

Министерство образования и науки Российской
Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)

Н.В. Зариковская

Аналитические методы проектирования
Учебное пособие

2018

Зариковская Н.В.

Аналитические методы проектирования. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2018.– 73 с.

Данное пособие является основой при изучении курса «Аналитические методы проектирования».

Рассмотрены вопросы определения и назначения моделирования; основные методы технического проектирования и конструирования; основные законы развития технических систем; использование современных технических средств в процессе технического проектирования.

© Зариковская Н.В. 2018

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление	3
Введение	5
1. Общие вопросы проектирования	8
1.1. Основные понятия	8
1.1.1. Задачи и виды проектирования	8
1.1.2. Проектная документация	9
1.2. Этапы проектирования технических систем.....	10
1.2.1. Разработка технического задания	10
1.2.2. Этап предварительного проектирования.....	11
1.2.3. Эскизное проектирование	12
1.2.4. Техническое проектирование	13
1.2.5. Состав проектной документации	15
1.2.6. Автоматизация проектирования.....	16
1.3. Система как объект проектирования	17
1.3.1. Понятие системы	18
1.3.2. Структурная и функциональная организация системы	20
1.3.3. Общие свойства систем.....	22
1.3.4. Эффективность системы	24
1.3.5. Параметры и характеристики системы.....	29
1.3.6. Понятие процесса	33
1.3.7. Классификация систем и процессов	34
1.4. Модель как средство проектирования	37
1.4.1. Типы моделей.....	37
1.4.2. Основные требования к модели	38
1.4.3. Классификация математических моделей.....	41
1.4.4. Параметризация моделей	43
2. Типовые задачи и методы проектирования.....	45
2.1. Типовые задачи проектирования	45
2.1.1. Разработка математической модели	45
2.1.2. Разработка метода исследования	46
2.1.3. Анализ свойств системы	47
2.1.4. Синтез системы и разработка проекта.....	47
2.1.5. Детальный анализ спроектированной системы	48
2.1.6. Корректировка модели.....	49
2.2. Методы проектирования.....	49

2.2.1. Аналитические методы	50
2.2.2. Статистические (имитационные) методы	51
2.2.3. Комбинированный подход.....	53
2.3. Принципы проектирования систем.....	54
2.3.1. Системный подход и системотехническое проектирование	54
2.3.2. Принцип иерархического многоуровневого моделирования	56
2.3.3. Принцип множественности моделей	59
2.4. Этапы проектирования систем.....	60
2.4.1. Формулировка целей проектирования и требований к разрабатываемой системе	60
2.4.2. Разработка концептуальной модели проектируемой системы	61
2.4.3. Разработка и параметризация математических моделей	63
2.4.4. Выбор или разработка методов и средств проектирования..	63
2.4.5. Проверка адекватности модели.....	66
2.4.6. Проведение экспериментов на модели и анализ характеристик системы	68
2.4.7. Решение задачи синтеза	70
2.4.8. Детальный анализ спроектированной системы	71
Список используемой литературы.....	73

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании больших и сложных систем возникают проблемы, связанные не только со свойствами их составных частей – элементов и подсистем, но также и с закономерностями функционирования объекта в целом, рассматриваемые как общесистемные проблемы. Следствием этого является необходимость решения широкого круга специфических задач, к которым относятся: определение общей структуры системы и требований к элементам и подсистемам, организация взаимодействия между ними, выбор оптимальных режимов функционирования, оптимальное управление протекающими в системе процессами, учёт влияния внешней среды и т.п. По мере усложнения систем всё более значимыми становятся общесистемные вопросы, которые рассматриваются в рамках таких дисциплин, как теория сложных систем, системотехника, моделирование.

Проектирование сложных систем обычно предполагает две стадии:

- макропроектирование или внешнее проектирование, в процессе которого решаются структурно-функциональные задачи в целом;
- микропроектирование или внутреннее проектирование, связанное с разработкой элементов системы как физических единиц оборудования.

Методы внешнего проектирования сложных систем базируются на системном подходе к исследованию процессов функционирования, протекающих в системах.

Внешнее проектирование начинается с формулировки проблемы, которая включает в себя:

- определение целей создания системы и круга решаемых ею задач;
- оценка действующих на систему факторов и определение их характеристик;
- выбор показателей и критерия эффективности системы.

В качестве показателей эффективности выбираются числовые характеристики, оценивающие степень соответствия системы своему назначению. Например:

- для системы управления посадкой самолёта показателем эффективности может служить вероятность успешной посадки;
- для автоматической телефонной станции — среднее время ожидания соединения с абонентом;
- для производственного процесса — среднее количество выпускаемых за смену изделий и т. д.

Результаты проведённых исследований используют для обоснования технического задания на разработку системы.

В соответствии с техническим заданием могут быть определены один или несколько вариантов проектируемой системы, которые заслуживают дальнейшего подробного исследования. Анализ вариантов системы, выполняемый на этапе системного анализа, проводится по результатам математического моделирования с применением аналитических и имитационных методов. Результаты моделирования позволяют определить значения показателей эффективности системы, обосновать её оптимальную структуру и составить рекомендации по совершенствованию исследуемых вариантов. Математическое моделирование является мощным и эффективным инструментом исследования сложных объектов, систем и процессов в различных областях. Многообразие процессов, протекающих в исследуемых системах и объектах, обуславливает и многообразие математических методов и средств, используемых в процессе проектирования.

Большинство технических систем, в том числе вычислительные системы и сети, описываются в терминах дискретных случайных процессов с использованием вероятностных методов. При этом широкое применение находят математические модели, отражающие структурно-функциональную организацию исследуемых систем, построенные на основе моделей теории массового обслуживания, анализ которых может проводиться аналитическими и статистическими методами. В качестве аналитических методов используются вероятностные методы теории массового обслуживания, теории случайных процессов, в качестве статистических – методы имитационного моделирования. Пособие содержит основные понятия и определения теории проектирования и затрагивает общие вопросы теории сложных систем, принципы математического моделирования. В качестве моделей, на основе которых могут решаться задачи структурного и функционального

проектирования, рассматриваются простейшие модели дискретных систем, используемые, в частности, при проектировании вычислительных систем и компьютерных сетей.

Учебное пособие может быть использовано выпускниками (бакалаврами и магистрантами) при написании выпускных квалификационных работ, связанных с проектированием и исследованием систем, представляемых в виде моделей массового обслуживания. Примерами таких систем могут служить компьютерные сети или их фрагменты – вычислительная система (сервер), узел (маршрутизатор, коммутатор) или канал передачи данных.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

При изложении любой научно-технической дисциплины одним из важных вопросов является формирование терминологии, служащей в дальнейшем фундаментом для изучения теоретических и практических аспектов данной дисциплины. Целью формирования терминологической основы является установление однозначного соответствия между используемым термином и вкладываемым в него смысловым содержанием.

Ниже определены базовые понятия и термины теории систем, а также изложены принципы, задачи, методы и этапы проектирования с использованием математических моделей на примере систем со стохастическим характером функционирования, рассматриваемых в дальнейшем в качестве объектов проектирования.

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Проектирование (от лат. *projectus*, буквально – брошенный вперёд) – процесс создания проекта – прототипа новой системы (или её вариантов), удовлетворяющей предъявляемым к ней требованиям.

1.1.1. ЗАДАЧИ И ВИДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Задачи проектирования решаются как в процессе разработки новой системы, так и в процессе модернизации или реконструкции системы.

Модернизация (от англ. *modern* – современный, новый, усовершенствованный) – обновление системы в соответствии с новыми требованиями и нормами путем замены или добавления нового оборудования, расширяющего, например, функциональные возможности системы и улучшающего ее показатели эффективности. Например, модернизация локальной компьютерной сети некоторой организации, направленная на повышение качества обслуживания пользователей, может заключаться в замене сервера сети (маршрутизатора, коммутатора или канала связи), являющегося узким местом, на более мощный сервер или в добавлении второго сервера, позволяющего разгрузить исходный сервер.

Реконструкция – (от *re-* и лат. *constructio* – построение) – коренное изменение (перестройка) системы с целью усовершенствования, направленное на повышение качества

функционирования системы. Например, для той же локальной компьютерной сети реконструкция может означать существенное изменение как состава оборудования и топологии сети (изменение структурной организации), так функциональной организации (метода доступа к общим ресурсам, алгоритма маршрутизации и т.п.).

Существуют различные виды проектирования, в том числе:

- инженерное проектирование – проектирование инженерных систем (электросетей, газопроводов и т.п.);
- промышленное проектирование (промышленных объектов);
- техническое проектирование (технических систем и устройств);
- проектирование программных средств и информационных систем;
- другие виды проектирования.

Ниже основное внимание уделяется вопросам проектирования технических систем, к которым относятся, в том числе, вычислительные системы, комплексы и компьютерные сети.

1.1.2. ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Техническое проектирование различного рода систем состоит в разработке документации, предназначенной для создания новых систем.

Проект технической системы – это комплект технической (проектной) документации, предназначенной для создания новой системы, ее эксплуатации, ремонта и утилизации.

Процесс проектирования часто включает в себя и конструирование – процесс создания материального образа разрабатываемой системы в виде макета (прототипа) или графических изображений (чертежей, эскизов, компьютерных моделей).

Прототип (от греч. *protos* – первый и *typos* – отпечаток, оттиск) – прообраз, образец, оригинал.

Термин «прототип» трактуется по-разному в зависимости от предметной области. В области технических систем прототипом является работающая модель или макет, опытный образец устройства или системы.

Состав проектной документации регламентирован стандартами, в том числе, такими как:

- единая система конструкторской документации (ЕСКД) – стандарт, устанавливающий правила и способы разработки, оформления и обращения технической документации;
- единая система программной документации (ЕСПД) – стандарт, устанавливающий правила и способы разработки, оформления и обращения документации по программному обеспечению.

Комплект проектной документации и материалов, содержащих результаты проектирования, включает в себя:

- проектное задание или эскизный проект,
- технический проект,
- рабочий проект.

В процессе проектирования выполняются технические и экономические расчёты, разрабатываются схемы, графики, пояснительные записки, сметы, калькуляции и описания.

При разработке новых технических систем проводятся научно-исследовательские работы, связанные с разработкой новых и обоснованием предлагаемых технических решений.

1.2. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Проектирование технических систем включает в себя следующие этапы:

- 1) разработка технического задания;
- 2) предварительное проектирование;
- 3) эскизное проектирование;
- 4) техническое проектирование.

Рассмотрим кратко содержание этих этапов.

1.2.1. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Техническое задание (ТЗ) составляется разработчиком (проектировщиком) на основе исходных данных, предоставленных заказчиком, содержит основные технические требования к создаваемой системе и служит основанием для проектирования.

Техническое задание содержит:

- назначение системы;
- область применения проектируемой системы;

- технические требования к технико-экономическим показателям разрабатываемой системы, формулируемые в виде ограничений, налагаемых на показатели эффективности;
- условия эксплуатации (режим и продолжительность эксплуатации, внешние воздействия и т.д.);
- сроки и стоимость разработки;
- возможные особые условия производства и эксплуатации;
- другие дополнительные сведения, которые оказывают влияние на результаты проектирования системы.

Одной из важных составляющих технических требований является перечень (номенклатура) показателей, характеризующих технический уровень разрабатываемой системы, а также требования, предъявляемые к ним в виде ограничений, налагаемых на их численные значения. На основе этих показателей в процессе проектирования формируются критерии эффективности, используемые на различных этапах проектирования.

Обоснование и измерение этих показателей, а также разработка методов количественной оценки качества продукции (в том числе технических систем) реализуется в научной дисциплине, называемой квалиметрией.

К основным задачам квалиметрии относятся:

- обоснование номенклатуры показателей качества;
- разработка методов определения показателей качества и их оптимизации;
- разработка принципов построения обобщённых показателей качества (критериев эффективности) и обоснование условий их использования в задачах стандартизации и управления качеством.

В качестве математического аппарата в квалиметрии используются методы линейного, нелинейного и динамического программирования, теория оптимального управления, теория массового обслуживания и т.д.

От качества ТЗ существенно зависят результаты проектирования.

1.2.2. ЭТАП ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Предварительное проектирование проводится в рамках научно-исследовательской работы (НИР). Остальные этапы относятся к опытно-конструкторской разработке (ОКР).

Результаты предварительного проектирования оформляются в виде технических предложений (аванпроекта), представляющих собой технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки системы, удовлетворяющей требованиям ТЗ, а также выявление возможных вариантов реализации системы и их сравнительный анализ. Технические предложения формируются по результатам выполнения НИР в виде научно-технического отчета, содержащего выводы о новых принципах построения системы, научно обоснованный подход к реализации этих принципов, анализ проведенных экспериментов, а также математически обоснованные варианты построения системы. Результаты НИР могут оказаться отрицательными и свидетельствовать о невозможности реализовать систему, удовлетворяющую заданным в ТЗ требованиям.

На этом этапе выполняется:

- обзор и сравнительный анализ существующих вариантов построения системы с целью определения достоинств и недостатков каждого из них;
- выбор возможных вариантов структурно-функциональной организации разрабатываемой системы или синтез оптимального варианта на основе сформулированного критерия эффективности и результатах математического моделирования;
- в случае нескольких вариантов построения системы – их сравнительный анализ и выбор из них наилучшего варианта на основе сравнения основных характеристик этих вариантов или выбранного критерия эффективности;
- в случае синтеза оптимального варианта на основе математического моделирования – выбор метода проектирования, включая разработку математической модели и формулирование задачи оптимизации.

1.2.3. ЭСКИЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

На этапе эскизного проектирования выбирается окончательный вариант разрабатываемой системы, оформляемый в виде эскизного проекта, в который входят:

- пояснительная записка, включающая, в частности, описание методов исследований, результаты математического (если

необходимо, то и физического) моделирования и выполненных расчётов;

- эскизная техническая документация на спроектированную систему;
- заключение о соответствии спроектированной системы техническому заданию.

Эскизный проект в виде совокупности документов дает представление об устройстве и принципе функционирования системы, а также о соответствии назначению и основным требованиям, предъявляемым к разрабатываемой системе.

Эскизная документация предназначена для изготовления лабораторных и экспериментальных образцов системы или её отдельных частей, требующих экспериментального исследования. На этапе эскизного проектирования для таких испытаний может оказаться необходимым создание специальных испытательных стендов.

Эскизный проект направляется заказчику для ознакомления и выдачи замечаний, после устранения которых защищается разработчиком перед заказчиком и утверждается им или возвращается на доработку. При утверждении эскизного проекта в случае необходимости на основании содержащихся в нем результатов может быть скорректировано техническое задание.

1.2.4. ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Процесс проектирования технических систем является итеративными с многократным повторением этапов с целью уточнения структурно- функциональных параметров и улучшения проекта.

Проектирование новой технической системы – это противоречивая задача: с одной стороны, следует использовать все последние достижения науки и техники в данной области, а с другой – обычно имеются многочисленные ограничения, указанные в техническом задании (стоимость, сроки проектирования и т.п.).

Во многих случаях проектирование новых технических систем предполагает разработку новых технических идей и инженерных решений для построения эффективной системы, удовлетворяющей заданным требованиям. Поставленная цель может быть достигнута путём решения следующих задач:

- определение, к какому классу систем относится проектируемая система и построение обобщенной модели систем такого класса;

- сравнительный анализ свойств разных систем такого класса и выявление их достоинств и недостатков;

- разработка новых вариантов построения системы;

- сравнительный анализ новых вариантов и обоснование эффективности выбранного варианта построения проектируемой системы.

Процесс проектирования новой технической системы и решение сформулированных выше задач могут быть реализованы одним из следующих способов:

- разработка технической системы с требуемыми новыми свойствами на основе комбинаций известных решений;

- поиск нужных идей на основе ассоциаций в окружающем мире, включая живой, т.е. использование решений, существующих в других сферах;

- создание на основе воображения и собственной фантазии идеализированных образцов разрабатываемых систем и поиск путей их реализации.

Перечисленные задачи и способы их реализации в процессе проектирования новых технических систем тесно связаны с творческим процессом – изобретательством.

Изобретения могут иметь различную степень новизны – от усовершенствования известного прототипа до новой идеи и открытия.

Последнее выходит за рамки инженерного творчества и относится к творчеству научному.

Между научным и инженерным творчеством имеется принципиальное различие. В науке – это выявление новых фактов и закономерностей, присущих системам и протекающим в них процессам, а также разработка новых принципов и методов построения систем. В инженерно-технической области – это создание на основе этих закономерностей и методов новых образцов техники. Правда, нередко при этом получают и новые научные результаты, вплоть до открытий. Наиболее часто это происходит при создании принципиально новых видов систем, что само по себе может рассматриваться как научная деятельность, поскольку такие

разработки не могут полностью базироваться на научно обоснованных методах расчетов, проектирования и т.д.

При проектировании технических систем широко используются средства вычислительной техники для расчётов и моделирования, что позволяет сократить сроки и повысить качество проектирования.

Техническое проектирование осуществляется на основе эскизного проекта с учётом замечаний со стороны заказчика и возможных изменений в техническом задании. Результатом технического проектирования является комплект технической документации, в состав которой входят конструкторская, программная, технологическая и эксплуатационная документации с техническими решениями по структурно-функциональной организации разрабатываемой системы.

На заключительном этапе проектирования систем разрабатывается рабочий проект – комплект конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца (макета) проектируемой системы.

1.2.5. СОСТАВ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

В состав проектной документации в общем случае входят:

- конструкторская документация;
- программная документация;
- технологическая документация;
- эксплуатационная документация.

Конкретный состав проектной документации зависит от разрабатываемой системы и цели проектирования.

Конструкторская документация содержит:

- различные схемы разрабатываемой системы: структурные, функциональные, электрические и т.д.;
- чертежи: общего вида, отдельных узлов и деталей;
- текстовые документы: технические условия (ТУ) на систему, техническое описание системы и отдельных её частей (подсистем).

В программную документацию в соответствии с ЕСПД входят:

- текст и описание программ;
- описание применения;
- руководство оператора;

- руководство системного программиста и т.д.

Технологическая документация включает:

- технологические инструкции;
- технологические (маршрутные) карты;
- чертежи на техническую оснастку и приспособления. В

эксплуатационную документацию входят:

- руководство по эксплуатации (РЭ), содержащее описание изделия, рекомендации по его использованию, техническому обслуживанию, текущему ремонту, правила хранения и транспортировки и т.п.;

- инструкция по монтажу, пуску и т.п.

- ведомость ЗИП – запасных частей, инструмента и приспособлений.

На этапе технического проектирования осуществляются изготовление и испытания опытных, а затем и серийных образцов изделия с последующей корректировкой документации по результатам этих испытаний.

1.2.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Автоматизация проектирования состоит в применении ЭВМ и специальных программных средств для проектирования систем. Автоматизированное проектирование позволяет исключить субъективизм при принятии решений, повысить точность расчётов, предоставить возможность выбора наилучшего, а в некоторых случаях, оптимального варианта для реализации на основе строгого математического анализа нескольких вариантов проекта с оценкой технических, технологических и экономических характеристик системы, значительно повысить качество проектной документации, существенно сократить сроки проектирования.

Методы и средства автоматизации проектирования различны и зависят от характера и назначения проектируемой системы. При этом наибольший эффект достигается при автоматизации проектирования больших и сложных технических систем, характеризующихся наличием большого количества разнородных элементов и многочисленными сложными связями между ними. Так, например, при проектировании вычислительных систем и компьютерных сетей с помощью автоматизированной системы проектирования определяются конфигурация (топология) системы,

технические параметры входящих в её состав устройств, их структурная и функциональная реализация, рассчитываются показатели производительности, надёжности, экономической эффективности и т.д.

1.3. СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Объектами проектирования в технике являются системы и протекающие в них процессы (рисунок 1). В вычислительной технике объектами проектирования являются вычислительные машины, комплексы, системы и сети. В последних, кроме вычислительных процессов, присущих вычислительным машинам и системам, важную роль играют процессы передачи данных. Проектирование таких систем обычно является многоэтапным и предполагает использование математических методов моделирования.

Моделирование заключается в представлении исследуемой системы (процесса) в виде некоторого объекта, называемого моделью (рисунок 1), и проведении экспериментов на модели с целью получения информации о системе путем исследования свойств модели, на основе которого формулируются и решаются задачи, связанные с разработкой проекта системы, удовлетворяющей перечисленным в техническом задании требованиям.

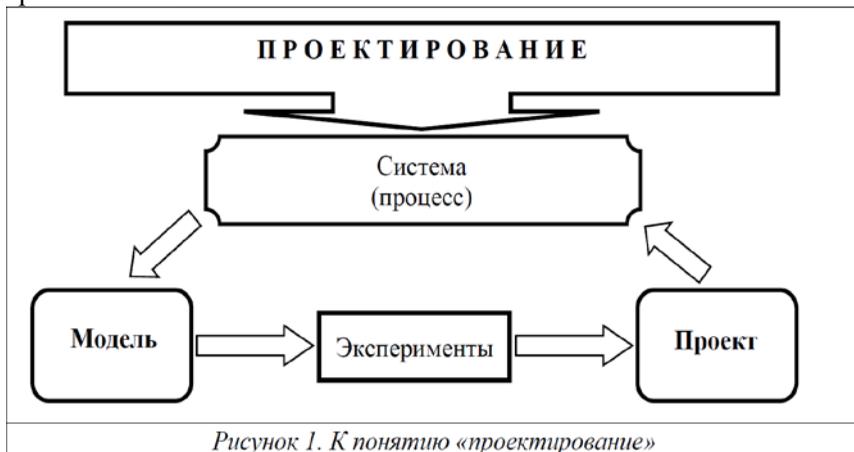


Рисунок 1. К понятию «проектирование»

Моделирование предоставляет возможность решать задачи проектирования систем, прямой эксперимент с которыми трудно выполним, экономически невыгоден или вообще невозможен.

Моделирование как эффективное средство исследования широко применяется в различных областях науки и техники при проектировании: вычислительных систем и компьютерных сетей, систем в авиа- и автомобилестроении, в приборо- и машиностроении, систем телекоммуникаций и т.д. Повсеместное применение моделирования при проектировании технических систем обусловлено всеохватывающим внедрением средств вычислительной техники и появлением специализированных программных средств моделирования в различных областях, используемых на этапах проектирования новых и модернизации существующих систем, анализа эффективности использования систем в различных условиях (например, в экстремальных ситуациях, в условиях повышенных требований к надежности и живучести). Применение моделирования на этапе проектирования позволяет выполнить анализ различных вариантов предлагаемых проектных решений, определить работоспособность и оценить надежность системы, выявить узкие места и мало загруженные ресурсы, а также сформулировать рекомендации по рациональному изменению состава и структуры или способа функциональной организации системы.

1.3.1. ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ

Под системой (от греч. *systema* – целое, составленное из частей; соединение) будем понимать совокупность взаимосвязанных элементов, объединенных в одно целое для достижения некоторой цели, определяемой назначением системы. Здесь следует обратить внимание на два момента: во-первых, элементы обязательно взаимосвязаны и, во-вторых, система имеет определенное назначение.

Элемент представляет собой минимальный неделимый объект, рассматриваемый как единое целое.

Понятие «система» широко используется в повседневной жизни. Мы говорим «система знаний», «система оценок», «система взглядов» и т.д. Можно заметить, что приведенные термины не вполне соответствуют данному выше определению. И хотя можно

попытаться найти в этих «системах» элементы и связи между ними, это всё-таки будет выглядеть несколько искусственно притянутым. Такая ситуация обусловлена тем, что в этих примерах понятие «система» используется в более широком общепринятом смысле. В каждой предметной области может быть введена своя трактовка понятия «система».

Техническая система – это создаваемый человеком на основе достижений науки и техники объект, обладающий структурной и функциональной организацией.

Таким образом, для технических систем будем руководствоваться данным выше определением термина «система», и, говоря о системе, будем иметь в виду, прежде всего, техническую систему.

Сложная (большая) система характеризуется большим числом входящих в его состав элементов и множеством связей между ними.

Комплекс представляет собой совокупность взаимосвязанных систем.

Соотношение введенных понятий иллюстрирует рисунок 2.

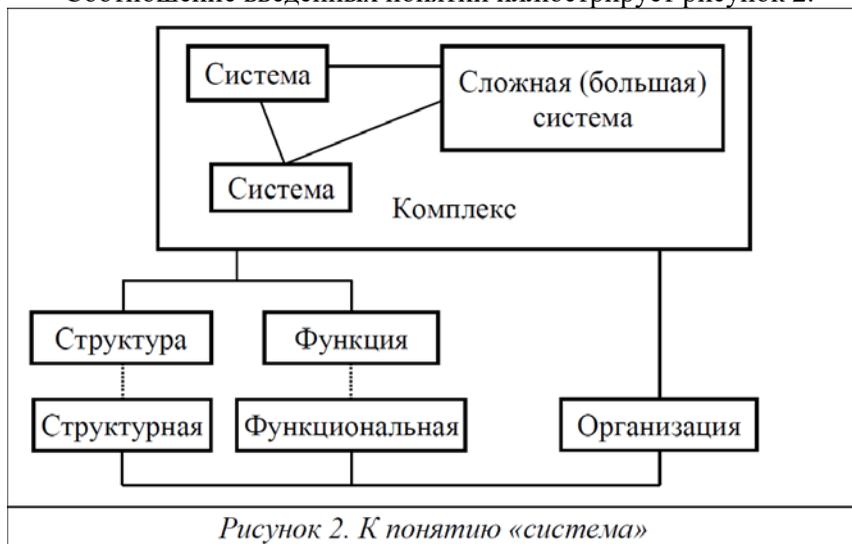


Рисунок 2. К понятию «система»

Элемент, система и комплекс – понятия относительные. Любой элемент может рассматриваться как система, если его расчленишь на более мелкие составляющие – элементы. И наоборот, любой

комплекс может рассматриваться как система, если входящие в его состав системы рассматривать как единое целое и трактовать их как элементы. В связи с этим, понятия «система» и «комплекс» часто трактуют как эквивалентные понятия. Например, вычислительную машину можно рассматривать как систему, элементами которой являются центральный процессор, оперативная память, накопители на магнитных дисках, устройства ввода-вывода. В то же время, центральный процессор можно рассматривать как систему, состоящую из таких элементов, как арифметико-логическое устройство, устройство управления, счетчик команд, регистровая память и т.д.

1.3.2. СТРУКТУРНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Проектирование системы обычно связано с определением её структурной и функциональной организации (рисунок 2).

Под организацией системы понимают способ достижения поставленной цели за счет выбора определенной структуры и функции системы и соответственно различают структурную и функциональную организацию системы.

Структурная организация определяется набором элементов и способом их соединения в структуру, обеспечивающую возможность реализации возлагаемых на систему функций.

Функциональная организация определяется способом порождения функций системы, достаточных для достижения поставленной цели. Синонимом термина «функциональная организация» часто служит термин «режим функционирования» системы, определяющий порядок выполнения возложенных на систему функций.

Структура системы задается перечнем и значениями параметров входящих в состав системы элементов и связями между элементами.

Структура технической системы задается, например, в виде перечня и количества устройств, блоков, узлов, их техническими характеристиками и матрицы связей между устройствами.

Структура системы может быть задана следующими способами (рисунок 3):

- графически в форме:

– графа, в котором вершины соответствуют элементам системы, а дуги – связям между ними;

– схем, широко используемых в инженерных приложениях, в которых элементы обозначаются в виде специальных символов;

- аналитически путем задания количества типов элементов, количества и значений параметров (скорость работы, размер и т.п.) элементов каждого типа, а также матрицы связей (инцидентности), определяющей взаимосвязь элементов.

Функция системы представляет собой правило достижения поставленной цели, описывающее поведение системы и направленное на получение результатов, предписанных назначением системы.

Функция технической системы определяется её назначением и может быть представлена:

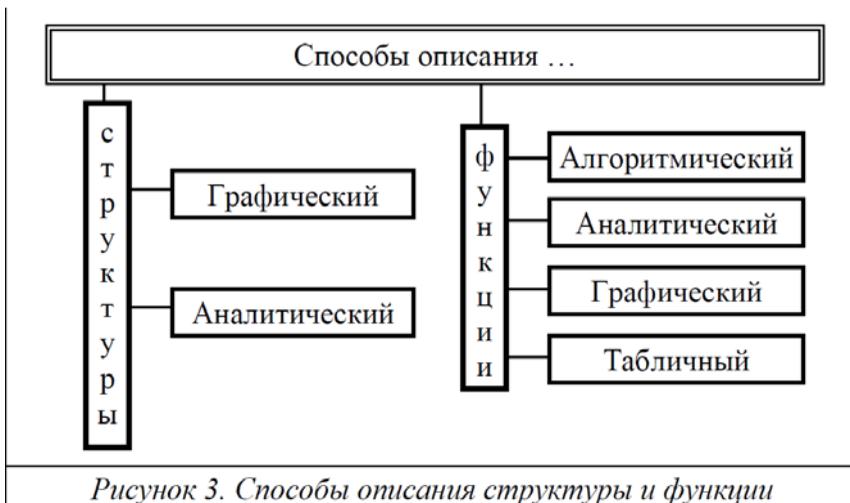
- алгоритмически в виде словесного описания, содержащего последовательность шагов, которые должна выполнять система для достижения поставленной цели;

- аналитически в виде математических зависимостей в терминах некоторого математического аппарата: теории множеств, теории случайных процессов, теории дифференциального или интегрального исчисления и т.п.;

- графически в виде временных диаграмм или графических зависимостей;

- таблично – в виде различных таблиц, отражающих основные функциональные зависимости, например, в виде таблиц булевых функций, автоматных таблиц функций переходов и выходов и т.п.

Функциональная организация реализуется безотносительно к необходимым для этого средствам (элементам), в то время как структурная организация определяется функцией, возлагаемой на систему.



1.3.3. ОБЩИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ

Любым сложным системам присущи общие (фундаментальные) свойства, диктующие необходимость применения системного подхода при их проектировании и исследовании методами математического моделирования. Такими свойствами являются (рисунок 4):

- целостность, означающая, что система рассматривается как единое целое, состоящее из взаимодействующих элементов, возможно неоднородных, но одновременно совместимых;
- связность – наличие существенных устойчивых связей между элементами и/или их свойствами, причем с системных позиций значение имеют не любые, а лишь существенные связи, которые определяют интегративные свойства системы;
- организованность – наличие определенной структурной и функциональной организации, обеспечивающей достижение поставленной цели;
- интегративность – наличие качеств, присущих системе в целом, но не свойственных ни одному из ее элементов в отдельности.

Таким образом, можно сделать следующие важные выводы:

- система не есть простая совокупности элементов;

- расчлняя систему на отдельные части и изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать все свойства и закономерности, присущие системе в целом.



Рисунок 4. Общие свойства систем

С учётом изложенного попытаемся ответить на следующий вопрос: «можно ли персональный компьютер рассматривать как систему, элементами которого являются системный блок и связанные с ним внешние устройства – монитор, принтер и сканер?».

Если воспользоваться определением системы, как совокупности взаимосвязанных элементов, то вроде бы компьютер с внешними устройствами можно считать системой. Однако следует обратить внимание на вторую часть определения понятия «система», где сказано, что элементы, объединенные в одно целое, должны обеспечивать достижение цели, определяемой назначением системы. Это означает, что система, кроме структурной организации в виде совокупности взаимосвязанных элементов, должна обладать и функциональной организацией, то есть в ней должны протекать некоторые процессы во времени, изменяющие состояние системы. С этих позиций неработающий компьютер не может трактоваться как система. В то же время, если в этом компьютере выполняется некоторая задача, его можно рассматривать как систему, обладающую структурной и функциональной организацией. Однако и здесь имеются некоторые нюансы, которые следует учитывать при выявлении соответствия рассматриваемого объекта введенному понятию «система».

Вспомним, что система должна обладать такими фундаментальными свойствами, как целостность, связность, организованность и интегративность. Наличие этих свойств

позволяет рассматривать систему как единое целое и применять для её исследования системный подход. Особенно важным является последнее свойство – интегративность, свидетельствующее о том, что невозможно полностью познать систему, анализируя только свойства её элементов. Другими словами, система может обладать свойствами, которые не присущи ни одному из входящих в её состав элементов.

1.3.4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ

Степень соответствия системы своему назначению называется эффективностью.

Процесс проектирования системы обычно предполагает решение двух взаимосвязанных задач:

- задач анализа, связанных с оценкой эффективности вариантов структурно-функциональной организации системы, задаваемой в виде совокупности показателей эффективности;
- задач синтеза, направленных на построение оптимальных систем или выбор наилучшего варианта структурно-функциональной организации системы в соответствии с выбранным критерием эффективности.

Анализ (от греч. *análisis* — разложение, расчленение) заключается в определении свойств и закономерностей, присущих процессам, протекающим в системе. В процессе анализа на основе сведений о функциях и параметрах элементов, входящих в состав системы, и сведений о структуре системы определяются значения показателей эффективности, описывающие свойства, присущие системе в целом.

При проектировании простых систем задачи анализа иногда решаются на основе декомпозиции (разложения) системы и сводятся к изучению свойств отдельных подсистем и элементов. Полученные результаты распространяются на всю систему. Очевидно, что при этом могут быть потеряны и не учтены некоторые важные свойства, присущие системе в целом и обусловленные наличием такого фундаментального свойства сложных систем, как интегративность, поскольку система может обладать свойствами, не присущими ни одному из элементов.

Синтез (от греч. *synthesis* - соединение, сочетание, составление) системы заключается в определении структурной и

функциональной организации системы, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к эффективности системы. Синтез служит основой для задач проектирования, и направлен на построение системы, удовлетворяющей наилучшим образом заданным требованиям. При этом задача синтеза может решаться как задача выбора наилучшего варианта из нескольких вариантов построения системы, либо как задача построения оптимальной системы в соответствии с выбранным критерием эффективности.

Эффективность систем обычно оценивается набором показателей эффективности.

Показатель эффективности (качества) – мера одного свойства системы. Показатель эффективности всегда имеет количественный смысл.

Показатели эффективности технической системы можно разделить на:

- функциональные, описывающие качество функционирования системы, к которым относятся производительность, оперативность, надежность и т.п.;
- экономические (стоимость системы, затраты на разработку и эксплуатацию и т.д.);
- технологические (трудоемкость разработки и т.п.);
- антропологические (экологичность, безопасность, защищенность и т.п.).

Количество показателей эффективности технических систем во многих случаях может оказаться достаточно большим. Обычно показатели эффективности являются противоречивыми. Это означает, что изменение структурной или функциональной организации системы приводит к улучшению одних показателей и, в то же время, к ухудшению других показателей эффективности, что существенно осложняет выбор наилучшего варианта (способа) структурно-функциональной организации проектируемой системы. Очевидно, что при проектировании системы предпочтительно иметь один показатель эффективности. Такой показатель называется критерием эффективности.

Критерий эффективности является мерой эффективности системы, обобщающей свойства системы в одной оценке – значении критерия эффективности. Если при увеличении эффективности значение критерия возрастает, то критерий называется прямым, если

же значение критерия уменьшается, то критерий называется инверсным.

Критерий эффективности служит для выбора из всех возможных вариантов структурно-функциональной организации системы наилучшего варианта.

Система, которой из всех возможных вариантов построения системы, удовлетворяющих заданным требованиям, соответствует максимальное (минимальное) значение прямого (инверсного) критерия эффективности называется оптимальной системой.

Как сказано выше, для описания системы обычно используется множество зачастую противоречивых показателей эффективности, при этом попытка улучшить какой-то один или несколько показателей эффективности за счет изменения параметров структурно-функциональной организации системы обычно приводит к ухудшению остальных показателей эффективности. Например, если мы хотим построить высокопроизводительную и сверхнадежную вычислительную систему, то, очевидно, что ее стоимость окажется чрезвычайно большой. С другой стороны, если задаться целью – построить как можно более дешевую вычислительную систему, то вряд ли ее производительность и надежность окажутся на должном уровне. Таким образом, для решения задачи оптимального синтеза системы целесообразно иметь одну целевую функцию, то есть один критерий эффективности, позволяющий выбрать из множества вариантов построения системы наилучший, а точнее оптимальный вариант, то есть такой, при котором критерий эффективности принимает максимальное (прямой критерий эффективности) или минимальное (инверсный критерий эффективности) значение. Существует несколько способов построения критерия эффективности при наличии множества показателей эффективности. Это, прежде всего так называемые составные критерии эффективности (аддитивные или мультипликативные), представляющие собой объединение (сумму или произведение) многих показателей эффективности. Однако на практике более широкое распространение получили критерии эффективности с ограничениями, которые строятся по следующему принципу: из множества показателей эффективности один выбирается в качестве критерия эффективности, а на остальные показатели налагаются ограничения.

Следует отметить, что вид критерия эффективности зависит от назначения системы. Если система предназначена для обеспечения высокой надежности, то в качестве критерия эффективности может использоваться один из показателей надежности. Если же система должна иметь высокую производительность, то в качестве критерия эффективности следует использовать показатель производительности системы. Возможна ситуация, когда к проектируемой системе предъявляются требования и высокой производительности, и надежности. Тогда в качестве критерия эффективности можно использовать составной критерий эффективности, объединяющий два показателя эффективности – производительность и надежность.

И еще. В соответствии с изложенным выше должно быть ясно, что оптимальная система существует в единственном экземпляре, для которой значение критерия эффективности имеет максимальное (для прямого критерия) или минимальное (для инверсного критерия) значение. Таким образом, фразы типа «более оптимальная система» или «менее оптимальная система» являются некорректными.

При решении традиционных задач оптимизации обычно используется один критерий эффективности, который формируется одним из вышеуказанных способов в зависимости от цели оптимизации и постановки задачи. В то же время, в литературе часто встречается такое понятие как «многокритериальная задача». Означает ли это, что задача оптимального синтеза может решаться с использованием сразу нескольких критериев эффективности?

Действительно, понятие «многокритериальная задача» достаточно широко используется в такой математической дисциплине как «Исследование операций». Задачи, в которых имеется одна целевая функция (один критерий эффективности), принимающая численные значения, относятся к задачам математического (или оптимального) программирования. Им противостоят задачи с несколькими целевыми функциями или с одной целевой функцией, но принимающей векторные значения или значения ещё более сложной природы. Эти задачи называются многокритериальными и решаются путём сведения к задачам с единственной целевой функцией. Многокритериальными задачами являются задачи теории игр, изучающей формальные модели принятия оптимальных решений в условиях конфликта. При этом

под конфликтом понимается явление, в котором участвуют различные стороны, наделённые различными интересами, выраженными в виде целевых функций (критериев эффективности), и возможностями выбирать доступные для них действия в соответствии с этими интересами. В условиях конфликта стремление противника скрыть свои предстоящие действия порождает неопределённость. Поэтому теория игр рассматривается также как теория принятия оптимальных решений в условиях неопределённости.

Часто в литературных источниках вместо понятия «оптимальная система» используется понятие «рациональная система». Естественно, что возникает вопрос: в чём различие между рациональной и оптимальной системой?

«Оптимальная система» означает, что значения параметров структурно- функциональной организации определены в процессе решения математической оптимизационной задачи и являются оптимальными, то есть обеспечивают экстремум выбранного критерия эффективности. На практике может оказаться невозможным построить систему с такими значениями параметров, что может быть обусловлено разными причинами, в том числе, дискретным характером оптимизируемых параметров.

Например, в процессе синтеза некоторой сети передачи данных получены следующие оптимальные значения пропускных способностей трёх каналов связи: 428 кбит/с, 764 кбит/с и 931 кбит/с. Положим, что реальные каналы связи могут иметь пропускные способности в 256 кбит/с, 512 кбит/с и 1024 кбит/с. Очевидно, что в качестве окончательного решения задачи проектирования будут приняты значения 512 кбит/с, 512 кбит/с (или 1024 кбит/с) и 1024 кбит/с. Поскольку эти значения отличаются от оптимальных, спроектированная система не может считаться оптимальной. Такую систему обычно называют

«рациональной», имея в виду, что ее параметры близки, но не равны оптимальным значениям.

Другой случай, когда в результате оптимизации получено значение пропускной способности канала 2000 кбит/с, которое существенно превышает максимально допустимое значение в 1024 кбит/с. Очевидно, что в этом случае одно из возможных решений

состоит в установке двух каналов с пропускной способностью 1024 кбит/с, что также не будет соответствовать оптимальному варианту.

Иногда под «рациональной системой» подразумевают некоторый вариант её построения, выбранный из нескольких возможных вариантов на основе анализа характеристик функционирования или сравнения значений критерия эффективности. Ясно, что в этом случае вообще речь не идет об оптимизации.

1.3.5. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

Любая система может быть описана совокупностью (рисунок 5):

- параметров, описывающих первичные свойства системы и являющихся исходными данными при решении задач анализа;
- характеристик, описывающих вторичные свойства системы и определяемых в процессе решения задач анализа как функция параметров, то есть являющихся вторичными по отношению к параметрам.

Множество параметров технических систем можно разделить на:

- внутренние, описывающие структурно-функциональную организацию системы, к которым относятся:
 - структурные параметры, описывающие состав и структуру системы;
 - функциональные параметры, описывающие функциональную организацию (режим функционирования) системы.
- внешние, описывающие взаимодействие системы с внешней по отношению к ней средой, к которым относятся:
 - нагрузочные параметры, описывающие входное воздействие на систему, например частоту и объем используемых ресурсов системы;
 - параметры внешней (окружающей) среды, описывающие обычно неуправляемое воздействие внешней среды на систему, например помехи и т.п.

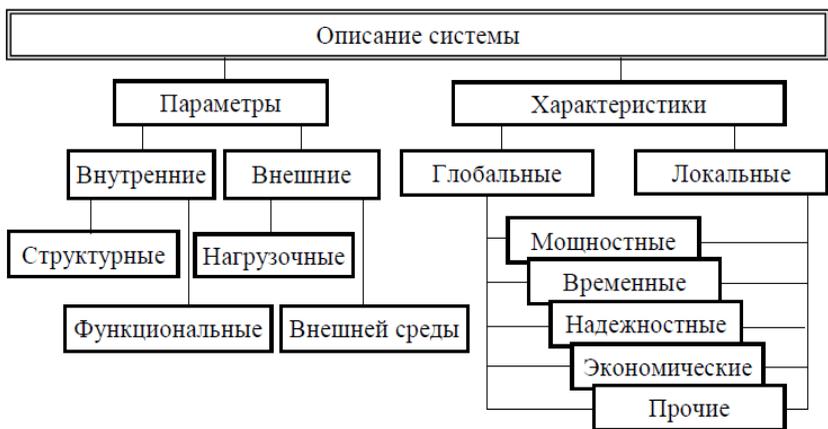


Рисунок 5. Параметры и характеристики

Параметры могут быть:

- детерминированными или случайными;
- управляемыми или неуправляемыми.

Характеристики системы, в отличие от показателей эффективности, могут быть качественными или количественными. Примерами качественных характеристик могут служить:

- функциональность – перечень выполняемых системой функций;
- гибкость – возможность реконфигурирования системы при возникновении специфических ситуаций;
- совместимость – например, возможность использования элементов разных производителей;
- взаимозаменяемость и т.п.

В некоторых случаях качественные характеристики пытаются описать количественно, например функциональность – числом выполняемых системой функций.

И все же, основными при проектировании систем являются количественные характеристики, которые можно объединить в два класса:

- глобальные, описывающие эффективность системы в целом;
- локальные, описывающие качество функционирования отдельных элементов или частей (подсистем) системы.

Глобальные характеристики технических систем можно разбить на следующие группы:

- мощностные (характеристики производительности), описывающие скоростные качества системы, измеряемые, например, количеством задач, выполняемых вычислительной системой за единицу времени, или количеством пакетов, передаваемых в компьютерной сети за единицу времени;
- временные (характеристики оперативности), описывающие временные аспекты функционирования системы, например время выполнения задач в вычислительной системе или время задержки пакетов при передаче в компьютерной сети;
- надежностные (характеристики надежности), описывающие надежность функционирования системы;
- экономические (стоимостные) в виде стоимостных показателей, например, стоимость технических и программных средств вычислительной системы, затраты на эксплуатацию компьютерной сети и т.п.;
- прочие: массогабаритные, энергопотребления, тепловые и т.п.

Параметры можно интерпретировать как входные величины по отношению к системе, а характеристики – как выходные величины, зависящие от параметров и определяемые в процессе анализа системы (рисунок 6).

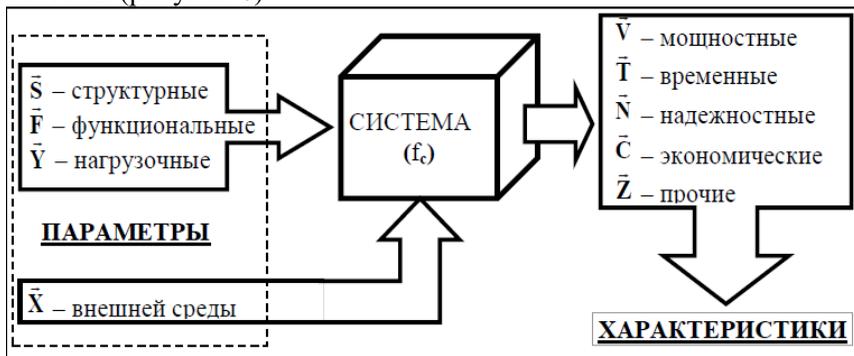


Рисунок 6. Интерпретация параметров и характеристик

В некоторых литературных источниках не делается различия между параметрами и характеристиками. Более того, одни и те же величины могут называться то параметрами, то характеристиками.

Введенные выше определения четко разделяют описывающие систему величины на две группы: «параметры» и «характеристики». Характеристики системы являются функциями параметров, то есть изменение какого-либо параметра приводит к изменению характеристик системы.

В то же время следует помнить, что «параметры» и «характеристики» – понятия относительные. Это можно показать на следующем примере. Если выполняющий некоторые задачи компьютер рассматривается как система, одним из элементов которой является процессор, то производительность (быстродействие) процессора является параметром, изменение которого приведет к изменению такой величины, как время выполнения задачи, которая в данном случае представляет собой характеристику системы. Если же процессор рассматривается как система, состоящая из арифметико-логического устройства, устройства управления, регистровой памяти и т.д., то быстродействие процессора будет являться характеристикой, которая зависит от параметров входящих в ее состав элементов. Можно было бы сказать, что параметры системы в основном описывают элементы системы и их взаимосвязь (как структурную, так и функциональную), а характеристики описывают систему в целом. Однако это будет не совсем корректно, поскольку характеристики могут описывать как систему в целом (глобальные характеристики), так и её отдельные элементы, и подсистемы (локальные характеристики).

Еще одним важным моментом при обсуждении термина «характеристика» является выяснение его отличия от термина «показатель эффективности».

Судя по определениям, термины «показатель эффективности» и «характеристика» – близкие понятия. Можно даже предположить, что это одно и то же. Однако между ними существует определенное различие.

Во-первых, как сказано выше, показатель эффективности всегда имеет количественный смысл, т.е. представляется в виде количественной оценки, в то время как характеристика может быть качественной. Так, например, при описании вычислительных систем и сетей широко используются такие характеристики, как открытость, масштабируемость, гибкость, информационная

безопасность и т.п., количественное задание которых либо достаточно условно, либо вообще невозможно.

Во-вторых, множество показателей эффективности при исследовании некоторой системы зависит от её назначения, в то время как характеристики описывают всю совокупность свойств системы. При этом возможно, что некоторые характеристики являются несущественными. Например, если компьютер предназначен для использования в космосе или на борту самолета, то важными показателями эффективности являются его вес и энергопотребление. Если же компьютер предназначен для решения сложных задач моделирования, оптимизации или игровых задач (например, шахматных), требующих большой вычислительной мощности, то более актуальными становятся такие показатели эффективности как производительность, время реакции, а вес и энергопотребление могут вообще не иметь никакого значения.

Таким образом, совокупность всех характеристик системы полностью описывает все свойства системы, в то время как множество показателей эффективности, являясь подмножеством характеристик, отражает только определённые свойства системы, представляющиеся существенными в процессе конкретных исследований.

1.3.6. ПОНЯТИЕ ПРОЦЕССА

Наличие функциональной организации системы означает, что в ней протекают во времени процессы, изменяющие состояние системы. Так, например, вычислительная система реализует процесс обработки данных, а телекоммуникационная сеть – процесс передачи данных.

Изучение сложных систем удобно проводить в терминах процессов, с которыми связаны такие понятия как «состояние», «переход» и «событие».

Процесс (от лат. *processus* – продвижение) – последовательная смена состояний системы во времени.

Состояние системы задается совокупностью значений переменных, описывающих это состояние. Система находится в некотором состоянии, если она полностью описывается значениями переменных, которые задают это состояние. Система совершает переход из одного состояния в другое, если описывающие ее

переменные изменяются от значений, задающих одно состояние, на значения, которые определяют другое состояние.

Причина, вызывающая переход из состояния в состояние, называется событием.

В качестве иллюстрации этих понятий рассмотрим процесс передачи пакетов в сети передачи данных. Состояние сети будем задавать числом пакетов, находящихся в каждый момент времени в сети. Очевидно, что в этом случае переходы из одного состояния в другое связаны с такими событиями, как поступление пакетов в сеть и завершение передачи пакетов при достижении пункта назначения. Поступление очередного пакета в сеть изменяет состояние (увеличивается значение, описывающее состояние) сети на единицу, а при выходе пакетов из сети – уменьшает состояние на величину, равную числу пакетов, покинувших сеть в рассматриваемый момент времени. Таким образом, в произвольный момент времени сеть передачи данных может находиться в состояниях 0 (в сети нет пакетов), 1 (в сети один пакет), 2 и т.д.

Понятия «система» и «процесс» тесно связаны и часто рассматриваются как эквивалентные понятия, к которым одинаково применимы термины «состояние» и «переход».

1.3.7. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Для унификации разрабатываемых моделей и методов проектирования систем все многообразие существующих и возможных систем и процессов следует разбить на отдельные классы, обладающие близкими свойствами и отображаемые определенными моделями, т.е. выполнить их классификацию. Классификация обычно выполняется на основе существенных признаков, в качестве которых будем использовать (рисунок 7.):

- характер функционирования, т.е. характер протекающих в системе процессов (детерминированный или случайный);
- способ изменения значений величин, описывающих состояния системы или процесса (непрерывный или дискретный);
- режим функционирования системы (установившийся или неуставившийся).

1. В зависимости от характера протекающих в системах процессов, системы (процессы) делятся на:

- детерминированные, поведение которых может быть предсказано заранее, т.е. параметры системы (прежде всего нагрузочные) представляют собой детерминированные величины;

- стохастические (случайные, вероятностные), в которых процессы развиваются в зависимости от ряда случайных факторов, т.е. параметры системы являются случайными.

2. В зависимости от способа изменения значений величин, описывающих состояния, системы и процессы делятся на два класса:

- непрерывные (с непрерывными состояниями), для которых характерен плавный переход из состояния в состояние, обусловленный тем, что величины, описывающие состояние, могут принимать любое значение из некоторого непрерывного интервала (в том числе бесконечного), т.е. являются непрерывными;

- дискретные (с дискретными состояниями), для которых характерен скачкообразный переход из состояния в состояние, обусловленный тем, что величины, описывающие состояния, изменяются скачкообразно и принимают значения, которые могут быть пронумерованы, т.е. являются дискретными, причем число состояний может быть конечным или бесконечным.

3. В зависимости от режима функционирования, системы (процессы) делятся на следующие классы:

- с установившимся (стационарным) режимом (установившийся или стационарный процесс), когда характеристики системы не зависят от времени, т.е. не изменяются со временем;

- с неустановившимся режимом (процесс неустановившийся), когда характеристики системы меняются со временем; неустановившийся режим функционирования системы может быть обусловлен:

- началом работы системы (переходной режим);
- нестационарностью параметров системы (нестационарный режим), заключающейся в изменении параметров системы (в первую очередь нагрузочных) со временем;

- перегрузкой системы (режим перегрузки), когда система не справляется с возложенной на нее нагрузкой.

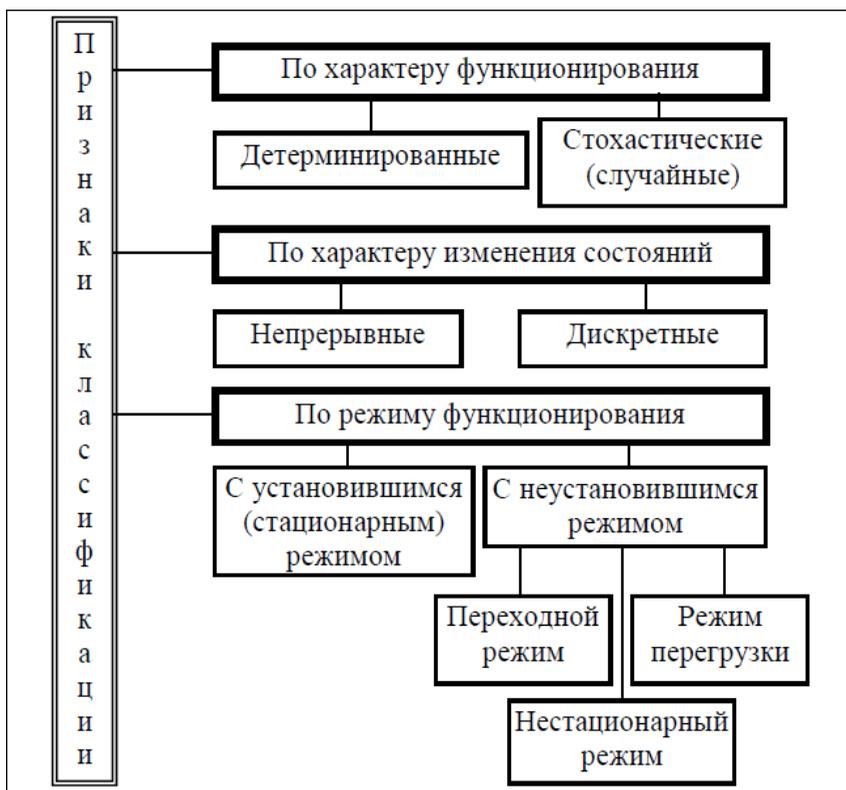


Рисунок 7. Классификация систем и процессов

Большинство исследований технических систем обычно проводится в предположении, что переходной режим завершился, и в системе отсутствуют перегрузки. В противном случае следует использовать специальные методы исследования, которые разрабатываются для переходного режима и режима перегрузок.

Многие реальные системы работают в неустановившемся режиме, обусловленном нестационарностью нагрузки. Для исследования таких систем в некоторых случаях применимы подходы, позволяющие воспользоваться методами, разработанными для установившегося режима. Во-первых, можно попытаться выделить достаточно продолжительные интервалы времени, в течение которых нагрузка не изменяется, т.е. может считаться

стационарной, или же изменение нагрузки незначительно и им можно пренебречь. Во-вторых, исследование, а, следовательно, и проектирование можно проводить методами, разработанными для установившегося режима, в расчете на максимальную или некоторую среднюю нагрузку.

1.4. МОДЕЛЬ КАК СРЕДСТВО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Модель – физический или математический объект, адекватно отображающий исследуемую систему и предназначенный для проведения исследований с целью изучения свойств реальной системы и проектирования новой системы с заданными свойствами.

1.4.1. ТИПЫ МОДЕЛЕЙ

В зависимости от способа представления (описания) и реализации модели делятся (рисунок 8) на:

- концептуальные или содержательные, представляющие собой описание (часто словесное) наиболее существенных особенностей структурно-функциональной организации исследуемой системы, на основе которого разрабатываются физические и математические модели;
- физические или материальные – модели (макеты), эквивалентные или подобные оригиналу, или модели, процесс функционирования которых такой же, как у оригинала, и имеет ту же или возможно другую физическую природу;
- математические или абстрактные, представляющие собой формализованное описание системы с помощью математических зависимостей, отражающих процесс функционирования системы в терминах того или иного математического аппарата;
- программные (алгоритмические, компьютерные), представляющие собой программы для ЭВМ, позволяющие наглядно представить исследуемый объект посредством имитации или графического отображения математических зависимостей, описывающих исследуемую систему.

Соответственно различают физическое, математическое и компьютерное моделирование.

При проектировании и исследовании сложных технических систем в настоящее время наиболее широко применяется математическое моделирование, что, в частности, обусловлено

появлением высокопроизводительных вычислительных систем и специальных программных средств имитационного моделирования и автоматизированного проектирования.

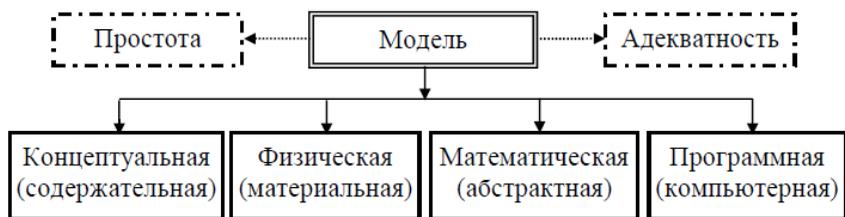


Рисунок 8. Классификация моделей

1.4.2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МОДЕЛИ

Ко всем разрабатываемым математическим моделям, используемым при проектировании систем, предъявляются два противоречивых требования (рисунок 8):

- простота модели;
- адекватность исследуемой системе.

Требование простоты модели обусловлено необходимостью построения модели, которая может быть исследована доступными методами и средствами. Построение сложной модели может привести к невозможности получения конечного результата имеющимися средствами в приемлемые сроки и с требуемой точностью, а также к необходимости использования значительных материальных ресурсов и, как следствие, высокой стоимости проектирования.

Степень сложности (простоты) модели определяется уровнем ее детализации, зависящим от принятых предположений и допущений: чем их больше, тем ниже уровень детализации и, следовательно, проще модель, но в то же время и менее адекватна исследуемой системе.

Адекватность (от лат. *adaequatus* – приравненный, равный) означает соответствие модели оригиналу, характеризуемое степенью близости свойств модели и исследуемой системы.

Адекватность математических моделей зависит от:

- степени полноты и достоверности сведений об исследуемой системе, точности представления параметров структурно-функциональной организации и создаваемой в системе нагрузки;

- уровня детализации модели.

При этом моделирование может проводиться:

- в условиях полной определенности, означающей наличие точной информации обо всех исходных структурно-функциональных и нагрузочных параметрах;
- в условиях неопределенности, обусловленных:
 - неточностью сведений о параметрах;
 - отсутствием сведений о значениях некоторых параметров.

Достижение разумного компромисса между простотой модели и ее адекватностью исследуемой системе является одной из сложнейших проблем проектирования. Действительно, с одной стороны, желательно иметь модель с максимальной степенью детализации, отражающую все особенности структурно-функциональной организации исследуемой системы. С другой стороны, такая модель может оказаться настолько сложной, что ее исследование и использование для целей проектирования будет невозможным или же потребует неоправданно больших материальных и временных ресурсов. Следует также учитывать, что для сложных моделей практически невозможно разработать точные математические методы, а применение громоздких приближенных методов может привести к значительным погрешностям результатов.

Кроме того, расчет сложных моделей всегда связан с построением громоздких математических зависимостей или же может быть выполнен только средствами имитационного моделирования, что делает чрезвычайно проблемным решение задачи оптимального синтеза, а в некоторых случаях вообще невозможным. В этой ситуации представляется целесообразной разработка более простых моделей и методов расчета, которые, возможно даже с некоторой значительной погрешностью, позволят приближенно решить задачу оптимального синтеза. Впоследствии качество такого решения может быть оценено с использованием адекватной имитационной модели, построенной с высокой степенью детализации. При этом значительно сокращается трудоемкость поиска наилучшего (в идеальном случае – оптимального) решения задачи синтеза за счет существенного уменьшения возможных вариантов структурно-функциональной организации проектируемой системы.

При разработке моделей следует также учитывать точность представления исходных данных, особенно нагрузочных параметров, которые чаще всего неизвестны, либо заданы ориентировочно. Если погрешность представления нагрузочных или структурно-функциональных параметров велика, то, очевидно, нет смысла строить сверхточную модель.

Погрешность результатов моделирования Δ_{Σ} , определяющая качество спроектированной системы, складывается из следующих составляющих (рисунок 9):

- модельная погрешность, зависящая от степени детализации (неадекватности) разработанной модели – $\Delta_{\text{мод}}$;
- методическая погрешность, т.е. погрешность метода, используемого для получения результатов – $\Delta_{\text{мет}}$;
- трансформированная погрешность, обусловленная погрешностью (неточностью) представления исходных данных, преобразуемой (трансформируемой) в процессе расчета в погрешность результатов – $\Delta_{\text{т}}$;
- арифметическая погрешность, связанная с погрешностью округления при проведении расчетов (например, из-за ограниченной длины разрядной сетки компьютера), которая увеличивается с ростом объема вычислений – $\Delta_{\text{а}}$.

Таким образом, суммарная погрешность, вносимая в разрабатываемый проект, равна $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мод}} + \Delta_{\text{мет}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{а}}$.

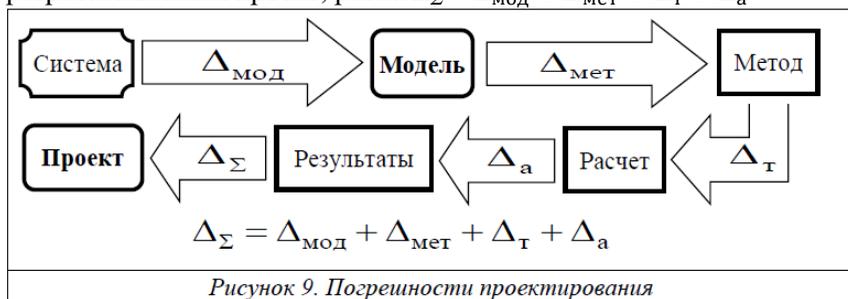


Рисунок 9. Погрешности проектирования

С увеличением сложности (адекватности) модели модельная погрешность уменьшается, но при этом растут методическая (из-за применения приближенных методов расчета) и арифметическая (из-за увеличения объема вычислений) погрешности, как это показано на рисунке 10. При этом достаточно сложно оценить, как меняется

трансформированная погрешность. Положим, что она изменяется незначительно. Тогда, как видно из представленного графика (рисунок 10), можно говорить о существовании оптимального уровня детализации модели, при котором суммарная погрешность минимальна и достигается компромисс между требованиями адекватности и простоты модели. Определение оптимального уровня детализации модели – сложнейшая задача, от решения которой в значительной степени зависит качество спроектированной системы, и которая требует большого опыта и высокой квалификации разработчика.

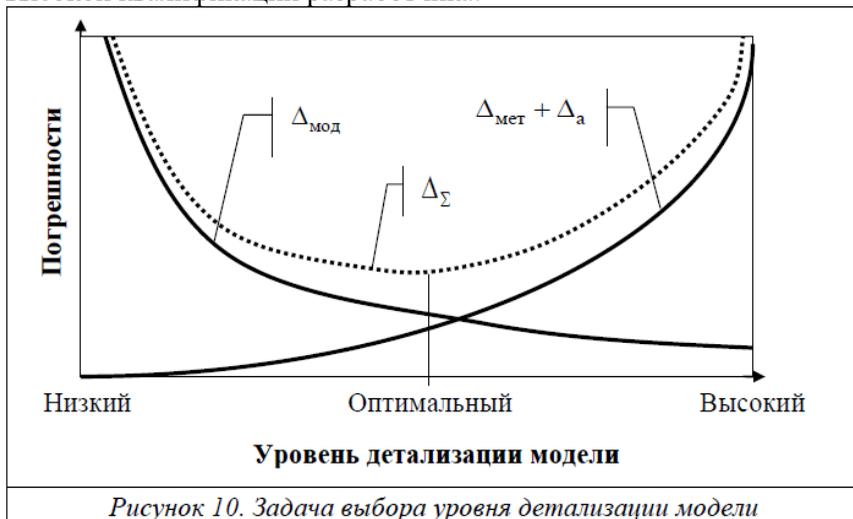


Рисунок 10. Задача выбора уровня детализации модели

1.4.3. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Проектирование сложных технических систем с использованием математических моделей, которые разрабатываются на основе концептуальной модели, позволяют получать конкретные значения параметров проектируемой системы, обеспечивающие требуемое качество их функционирования.

Многообразие систем, проявляющееся в многообразии их структурно-функциональной организации, определяет использование множества разных математических моделей в зависимости от особенностей, присущих исследуемой системе.

Некоторые из этих особенностей положены в основу классификации математических моделей, представленной на рисунке 11.

1. По назначению различают модели:

- структурные (статические), предназначенные для отображения и исследования структурных особенностей системы;
- функциональные (динамические), предназначенные для исследования процессов функционирования системы во времени;
- структурно-функциональные, предназначенные для исследования структурно-функциональных особенностей системы.

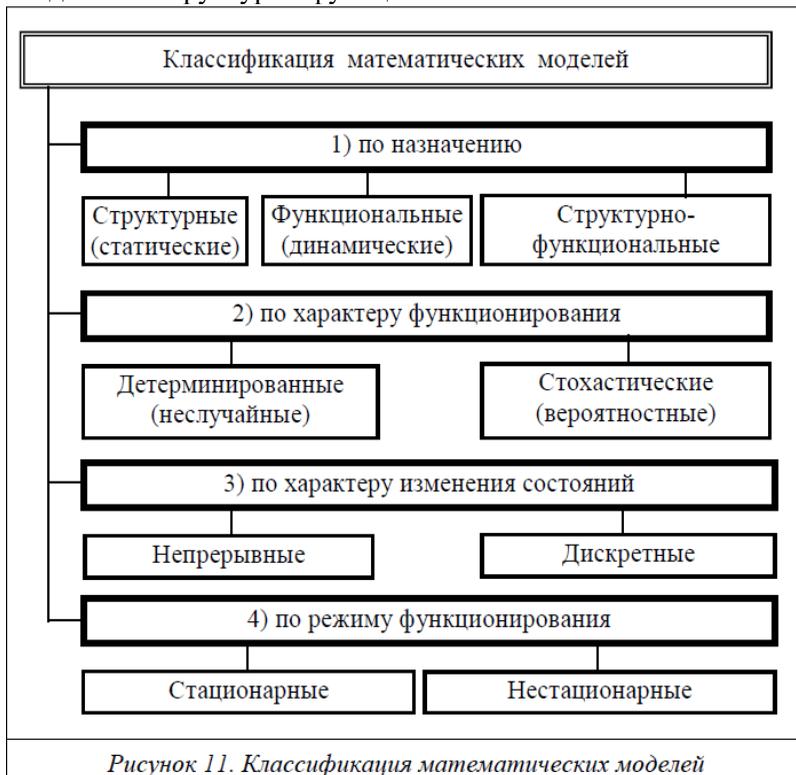


Рисунок 11. Классификация математических моделей

2. В зависимости от характера функционирования исследуемой системы могут использоваться модели:

- детерминированные, параметры которых, а, следовательно, и характеристики, представляют собой детерминированные величины;

- стохастические или вероятностные, параметры и характеристики которых представляют собой случайные величины.

3. в зависимости от характера протекающих в исследуемой системе процессов могут использоваться модели:

- непрерывные, отображающие непрерывные во времени процессы;

- дискретные, отображающие дискретные процессы, изменяющие свое состояние скачкообразно в дискретные моменты времени.

4. в зависимости от режима функционирования системы могут использоваться:

- стационарные модели, в которых характеристики функционирования, называемые стационарными, инвариантны ко времени;

- нестационарные модели, отображающие изменение характеристик функционирования со временем.

Между классами систем и моделей не всегда существует однозначное соответствие, например дискретные системы могут быть представлены непрерывными моделями, а детерминированные системы – вероятностными моделями, и наоборот.

1.4.4. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ

Теоретические исследования сложных систем базируются на использовании моделей, отображающих объект исследования в форме, необходимой и достаточной для получения результатов, составляющих цель исследований.

Модель, как и соответствующая ей система, описывается совокупностью величин, которые могут быть разбиты на параметры и характеристики. Состав параметров и характеристик модели определяется составом параметров и характеристик исследуемой системы и может, в идеальном случае, совпадать с ним. В общем же случае составы параметров и характеристик модели и системы различаются, т.к. для модели они формулируются в терминах математического аппарата, который используется при ее построении, а для системы – в терминах соответствующей прикладной области, к которой принадлежит система. В связи с тем, что, в общем случае, параметры и характеристики системы и модели

различаются, их принято называть соответственно системными и модельными.

Поскольку состав и номенклатура системных и модельных параметров и характеристик, в общем случае, различны, возникает необходимость установления однозначного соответствия между значениями системных и модельных параметров и характеристик, которое выполняется на этапе параметризации модели.

Этап параметризации модели в процессе исследования реальной системы оказывает существенное влияние на результаты и, в целом, на качество проектирования. На этом этапе закладывается фундамент адекватности модели исследуемой системе, поскольку именно в процессе параметризации определяются значения исходных параметров, которые будут использованы в модели и обеспечат достоверность получаемых результатов. Ошибки, заложенные при неудачной параметризации, не смогут быть компенсированы даже применением сверхточной (адекватной) модели и точных методов расчета. Более того, ошибки параметризации могут многократно увеличиться и привести к получению абсолютно неправильных значений исследуемых характеристик и, следовательно, к получению некачественного проекта разрабатываемой системы.

Следует также отметить, что на этапе параметризации устанавливается соответствие не только между значениями системных и модельных параметров и характеристик, но и терминологическое соответствие между заданными в терминах конкретной прикладной области понятиями и элементами исследуемой системы и используемыми в соответствующей математической дисциплине понятиями и элементами математической модели. Например, в вычислительной технике при описании компьютера применяются такие понятия и элементы, как задача, программа, данные, процессор, память и т.д. Положим, что в качестве математической модели компьютера используется случайный процесс, для описания которого в теории случайных процессов применяются такие термины и элементы, как состояние, переход, событие, граф переходов, матрица вероятностей переходов и т.д. Выявление и установление соответствия между указанными понятиями и элементами и является одной из задач этапа параметризации.

Фактически, параметризация – это промежуточный этап установления взаимно-однозначного соответствия между концептуальной и математической моделями.

2. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование любой системы обычно является многоэтапным и на первых этапах предполагает всестороннее исследование её свойств с применением математических моделей. При этом процесс проектирования, в общем случае, является многошаговым и итерационным (рисунок 12), что проявляется в последовательном улучшении проекта системы на каждом шаге.

В процессе выявления и изучения свойств системы, в общем случае, необходимо решать следующие типовые задачи (рисунок 12):

- разработка математической модели;
- разработка метода исследования;
- анализ свойств системы и формирование рекомендаций для проектирования;
- синтез системы и разработка проекта;
- детальный анализ спроектированной системы.

2.1.1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Разработка математической модели состоит в выборе конкретного математического аппарата, в терминах которого формулируется модель, и построении модели или совокупности моделей исследуемой системы, отображающих возможные варианты структурно-функциональной организации системы. В процессе разработки модели необходимо определить состав и перечень параметров и характеристик модели в терминах выбранного математического аппарата, и установить их взаимосвязь с параметрами и характеристиками исследуемой системы, то есть выполнить параметризацию модели.

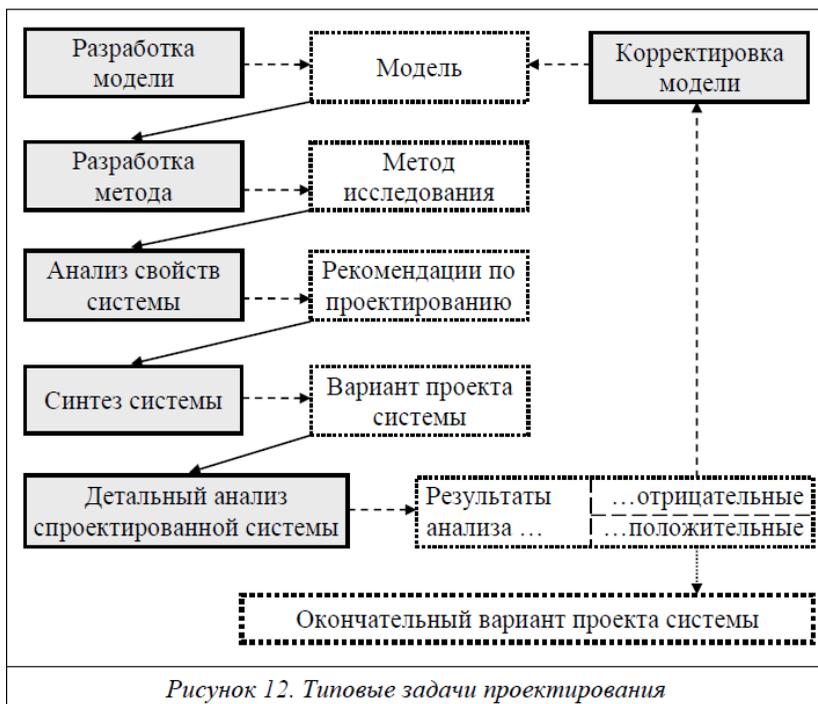


Рисунок 12. Типовые задачи проектирования

2.1.2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка метода исследования, прежде всего, предполагает получение ответа на вопрос: аналитический или имитационный подход будет использоваться для решения задач проектирования – анализа свойств и синтеза системы, удовлетворяющей заданным требованиям к качеству функционирования.

Если в процессе проектирования решается задача выбора варианта построения системы из нескольких возможных, то предпочтение может быть отдано методам имитационного моделирования. Если же проектирование направлено на разработку наилучшей системы в соответствии с заданным (выбранным) критерием эффективности, т.е. решается задача оптимального синтеза, то более предпочтительными являются методы аналитического моделирования, позволяющие получить математические зависимости характеристик функционирования системы от параметров структурно- функциональной организации и нагрузки. При этом, в зависимости от сложности модели, может

быть выбран некоторый существующий метод расчета характеристик функционирования подобных систем, либо может возникнуть необходимость разработки новых аналитических методов исследования.

2.1.3. АНАЛИЗ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ

Анализ характеристик системы с использованием разработанной модели заключается в выявлении свойств и закономерностей, присущих процессам, протекающим в системах с различной структурно-функциональной организацией, и выработке рекомендаций для решения основной задачи системного проектирования – задачи синтеза. В процессе анализа строятся графические зависимости характеристик функционирования системы от параметров и выявляются наиболее существенные факторы, влияющие на качество функционирования системы.

2.1.4. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА

Синтез системы заключается в определении параметров, удовлетворяющих заданным требованиям к качеству функционирования системы, задаваемым в виде ограничений, налагаемых на значения основных характеристик системы. Состав основных характеристик формируется в зависимости от назначения проектируемой системы. Например, если проектируемая система должна обладать высокой надежностью, в качестве основных характеристик может использоваться вероятность безотказной работы, а при проектировании высокоскоростной системы – ее производительность.

Решение задачи синтеза связано с определением зависимостей характеристик функционирования системы от параметров, которые представляются сложными математическими конструкциями. При этом возможность получения приемлемых результатов в процессе решения задач синтеза из-за их сложности и большой трудоемкости, с учетом специфических особенностей реальных систем, превосходит возможности математических методов оптимизации, и задача синтеза в общем виде оказывается математически неразрешимой.

Понятия «синтез» и «проектирование» – достаточно близкие по смыслу и часто используются как синонимы. В то же время между

ними существует различие, вытекающее, прежде всего, из их иностранного происхождения.

Термин «синтез», означающий соединение различных элементов в единое целое – систему, неразрывно связан с термином «анализ».

Термин «проектирование» означает процесс создания проекта – прототипа новой системы.

В процессе проектирования технических систем основная задача заключается в создании проекта – комплекта документов, на основе которого строится реальная система, а в процессе синтеза – только определяются параметры и состав проектируемой системы, которые в окончательном проекте могут значительно отличаться от «синтезированных». Таким образом, синтез можно рассматривать как один (может быть даже основной) из этапов проектирования реальных систем.

Можно также считать, что «синтез» – понятие математическое, которое часто используется в таком сочетании как «оптимальный синтез», а «проектирование» – понятие скорее техническое и не всегда предполагает применение каких-то математических методов для построения системы. Другими словами, синтез технических систем реализуется с использованием математических методов моделирования, в то время как проектирование прежде всего, ориентировано на применение различных инженерно-технических решений, обоснование которых может осуществляться математическими расчетами.

2.1.5. ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПРОЕКТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Детальный анализ спроектированной системы проводится с целью оценки качества решения задачи проектирования и корректности полученных в процессе синтеза параметров системы, а также выявления предельных возможностей системы, узких мест в системе и т.д.

Поскольку задача синтеза обычно решается на моделях, использующих упрощающие решение предположения и допущения, анализ спроектированной системы, выполняемый с целью определения фактической эффективности спроектированной системы, обычно проводится на основе более детальных моделей, в

качестве которых чаще всего используются имитационные или комбинированные аналитико-имитационные модели.

2.1.6. КОРРЕКТИРОВКА МОДЕЛИ

Если в процессе детального анализа спроектированной системы будет установлено, что рассматриваемый вариант проекта не удовлетворяет заданным требованиям в отношении характеристик функционирования, необходимо скорректировать модель, которая использовалась для оптимального синтеза и выполнить повторно перечисленные выше задачи. Такая процедура может быть реализована несколько раз до тех пор, пока не будет достигнут требуемый результат.

Корректировка модели и повторное решение задач анализа и синтеза может не потребоваться в тех случаях, когда значения характеристик спроектированной системы незначительно отличаются от заданных значений. Вполне возможно, что для удовлетворения заданных ограничений достаточно внести незначительные изменения в рассматриваемый вариант проекта.

Для того чтобы снизить сложность перечисленных задач, проектирование разделяют на последовательность этапов, на каждом из которых решаются частные задачи проектирования – определяются параметры, связанные с отдельными аспектами организации системы, с использованием тех или иных моделей.

2.2. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование и исследование систем обычно проводится на количественном уровне с использованием методов математического моделирования, которые можно разбить на две группы (рисунок 13):

- аналитические (аппарат теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории случайных процессов, методы оптимизации, ...);
- статистические или имитационные, основанные на проведении численных экспериментов с применением специальных программных средств и языков моделирования.

На практике проектирование реальных систем обычно реализуется на основе комбинированного подхода, предполагающего совместное применение аналитических и имитационных методов.

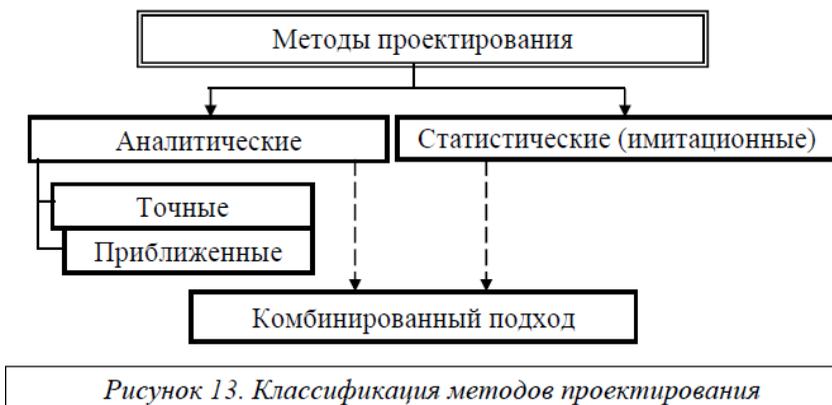


Рисунок 13. Классификация методов проектирования

2.2.1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Аналитические методы состоят в построении математических зависимостей, в явном виде отражающих взаимосвязь характеристик функционирования системы от структурно-функциональных и нагрузочных параметров. На их основе строятся графические зависимости, позволяющие наглядно проиллюстрировать влияние параметров на характеристики функционирования системы и выявить наиболее существенные свойства исследуемой системы. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации для проектирования, направленные на уменьшение количества возможных вариантов построения новой системы.

Достоинство аналитических методов заключается в возможности получения решения в явной аналитической форме, позволяющей проводить детальный анализ процессов, протекающих в исследуемой системе, в широком диапазоне изменения параметров системы. Результаты в аналитической форме являются основой для решения задачи выбора оптимального варианта структурно-функциональной организации системы на этапе синтеза.

Недостаток аналитических методов – использование целого ряда допущений и предположений в процессе построения математической модели и невозможность, в некоторых случаях, получить решение в явном виде из-за неразрешимости уравнений в аналитической форме, отсутствия первообразных для

подынтегральных функций и т.п. В этих случаях используются численные методы анализа.

Аналитические методы делятся на:

- точные, которые разработаны в основном для простых моделей;
- приближенные, к которым относятся также граничные оценки (верхние и нижние), полученные, например, эвристически или на основе множества имитационных экспериментов.

Таким образом, аналитические методы обычно применяются в следующих случаях:

- для выполнения оценочных расчетов на этапе предварительного анализа и проектирования, не требующих высокой точности получаемых результатов;
- для изучения в широком диапазоне изменения параметров свойств и закономерностей, присущих исследуемой системе; полученные результаты могут служить основой для формирования рекомендаций по проектированию систем;
- для решения задач оптимального синтеза при проектировании новых систем.

2.2.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ (ИМИТАЦИОННЫЕ) МЕТОДЫ

В тех случаях, когда анализ математической модели аналитическими методами может оказаться невозможным или нерезультативным из-за чрезмерной трудоемкости или неустойчивости алгоритмов в отношении погрешностей аппроксимации и округления, строится имитационная модель, в которой процессы, протекающие в системе, описываются как последовательности операций над числами, представляющими значения входов и выходов соответствующих элементов. Имитационные методы реализуются на ЭВМ в виде имитационной модели, объединяющей свойства отдельных элементов в единую систему. Производя вычисления, порождаемые имитационной моделью, можно на основе свойств отдельных элементов определить свойства всей системы, описываемые соответствующими показателями эффективности системы.

При построении имитационных моделей широко используется метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Процедура построения и анализа имитационных моделей методом

статистических испытаний называется статистическим моделированием. Статистическое моделирование представляет собой процесс получения статистических данных о свойствах моделируемой системы.

Основное достоинство имитационного моделирования заключается в универсальности, т.е. в возможности исследования теоретически систем любой сложности с любой степенью детализации. Применительно к моделированию систем со стохастическим характером функционирования эта универсальность проявляется в возможности исследования свойств систем при любых законах распределения случайных величин, описывающих нагрузку.

Единственным фактором, ограничивающим применение имитационного моделирования, является производительность компьютера, на котором выполняются имитационные эксперименты. Естественно, чем сложнее исследуемая система, чем больше в ней элементов и связей, тем более мощный требуется компьютер, в пределе возможно даже супер-эвм. При этом мощность компьютера подразумевает не только скорость процессорной обработки, но и большую ёмкость оперативной памяти, а в некоторых случаях – высокие требования к производительности и ёмкости внешней памяти.

В то же время, имитационное моделирование обладает недостатками, ограничивающими его применение. Одним из них является частный характер результатов, не раскрывающий зависимостей характеристик функционирования системы от параметров её структурно-функциональной организации, а лишь определяющий ее в отдельных точках.

Кроме того, имитационное моделирование может служить эффективным инструментом в процессе проектирования только в том случае, если требуется сравнить несколько вариантов построения системы и выбрать из них наилучший. Однако, оказывается практически невозможным (либо это сопряжено с большими временными и материальными затратами) решение задачи оптимального синтеза сложных систем, характеризующихся большой размерностью, то есть наличием большого числа структурно-функциональных и нагрузочных параметров.

Имитационное моделирование обычно используется:

- для установления адекватности аналитических моделей в том случае, если отсутствует возможность сравнения аналитических результатов с результатами измерений на реальной системе;
- для оценки погрешностей приближенных аналитических методов;
- для выбора наилучшего варианта построения (структурно-функциональной организации) системы из нескольких возможных вариантов;
- для детального анализа спроектированной системы.

2.2.3. КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД

При исследовании и проектировании сложных систем со стохастическим характером функционирования наиболее универсальным является комбинированный подход, предполагающий совместное применение аналитических и имитационных методов.

С использованием аналитических методов могут решаться задачи проектирования, связанные с формированием требований к структурным и функциональным параметрам, обеспечивающим заданное качество функционирования проектируемой системы, однако получаемые при этом результаты могут иметь значительную погрешность. Для повышения достоверности приближенных аналитических результатов, полученных в процессе анализа, следует воспользоваться имитационным моделированием, позволяющим оценить погрешности приближенных аналитических зависимостей, а также выявить свойства системы, которые не могли быть получены аналитическими методами, например, свойства системы в случае переходного режима или режима перегрузок.

Аналитические методы позволяют эффективно решать задачу синтеза оптимальной системы. Однако результаты оптимизации из-за применения приближенных аналитических зависимостей могут существенно отличаться от истинных значений. Уточнение результатов оптимизации выполняется на этапе детального анализа спроектированной системы с использованием имитационного моделирования, позволяющего выполнять исследование систем практически любой сложности и с любой степенью детализации.

2.3. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ

Проектирование систем на системном уровне базируется на принципах, обеспечивающих корректность и достоверность результатов исследований, полученных с использованием математических моделей, и, в конечном счете, качественное проектирование систем. Такими принципами являются:

- 1) системный подход при решении задач анализа и синтеза;
- 2) принцип иерархического многоуровневого моделирования;
- 3) принцип множественности моделей.

2.3.1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В основе исследования сложных систем с использованием математического моделирования лежит системный подход, конечной целью которого является системное проектирование, направленное на построение системы с заданным качеством.

Системный подход предполагает, что с учетом свойства интегративности, присущего сложным системам, проектируемая система должна рассматриваться как единое целое. При этом ее проектирование не должно сводиться к независимому проектированию отдельных элементов без учета их взаимосвязи. Это приводит к необходимости применения достаточно больших и сложных моделей, отображающих в целом структурно-функциональную организацию исследуемой системы и протекающие в ней процессы. Соответственно и методы расчета таких моделей являются достаточно сложными и громоздкими и могут быть эффективно реализованы только с применением компьютеров.

Системный подход предполагает решение двух взаимосвязанных задач:

- задачу системного анализа;
- задачу системного проектирования.

В процессе системного проектирования необходимо, исходя из сведений о назначении системы и требований, предъявляемых к качеству ее функционирования, определить структурную и/или функциональную организацию, обеспечивающую реализацию заданных функций. Для этого необходимо располагать знаниями о том, как влияют различные способы структурной и функциональной

организации на характеристики функционирования системы, т.е. решать задачи системного анализа.

Системное проектирование сложных технических систем, например, вычислительных систем и сетей, называется системотехническим проектированием.

В общем виде проблема системотехнического проектирования может формулироваться следующим образом.

Задано назначение системы, определяемое:

- перечнем функций, возлагаемых на систему;
- перечнем и значениями нагрузочных параметров, описывающих взаимодействие системы с внешней средой и потребность в ресурсах системы для реализации заданных функций;
- требованиями к характеристикам системы (мощностным, временным, надежностным, экономическим), которые задаются их предельно допустимыми значениями.

Требуется определить:

- структурную организацию системы, т.е. номенклатуру и состав элементов, а также конфигурацию (топологию) связей между ними;
- функциональную организацию системы, то есть режим функционирования системы, обеспечивающий выполнение заданных ограничений и максимизирующий (минимизирующий) прямой (инверсный) критерий эффективности.

Кроме представленной выше формулировки, системное проектирование может быть направлено на решение частных задач, а именно:

- определение структурной организации системы при заданных параметрах функциональной организации и нагрузки (структурное проектирование);
- определение функциональной организации при заданных параметрах структурной организации и нагрузки (функциональное проектирование);
- определение предельной нагрузки, которая может быть реализована системой с заданной структурно-функциональной организацией (нагрузочное проектирование).

2.3.2. ПРИНЦИП ИЕРАРХИЧЕСКОГО МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Качество проектирования системы в значительной мере определяется степенью адекватности математической модели реальной системе, которая достигается за счет использования моделей с разным уровнем детализации, зависящим от особенностей структурно-функциональной организации системы и целей исследования.

Процессы функционирования большинства реальных систем во временном и надежностном аспектах описываются, в общем случае, на основе вероятностного подхода в терминах теории вероятностей с использованием аппарата теории случайных процессов и теории массового обслуживания.

Математические модели позволяют прогнозировать эффект, достигаемый при изменении структурно-функциональных параметров системы и параметров нагрузки.

Процессы функционирования реальных систем практически невозможно описать полно и детально, что обусловлено существенной сложностью таких систем. Основная проблема при разработке модели состоит в нахождении компромисса между простотой ее описания, что является одной из предпосылок понимания и возможности ее исследования аналитическими методами, и необходимостью учета многочисленных особенностей, присущих реальным системам.

Попытка построить единую универсальную модель реальной системы, несомненно, обречена на неудачу ввиду ее необозримости и невозможности расчета. Поэтому проектирование реальных систем целесообразно проводить на основе принципа иерархического многоуровневого моделирования, базирующегося на иерархическом описании исследуемой системы и протекающих в ней процессов.

Принцип иерархического многоуровневого моделирования (ИММ) состоит в следующем. Система и протекающие в ней процессы представляются семейством моделей, каждая из которых описывает поведение системы с точки зрения различных уровней абстрагирования, отличающихся рядом характерных особенностей и параметров, с помощью которых и описывается поведение системы.

Применительно к моделям сложных технических систем можно выделить два направления иерархии (рисунок 14):

- иерархия по вертикали, в которой деление моделей по уровням осуществляется в зависимости от структурно-функциональных особенностей системы;
- иерархия по горизонтали, в которой деление моделей по уровням осуществляется в зависимости от методов их исследования.

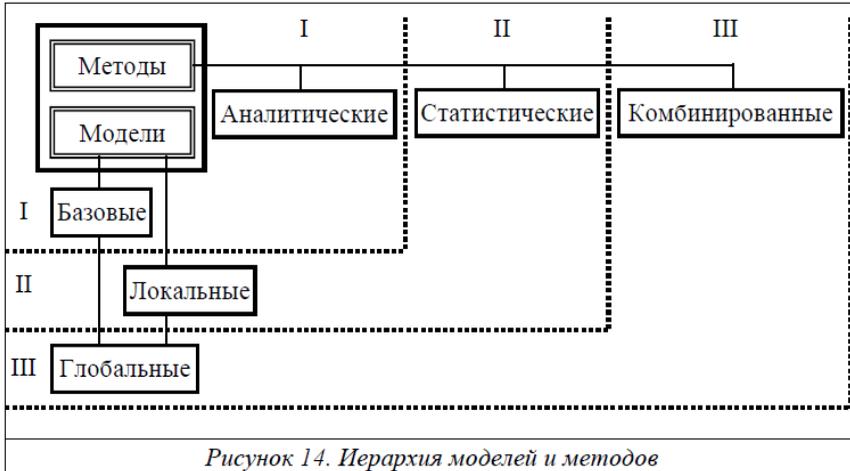


Рисунок 14. Иерархия моделей и методов

В иерархии по вертикали, в общем случае, можно выделить три уровня моделей (рисунок 14):

- уровень базовых моделей (I), представляющих собой простейшие модели, отображающие конкретные специфические особенности структурной или функциональной организации отдельных элементов системы; результаты, полученные на базовых моделях, могут служить основой для разработки и построения более сложных моделей второго и третьего уровней;
- уровень локальных моделей (II), отображающих отдельные аспекты структурно-функциональной организации подсистем или системы в целом и позволяющих решать частные задачи анализа и синтеза;
- уровень глобальных моделей (III), наиболее полно отображающих структурные и функциональные особенности организации системы и представляющих собой модели с высокой степенью детализации.

Глобальные модели строятся на основе результатов, полученных на базовых и локальных моделях.

Иерархия по горизонтали может включать несколько уровней моделей в зависимости от методов их исследования, например:

- модели, поддающиеся расчету аналитическими методами (уровень I);
- модели, требующие применения статистических методов расчета, основанных на имитационном моделировании (уровень II);
- модели, использующие комбинированные методы расчета (уровень III).

В некоторых случаях уровень моделей, поддающихся расчету аналитическими методами, целесообразно представить в виде двух разных уровней: уровень моделей, поддающихся точному аналитическому расчету, и уровень моделей, поддающихся приближенному аналитическому расчету с приемлемой для инженерных применений точностью, причем результаты могут быть получены либо в явном виде, либо в виде границ (верхней и нижней).

Базовые модели допускают применение точных и приближенных аналитических методов и позволяют получить результат в явном виде. Локальные модели, кроме этого, обычно предполагают применение имитационных методов, а глобальные – наряду с перечисленными методами моделирования, могут использовать комбинированные аналитико-имитационные методы.

Для решения задач проектирования сложных систем обычно применяются модели, поддающиеся точному или приближенному аналитическому расчету. Имитационное моделирование используется для аттестации приближенных методов и детального изучения свойств и закономерностей на моделях большой сложности с целью разработки на основе полученных результатов приближенных и эвристических методов расчета.

Взаимодействие моделей различных уровней иерархии осуществляется путем пересчета характеристик, полученных на одном уровне, в параметры модели, используемой на другом (соседнем) уровне. На каждом уровне может использоваться множество различных моделей. Состав моделей каждого уровня зависит от структурно-функциональной организации системы и

целей исследования. Последнее также определяет степень детализации моделей одного и того же уровня.

Реализация принципа ИММ базируется на методе структурно-функциональной декомпозиции проектируемой системы, направленном на выделение и исследование наиболее существенных аспектов структурно- функциональной организации системы.

Структурно-функциональная декомпозиция системы позволяет на разных этапах исследования использовать модели разных уровней:

- на этапе функционального проектирования – базовые модели;
- на этапе структурного проектирования – локальные модели;
- на завершающем этапе структурно-функционального проектирования – глобальные модели.

Такой подход позволяет упростить решение задач системотехнического проектирования, характеризующихся значительной сложностью ввиду большой размерности и громоздкости результатов.

2.3.3. ПРИНЦИП МНОЖЕСТВЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ

Как было сказано выше, математические модели, используемые при проектировании систем, являются абстрактными, что обусловлено переходом от параметров и характеристик реальной системы к её описанию в терминах определённого математического аппарата. В процессе анализа характеристик и исследования свойств математической модели полученные результаты интерпретируются применительно к реальной системе. Абстрактность математической модели состоит в том, что полученные с её помощью результаты могут быть применены к другой реальной системе, которая может быть представлена такой же моделью. Другими словами, одна и та же математическая модель может отображать функционирование совершенно разных по своей природе реальных систем, описываемых с помощью различных структурно-функциональных и нагрузочных параметров, состав и перечень которых диктуется соответствующей прикладной областью. Эта особенность абстрактных моделей лежит в основе принципа множественности моделей, который заключается в следующем. С одной стороны,

процессы функционирования различных систем могут быть представлены с помощью одной и той же модели, а, с другой стороны, одна и та же система может быть представлена множеством различных моделей в зависимости от целей исследования. Использование этого принципа позволяет отказаться от подхода, когда для каждой исследуемой системы разрабатывается своя модель, и предложить подход, при котором разрабатываются абстрактные математические модели разного уровня (в основном базовые и локальные), используемые для исследования систем различных классов. При этом одной из важных задач становится задача грамотной параметризации моделей и интерпретации полученных результатов.

2.4. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ

Проектирование реальных систем на основе математических моделей в общем случае предполагает выполнение следующих этапов:

- формулировка целей проектирования и требований к разрабатываемой системе;
- разработка концептуальной модели исследуемой системы;
- разработка и параметризация математических моделей системы;
- выбор или разработка методов и средств проектирования;
- проверка адекватности модели (верификация модели);
- проведение экспериментов на модели и анализ характеристик системы;
- решение задачи синтеза;
- детальный анализ спроектированной системы.

2.4.1. ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТРЕБОВАНИЙ К РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЕ

На этом этапе решаются следующие задачи:

- определяются возможные способы структурно-функциональной организации и условия функционирования проектируемой системы;
- формулируются задачи анализа и/или синтеза, которые должны быть решены в процессе проектирования;

- конкретизируются наиболее важные характеристики, подлежащие исследованию, и формы представления результатов проектирования;
- определяется состав показателей эффективности и формулируются требования к качеству функционирования в виде ограничений, налагаемых на характеристики системы;
- определяются требования к точности получения результатов и форма их представления.

Этап формулировки целей проектирования и требований к разрабатываемой системе существенно влияет на все последующие этапы.

2.4.2. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

В процессе построения концептуальной модели выявляются причинно- следственные связи, присущие исследуемой системе и существенные для достижения целей проектирования.

Основное назначение концептуальной модели – выявление наиболее существенных аспектов структурно-функциональной организации системы, учет которых необходим для получения требуемых результатов. В концептуальной модели обычно в словесной форме приводятся сведения о природе и параметрах элементарных явлений проектируемой системы, о виде и степени взаимодействия между ними, о месте и значении каждого элементарного явления в общем процессе функционирования системы.

Построение концептуальной модели и ее формализация предполагает выполнение следующих этапов:

- 1) постановка задачи моделирования, включающая:
 - формулировку целей и обоснование необходимости моделирования;
 - определение номенклатуры показателей эффективности в зависимости от целей моделирования;
 - оценку размерности задачи и определение возможности ее разбиения на подзадачи;
 - формирование требований к составу исходных параметров для проведения моделирования;

- выдвижение гипотез и принятие предположений и допущений;

2) определение исходных параметров и их описание, включающее:

- выбор наименований и обозначений параметров;
- выбор единиц измерения параметров;
- установка диапазонов изменения параметров;

3) формирование критерия эффективности, предполагающее построение обобщенного показателя эффективности на основе множества частных, зачастую противоречивых, показателей с использованием одного из следующих подходов:

- построение составного критерия эффективности в виде аддитивного F1 или мультипликативного F2 функционала

$$F_1 = \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i; \quad F_2 = \frac{\prod_{i=1}^n x_i}{\prod_{i=n+1}^N x_i},$$

где x_1, \dots, x_N – частные показатели эффективности; α_i – весовой коэффициент показателя x_i ;

- выбор в качестве критерия эффективности F одного частного показателя при ограничениях, налагаемых на остальные показатели эффективности:

$F = x_k$ при ограничениях $x_i \leq x_i^*$ или $x_i \geq x_i^*$ для всех $i \neq k$;

4) описание концептуальной модели системы, предполагающее:

- словесное описание и выявление особенностей структурно-функциональной организации проектируемой системы в терминах и понятиях реальной системы;

- описание модели с использованием типовых математических схем, временных диаграмм или в виде блок-схем алгоритмов;

- окончательное принятие гипотез, предположений и допущений;

5) проверка достоверности концептуальной модели, включающая:

- проверку логики построения и описания модели;
- оценку достоверности исходных данных;
- анализ принятых предположений и допущений.

2.4.3. РАЗРАБОТКА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Концептуальная модель служит основой для разработки математических моделей в терминах конкретного математического аппарата.

Создание математической модели преследует две основные цели:

- дать формализованное описание структуры и процесса функционирования системы для однозначности их понимания;
- попытаться представить процесс функционирования системы в виде, допускающем аналитическое исследование системы с использованием методов и приемов, разработанных в рамках данного математического аппарата.

Выбор того или иного математического аппарата обусловлен физической природой исследуемой системы и процессов, протекающих в ней. Для исследования систем со стохастическим характером функционирования широко применяется аппарат теории случайных процессов и теории массового обслуживания.

Основная проблема при создании модели заключается в нахождении компромисса между простотой модели, что является одной из предпосылок понимания и возможности ее эффективного исследования, и ее адекватностью исследуемой системе.

В связи с тем, что состав и номенклатура системных и модельных параметров и характеристик, в общем случае, различается, возникает необходимость установления соответствия между значениями системных и модельных параметров и характеристик, которое выполняется в процессе параметризации модели.

2.4.4. ВЫБОР ИЛИ РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование систем предполагает применение следующих математических методов моделирования:

- аналитических;
- статистических (имитационных);
- комбинированных.

Выбор конкретного метода зависит от многих факторов, в том числе от:

- целей проектирования;
- сложности проектируемой системы;
- сложности модели, определяемой выбранным уровнем ее детализации;
- требований к номенклатуре исследуемых характеристик;
- требований к точности получаемых результатов;
- требований к общности получаемых результатов;
- требований к затратам времени на моделирование и проектирование;
- требований к материальным затратам;
- наличия специальных технических средств для проведения проектирования;
- квалификации специалиста, проводящего проектирование и т.д.

Результаты сравнительного анализа методов проектирования, выполненного на качественном уровне, представлены в таблице 1 (фигурными скобками отмечены наилучшие значения каждого показателя), где «в», «с» и «н» - означают высокий, средний и низкий уровень показателя.

Достоинства аналитических методов проектирования, обуславливающие их широкое использование в задачах анализа и синтеза сложных систем:

- возможность проведения всестороннего исследования свойств системы в широком диапазоне изменения параметров;
- общность аналитических методов расчета и получаемых на их основе результатов, проявляющаяся в их применимости для широкого класса систем, а не для одной конкретной;
- возможность решения задач синтеза в условиях большой номенклатуры оптимизируемых параметров (число параметров может достигать нескольких сотен и тысяч) и выбранного критерия эффективности;
- малые затраты времени на получение результатов, что особенно важно на этапе предварительного проектирования, в процессе которого требуется получать приближенные оценки характеристик системы в сжатые сроки;
- возможность решения задач большой (практически неограниченной) размерности, обусловленной большим числом

параметров, описывающих структурно-функциональную организацию системы и нагрузку;

- возможность в приемлемые сроки проиграть несколько различных вариантов организации проектируемой системы с целью их сравнительного анализа.

Таблица 1

Метод моделирования	Сложность метода	Общность рез-тов	Точность рез-тов	Загр-ты времени	Матер. загр-ты	Задачи синтеза
Аналитический	{н}	{в}	н	{н}	{н}	{в}
Имитационный	с	н	{в}	в	в	н
Комбинированный	в	с	с	с	с	с

Основным достоинством имитационных методов является возможность построения моделей систем любой сложности с любой степенью детализации и, как следствие этого, возможность получения результатов исследования практически с любой наперед заданной точностью.

На практике обычно используется подход, при котором разрабатываются одновременно одна или несколько аналитических и имитационных моделей, при этом имитационные модели применяются как для оценки погрешностей приближенных аналитических моделей, так и для детального анализа синтезированной на основе приближенных аналитических моделей оптимальной системы.

В качестве технических средств проектирования обычно используются средства вычислительной техники: от персональных компьютеров для относительно простых систем до супер-эвм при проектировании сложных систем.

В качестве программных средств могут быть использованы процедурно - ориентированные или проблемно-ориентированные алгоритмические языки, а также специализированные программные средства автоматизированного проектирования сложных систем, которые можно разбить на три группы:

- коммерческие средства, ориентированные на проектирование конкретных систем в определённой прикладной области и характеризующиеся удобным графическим интерфейсом и наличием библиотеки реальных устройств и оборудования,

входящего в состав системы; недостатком коммерческих средств является их закрытость, что не позволяет, при необходимости, расширить диапазон исследований и выполнить более детальный анализ характеристик функционирования системы, а также высокая стоимость, достигающая в некоторых случаях десятков и даже сотен тысяч долларов США; примером коммерческой системы может служить Net Cracker Professional для проектирования компьютерных сетей;

- научно-исследовательские системы и языки моделирования систем различных классов, например, система (язык) имитационного моделирования GPSS;
- специализированные средства в виде программных комплексов, ориентированных на системы (модели) определенного класса (МВС, ИМСС).

Технические и программные средства проектирования выбираются с учетом ряда факторов, основными среди которых являются достаточность и полнота средств для реализации концептуальной и математической модели. Среди других факторов можно назвать доступность средств, простота и легкость освоения технических и программных средств проектирования, скорость и корректность создания программной модели, существование методики использования средств для проектирования систем определенного класса.

После выбора средств проектирования разрабатывается программная модель. Этот процесс включает разработку алгоритма, конкретизацию форм представления исходных данных и результатов, написание и отладку программы.

2.4.5. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Проверка адекватности математической модели исследуемой системе (верификация модели) заключается в анализе ее соответствия исследуемой системе, проявляющегося в близости значений модельных и системных характеристик.

Отличие модели от исследуемой системы связано с тем, что обычно модель является упрощенным и идеализированным отображением исследуемой системы, которое обусловлено:

- идеализацией внешних условий и режимов функционирования;

- не учетом в модели несущественных, по мнению исследователя, факторов и параметров;
- отсутствием точных сведений о внешних воздействиях и о некоторых конкретных нюансах организации системы;
- введением ряда упрощающих предположений и допущений.

Мерой адекватности математической модели исследуемой системе может служить абсолютное Δ или относительное δ отклонение модельных характеристик H_M от системных H_C :

$$\Delta = |H_M - H_C|; \quad \delta = |H_M - H_C| / H_C = \Delta / H_C.$$

Тогда показателем адекватности может служить вероятность того, что отклонение Δ не превышает некоторого предельного значения Δ^*

$$\pi = \text{Pr}(\Delta < \Delta^*).$$

Однако применение данного показателя на практике затруднено, а во многих случаях и невозможно по следующим причинам:

- для проектируемых или модернизируемых систем обычно заранее неизвестны значения системных характеристик H_C ;
- система в большинстве случаев оценивается по множеству системных характеристик, которые могут иметь разные значения отклонений Δ и разную размерность.

На практике верификация модели обычно проводится путем экспертного анализа разумности результатов моделирования.

Можно выделить следующие этапы верификации модели:

- проверка элементов модели и правильности формирования значений их параметров, особенно задаваемых в виде случайных величин;
- проверка адекватности формирования нагрузки в модели;
- проверка концептуальной модели с целью выявления ошибок постановки задачи;
- проверка математической модели с целью выявления ошибок математического описания структурно-функциональной организации системы и нагрузки;
- оценка точности приближенных аналитических методов расчета характеристик модели;
- проверка программной модели с целью выявления логических ошибок в алгоритме и инструментальных ошибок в программе.

В случае выявления неадекватности модели исследуемой системе необходимо выполнить корректировку или калибровку модели, которая может быть: глобальной и локальной.

Глобальная корректировка заключается в разработке новой модели и необходима при наличии:

- ошибок в постановке задачи моделирования;
- методических ошибок в концептуальной или математической модели системы.

Локальная корректировка может состоять:

- в уточнении параметров модели;
- в изменении метода расчета характеристик;
- в разработке более детализированной математической модели;
- в изменении программной модели.

В процессе проверки адекватности модели необходимо определить область применения модели, т.е. оценить диапазон изменения параметров, при котором точность результатов моделирования находится в допустимых пределах.

2.4.6. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ

Исследования на моделях заключаются в проведении экспериментов, в процессе которых определяются характеристики системы при разных значениях структурно-функциональных параметров и параметров нагрузки. Большая номенклатура исходных параметров и широкий диапазон их изменения требует предварительного планирования выполняемых на модели экспериментов (расчетов).

Планирование направлено на уменьшение длительности эксперимента при условии обеспечения достоверности и полноты результатов моделирования.

Особую значимость планирование экспериментов приобретает при использовании методов имитационного моделирования, характеризующихся большими затратами ресурсов ЭВМ в процессе моделирования. Одной из основных проблем имитационного моделирования является нахождение компромисса между временем моделирования и затратами памяти ЭВМ, на которой проводится моделирование, связанного с тем, что имитационное моделирование

предъявляет повышенные требования как к производительности, так и к памяти ВМ для проведения имитационных экспериментов. Время, затрачиваемое на проведение одного эксперимента с моделью средней сложности даже на высокопроизводительных ВС, может достигать нескольких десятков минут и, в некоторых случаях, нескольких часов, а потребность в оперативной памяти ВС – до нескольких десятков и сотен гигабайт. Причем с увеличением числа проводимых имитационных экспериментов соответственно возрастает время моделирования. Все это обуславливает высокую стоимость имитационного моделирования и требует тщательного планирования имитационных экспериментов с целью сокращения затрат на моделирование.

При проведении имитационного моделирования используются два способа планирования:

- стратегическое планирование, состоящее в выборе определенных сочетаний параметров и последовательности проведения экспериментов с использованием методов теории планирования экспериментов;

- тактическое планирование, направленное на уменьшение времени выполнения одного эксперимента при обеспечении статистической достоверности результатов имитационного моделирования.

Анализ результатов моделирования направлен на выявление свойств, присущих исследуемой системе, и включает в себя следующие этапы:

- обработка результатов для удобства последующего анализа и использования; на этом этапе выделяются наиболее важные с точки зрения исследователя и с учетом целей исследования результаты, которые представляются в форме, наиболее удобной для изучения свойств исследуемой системы;

- определение зависимостей характеристик от параметров системы путем варьирования исходных параметров структурно-функциональной организации и нагрузки с целью выявления и формулирования свойств исследуемой системы;

- принятие решения о работоспособности исследуемой системы и выработка рекомендаций по наиболее эффективной и рациональной организации проектируемой или модернизируемой

системы, которые могут быть использованы в дальнейшем при решении задач синтеза в процессе системотехнического проектирования.

2.4.7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Синтез оптимальной системы направлен на построение системы, наилучшим образом соответствующей своему назначению.

Основные этапы синтеза:

- формирование критерия эффективности, устанавливающего способ оценки качества системы в целом;
- определение оптимальных параметров структуры и режима функционирования системы, обеспечивающих выполнение заданных ограничений на характеристики системы (задача оптимизации);
- анализ качества функционирования оптимальной системы путем сопоставления её характеристик с заданными ограничениями на имитационных моделях или реальных системах.

Решение задачи синтеза связано с определением зависимостей характеристик функционирования системы от параметров, которые представляются сложными математическими конструкциями. При этом возможность получения приемлемых результатов в процессе решения задач синтеза из-за их сложности и большой трудоемкости с учетом специфических особенностей реальных систем превосходит возможности математических методов оптимизации, и задача синтеза в общем виде оказывается математически неразрешимой. Для того чтобы снизить сложность задачи синтеза, процесс проектирования разделяют на последовательность этапов, на каждом из которых решаются частные задачи синтеза – определяются параметры, связанные с отдельными аспектами организации системы, с использованием тех или иных моделей.

В зависимости от целей можно выделить следующие частные задачи (этапы) синтеза:

- структурный синтез, состоящий в выборе способа структурной организации системы, в рамках которой могут быть удовлетворены требования технического задания; структурный синтез включает в себя два этапа:

- элементный синтез, состоящий в определении требований к параметрам отдельных элементов системы;
- топологический (конфигурационный) синтез, состоящий в определении способа взаимосвязи элементов системы, т.е. топологии (конфигурации) системы;
 - функциональный синтез, состоящий в выборе режима (способа) функционирования системы;
 - нагрузочный синтез, состоящий в определении требований к параметрам нагрузки, обеспечивающим функционирование системы с заданным качеством.

На каждом из перечисленных этапов синтеза определяются значения соответствующего подмножества параметров, характеризующих структурную, функциональную организацию системы или нагрузку, возлагаемую на систему. При этом значения параметров оптимизируются лишь в отношении факторов, учитываемых на каждом из этапов синтеза, но не в отношении системы в целом. Поэтому многоэтапный синтез позволяет получить лишь приближенные оптимальные решения, качество которых проверяется путем детального анализа синтезированной системы.

2.4.8. ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПРОЕКТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Необходимость детального анализа спроектированной системы обусловлена необходимостью получения качественного проекта синтезируемой системы. Задача синтеза обычно решается с использованием сравнительно простых моделей, позволяющих получить решение в явной аналитической форме. При этом погрешность модели, а также методов расчета характеристик системы в случае применения приближенных аналитических зависимостей может привести к значительным различиям между расчетными и реальными значениями оптимизируемых параметров. В связи с этим возникает необходимость проверки и уточнения найденных значений параметров структурно-функциональной организации системы, для чего необходимо использовать наиболее адекватные модели, позволяющие получить результаты, в максимальной степени соответствующие реальным. В качестве таких моделей обычно применяются имитационные модели,

которые могут быть построены с максимальным приближением к реальной системе за счёт большей детализации по сравнению с аналитической моделью.

Кроме того, в процессе детального анализа синтезированной системы должны быть выявлены предельные возможности системы, узкие места в системе, а также определено, насколько хорошо (с каким запасом) выполняются заданные требования к качеству функционирования проектируемой системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд В.И. Лекции об уравнениях с частными производными. — М.: Фазис, 1997. 180с.
2. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учебное пособие. — М.: Наука, 1987. 600с.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных — М.: Мир, 1989. 540с.
4. Биркгоф Г. Математика и психология. М.: Советское радио. 1977. 95с.
5. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Прикладная математика: предмет, логика, особенности подходов. — Киев: Наукова думка, 1976. 270с.
6. Боровков А.А. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1986. 432с.
7. Бурсиан Э.В. Задачи по физике для компьютера. — М.: Просвещение, 1991. 256с.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. — М.: Наука, 1988. 480с.
9. Глушков В.М., Иванов А.С., Яненко К.А. Моделирование развивающихся систем. — М.: Наука, 1983. 276с.
10. Горстко А.Б. Познакомьтесь с математическим моделированием. — М.: Знание, 1991. 160с.
11. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике: В 2-х частях. Часть 2 — М.: Мир, 1990. 400с.
12. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. — М.: Высшая школа, 1984. 248с.
13. Калиткин Н.Н. Численные методы. — М.: Наука, 1978. 512с.
14. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании /Пер. с англ. Ю.П.Адлера и др. Вып. 2 — М.: Статистика, 1978. 335с.
15. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ, т.2: Получисленные алгоритмы. — М.: Мир, 1977. 370с.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). — М.: Наука, 1978. 832с.
17. Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. — М.: Наука, 1977. 298с.