектирования определяются функциональные и структурные элементы, а также устанавливается соответствие между ними (множество функционально-структурных элементов). На втором этапе выделяется совокупность до-

пустимых функциональных схем, которые строятся на основе отношений между функциональными элементами. При этом принимаются во внимание такие ограничения, как функциональная полнота схем, ограничения количества ветвлений, отсутствие избыточности, непротиворечивость. На следующем, третьем, этапе строится множество функционально-структурных схем (ФСС), при этом в качестве ограничений выступает совместимость функционально-структурных элементов в рамках единой схемы. Заключительный, четвертый, этап эволюционного проектирования связан с оценкой эффективности полученных ФСС на основе сформированного набора показателей качества.

1.3.2. Методы повышения эффективности и качества проектирования

В традиционном проектировании рассмотрение жизненного цикла создаваемого продукта обычно ограничивается стадией производства, иногда учитывается стадия эксплуатации. Современные подходы (Product Development) ориентированы на учет всех стадий жизненного цикла вплоть до уничтожения проектируемого объекта [126, 18, 156, 213, 2]. Требования к объекту проектирования на разных этапах жизненного цикла противоречивы. В докладе [18] показано, как разрешаются противоречия между техническими, экономическими, экологическими и политическими требованиями к объекту проектирования на BMW. Выбор оптимального проектного решения в условиях конфликтующих требований осуществляется на базе сформулированных принципов экологически безопасного проектирования. Ключевыми этапами такого подхода являются: 1) технология сборки, оптимизированная с учетом последующего демонтажа и повторного использования; 2) выбор материалов на основе анализа возможности и экономической эффективности повторного использования и/или утилизации; 3) проектирование компонентов с учетом демонтажа и повторного использования.

Важной частью процесса проектирования является анализ жизненного цикла создаваемого объекта, позволяющий не только оценить возможный срок его эксплуатации, но и принять во внимание факторы окружающей среды, которые могут оказать влияние на проектные решения. Например, анализ жизненного цикла автомобилей, проведенный фирмой BMW, позволил установить следующую закономерность: «уменьшение веса на 10 % позволяет уменьшить расход горючего на 7 %». Это правило может определить выбор материала для изготовления моста [18].

В условиях экономического кризиса и неблагоприятного инвестиционного климата объектом проектирования часто становится не только техническая система, но и надсистема, структуру которой необходимо изменить с целью повышения эффективности функционирования. Такие процессы часто связаны с принятием инвестиционных решений и с планированием [107, 105, 95, 74, 87, 137, 149, 163, 166, 290, 235, 268, 275, 278, 277].

Проектирование объектов высокого качества является одним из самых актуальных направлений. Концепцию проектирования продуктов высокого качества сформулировал Вольфганг Бейтц [6]. Главными правилами проектирования ТС он считает ясность, простоту и безопасность. Основные принципы проектирования конструкций по Бейтцу — это: 1) принцип передачи сил; 2) принцип декомпозиции; 3) принцип интеграции функций; 4) принцип самосовершенствования; 5) принцип устойчивости.

В работе [25] описан синергетический подход к проектированию, основанный на соединении методов системного проектирования, развитых в Европе [314, 35], развитых в Японии методов Тагучи [49] и QFD (Quality Function Deployment) [12], а также методики VA/VE (Value Analysis/ Value Engineering) [17].

QFD — это методика, направленная на глубокое понимание проблемы проектирования, позволяющая преобразовать требования потребителей в технические требования. Она также предусматривает оценку потребителями конкурирующих продуктов и оценку конкурирующих технологий инженерами компании. Методика QFD может применяться не только на стадии планирования продукта, но и на более поздних стадиях проектирования (рис. 1.3.). Она является важным инструментом методологии параллельного проектирования (Concurrent Engineering), активно развивающейся в последние годы.

Методика QFD направлена на активное взаимодействие с потребителями разрабатываемого продукта на ранних стадиях проектирования. Она основана на использовании экспертной информации и статистических методов для выявления корреляций между требованиями и не содержит процедур, направленных на генерацию новых идей. Наряду с QFD существуют подходы, связанные с привлечением поставщиков к начальным этапам разработки новых продуктов [7].

Суть методов Тагучи заключается в последовательной оптимизации продукта на стадии проектирования. При этом сначала разрабатывается базовый первичный проект изделия на основе интуитив-

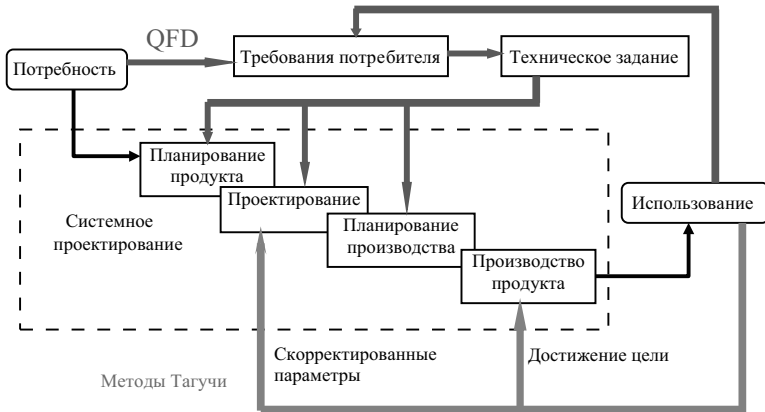


Рис. 1.3. Применение методов Тагучи и QFD для основных задач системного проектирования

ных или системных методов и, если проектировщик считает, что он нуждается в доработке, используются следующие возможности:

- изменение значений параметров;
- уменьшение допусков.

В [49] сформулированы основные принципа подхода Тагучи к устойчивому проектированию:

- Высокий уровень качества продукта закладывается в процессе проектирования. Не рекомендуется применять операции фильтрации для отбрасывания объектов с низким качеством.
- Формулируется основная цель проектирования, связанная, как правило, с высоким уровнем качества продукта. Высокая цена за высокое качество рассматривается как отклонение от поставленной цели.
- Продукт не должен обладать высокой чувствительностью к неконтролируемым внешним факторам.

Стремление повысить эффективность процесса проектирования привело к появлению параллельного проектирования (*Concurrent Engineering*). Главное его отличие от традиционного подхода заключается в том, что различные этапы перекрываются во времени (см. рис. 1.3), в то время как в традиционных методах они выполняются последовательно. При этом существенно сокращается время разработки продукта за счет исключения операций установления соответствий между этапами [51, 30, 16, 10]. Применение технологии искусственного интеллекта в *Concurrent Engineering* рассматривается в [287].