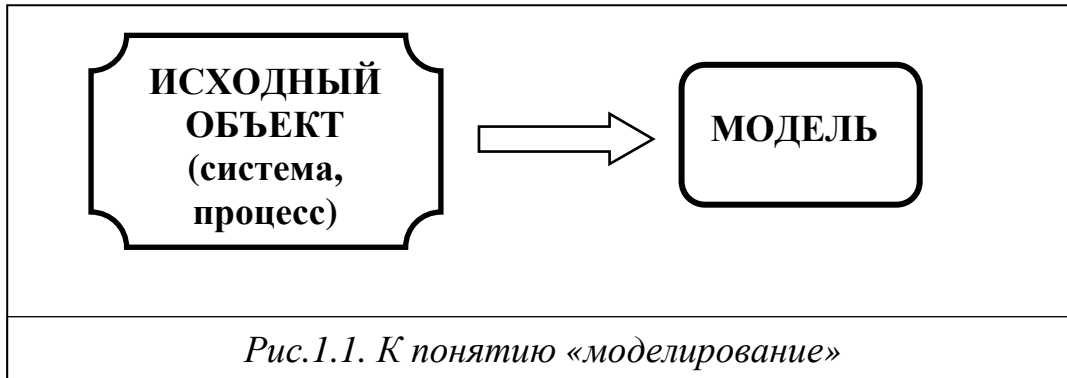


## Раздел 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

«Все, что хорошо начинается, кончается плохо. Все что начинается плохо, кончается еще хуже» (*Закон Паддера*)

**Моделирование** – замещение одного *исходного объекта* другим объектом, называемым **моделью** (рис.1.1), и проведение экспериментов с моделью с целью получения информации о системе путем исследования свойств модели.



Объектами моделирования в технике являются *системы* и протекающие в них *процессы*. В частности, в вычислительной технике объектами моделирования являются вычислительные машины, комплексы, системы и сети. При этом, наибольший интерес представляют **конструктивные модели**, допускающие не только фиксацию свойств (как в произведениях искусств), но и исследование свойств систем (процессов), а также решение задач проектирования систем с заданными свойствами.

Моделирование предоставляет возможность исследования таких объектов, прямой эксперимент с которыми:

- трудно выполним;
- экономически невыгоден;
- вообще невозможен.

Моделирование – важнейшая сфера применения вычислительных систем и сетей в различных областях науки и техники: в математике и физике, в авиа- и автомобилестроении, в приборо- и машиностроении, в оптике, в электронике и т.д. Все более широкое распространение моделирование находит в таких областях как экономика, социология, искусство, биология, медицина и т.п. В то же время, вычислительные системы и сети сами являются объектами моделирования 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 рекоменда-

ции по рациональному изменению состава и структуры или способа функциональной организации системы.

## 1.1. Система

### 1.1.1. Понятия системы и комплекса

«Усложнять - просто, упрощать – сложно»  
(Закон Мейера)

**Система** (от греч. *systema* – целое, составленное из частей; соединение) – совокупность взаимосвязанных элементов, объединенных в одно целое для достижения некоторой цели, определяемой назначением системы.

**Элемент** – минимальный неделимый объект, рассматриваемый как единое целое.

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

**Комплекс** – совокупность взаимосвязанных систем.

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 трактовать 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.

Для описания системы необходимо определить ее *структуру* и *функцию* и, соответственно, *структурную* и *функциональную организацию*.

### 1.1.2. Структура и функция

«Сложные системы имеют тенденцию противопоставлять себя своим же функциям»  
(Принцип Шательера)

**Структура** системы задается перечнем элементов, входящих в состав системы, и связей между ними.

Способы описания структуры системы:

- **графический** – 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;

- **аналитический** – путем задания количества типов элементов, числа элементов каждого типа и матрицы связей (инцидентности), определяющей взаимосвязь элементов.

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

Способы описания функции системы:

- **алгоритмический** – словесное описание в виде последовательностей шагов, которые должна выполнять система для достижения поставленной цели;

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

- **графический** – в виде временных диаграмм или графических зависимостей;

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

### 1.1.3. Организация

«Сложная система, спроектированная наспех, никогда не работает, и исправить её, чтобы заставить работать, невозможно»  
(16-й закон систематики)

**Организация** системы – способ достижения поставленной цели за счет выбора определенной структуры и функции системы. В соответствии с этим различают структурную и функциональную организацию системы.

**Функциональная организация** определяется способом порождения функций системы, достаточных для достижения поставленной цели.

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

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

### 1.1.4. Свойства систем

«Большая система, образованная увеличением размеров меньшей, ведет себя совсем не так, как ее предшественница» (*Теорема о неаддитивности поведения систем*)

Любым сложным системам присущи фундаментальные свойства, требующие применения системного подхода при их исследовании методами математического моделирования. Такими свойствами являются:

- **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 снижение энтропии (степени неопределенности) системы по сравнению с энтропией системообразующих факторов, определяющих возможность создания системы, к которым относятся: число элементов системы, число существенных связей, которыми может обладать каждый элемент, и т.п.;

- **интегративность** – наличие качеств, присущих системе в целом, но не свойственных ни одному из ее элементов в отдельности; другими словами, интегративность означает, что свойства системы хотя и зависят от свойств элементов, но не определяются ими полностью.

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 системы в целом.

### 1.1.5. Эффективность

«Оптимист верит, что мы живем в лучшем из миров. Пессимист боится, что так оно и есть» (*Главный парадокс*)

В общем случае моделирование направлено на решение задач:

- *анализа*, связанных с оценкой эффективности систем, задаваемой в виде совокупности *показателей эффективности*;
- *синтеза*, направленных на построение *оптимальных систем* в соответствии с выбранным *критерием эффективности*.

**Эффективность** – степень соответствия системы своему назначению.

Эффективность систем обычно оценивается **набором показателей эффективности**.

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

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 желательно иметь один показатель эффективности. Таким показателем является критерий эффективности.

**Критерий эффективности** – мера эффективности системы, обобщающая все 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 (оптимального) варианта.

**Оптимальная система** – система, которой соответствует максимальное (минимальное) значение прямого (инверсного) критерия эффективности из всех возможных вариантов построения системы, удовлетворяющих заданным требованиям.

**Анализ** (от греч. *análysis* — разложение, расчленение) – процесс определения свойств, присущих системе. В процессе анализа на основе сведений о функциях и параметрах элементов, входящих в состав системы, и сведений о структуре системы определяются характеристики, описывающие свойства, присущие системе в целом.

**Синтез** (от греч. *synthesis* - соединение, сочетание, составление) – процесс порождения функций и структур, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к эффективности системы.

Таким образом, с понятием «эффективность» связаны следующие понятия:

- показатель эффективности;
- критерий эффективности;
- оптимальная система;
- анализ;
- синтез.

### 1.1.6. Параметры и характеристики

«В любом наборе исходных данных самая надежная величина, не требующая никакой проверки, является ошибочной» (*Третий закон Финэйгла*)

Количественно любая система описывается совокупностью величин, которые могут быть разбиты на два класса:

• **параметры**, описывающие *первичные* свойства системы и являющиеся исходными данными при решении задач анализа;

• **характеристики**, описывающие *вторичные* свойства системы и определяемые в процессе решения задач анализа как функция параметров, то есть эти величины являются 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.

Параметры могут быть:

- **детерминированными** или **случайными**;
- **управляемыми** или **неуправляемыми**.

Характеристики системы делятся на:

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

К глобальным характеристикам технических систем относятся:

- **мощностные (характеристики производительности)**, описывающие скоростные качества системы, измеряемые, например, количеством задач, выполняемых вычислительной системой за единицу времени;
- **временные (характеристики оперативности)**, описывающие временные аспекты функционирования системы, например время решения задач в вычислительной системе;
- **надежностные (характеристики надежности)**, описывающие надежность функционирования системы;
- **экономические (стоимостные)** в виде стоимостных показателей, например, стоимость технических и программных средств вычислительной системы, затраты на эксплуатацию системы и т.п.;
- **прочие**: масса-габаритные, энергопотребления, тепловые и т.п.

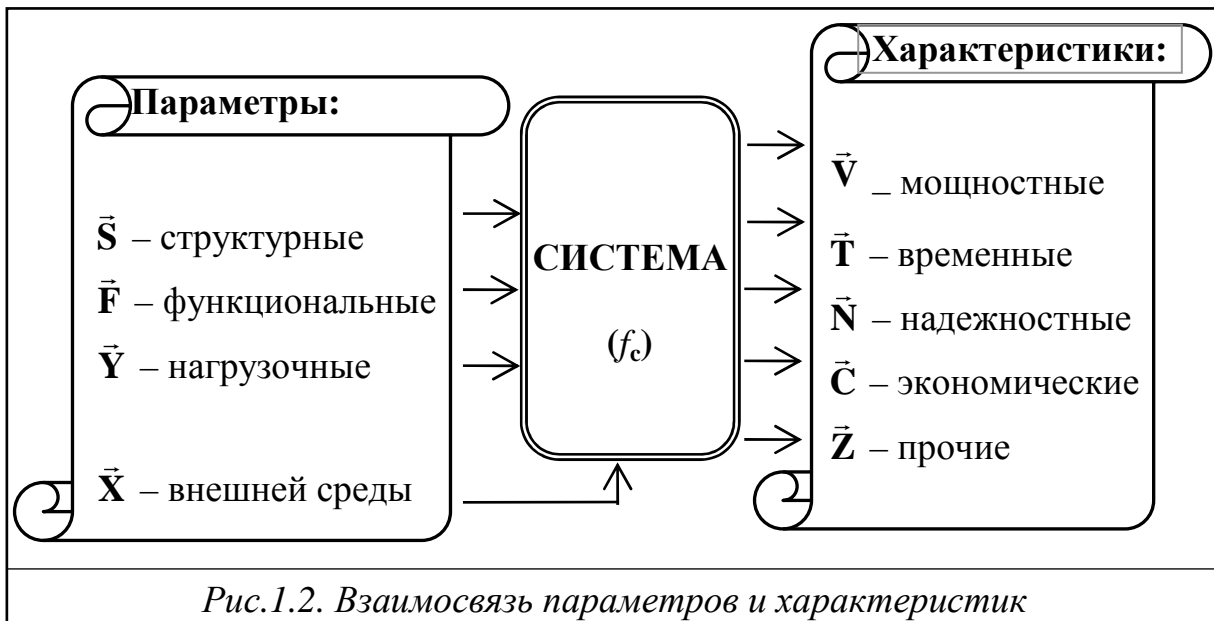
Таким образом, параметры системы можно интерпретировать как некоторые входные величины, а характеристики – выходные величины, зависящие от параметров и определяемые в процессе анализа системы (рис.1.2).

Тогда закон функционирования системы можно представить в следующем виде:

$$\vec{H}(t) = f_c(\vec{S}, \vec{F}, \vec{Y}, \vec{X}, t),$$

где  $f_c$  – функция, функционал, логические условия, алгоритм, таблица или словесное описание, определяющее правило (закон) преобразования входных величин (параметров) в выходные величины (характеристики);

$\mathbf{H}(t)$  – вектор характеристик, зависящий от текущего момента времени  $t$  ( $t \geq 0$ ):  $\vec{H} = \{\vec{V}, \vec{T}, \vec{N}, \vec{C}, \vec{Z}\}$ .



### 1.1.7. Процесс

Изучение сложных систем удобно проводить в терминах процессов.

**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**.

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

### 1.1.8. Классификация систем и процессов

Для унификации разрабатываемых моделей и методов исследования различных систем все многообразие существующих и возможных систем и процессов целесообразно разбить на отдельные классы, обладающие близкими свойствами и отображаемые определенными моделями, т.е. выполнить их классификацию. Обычно классификация выполняется в зависимости от конкретных признаков, в качестве которых будем использовать:

- способ изменения значений величин, описывающих состояния системы или процесса;
- характер протекающих в системе процессов;
- режим функционирования системы (режим процесса).

1. В зависимости от *способа изменения значений величин, описывающих состояния*, все системы и процессы делятся на два больших класса:

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

- *с дискретными состояниями*, называемые также **дискретными системами (процессами)**, для которых характерен скачкообразный переход из состояния в состояние, обусловленный тем, что величины, описывающие состояние, изменяются скачкообразно и принимают значения, которые могут быть пронумерованы, то есть являются дискретными, причем число состояний может быть как конечным, так и бесконечным.

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

- **детерминированные**, поведение которых может быть предсказано заранее;

- **стохастические (случайные, вероятностные)**, в которых процессы развиваются в зависимости от ряда случайных факторов, то есть являются случайными.

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

- системы, работающие в **установившемся (стационарном) режиме (процесс установившийся или стационарный)**, когда характеристики системы не зависят от времени, то есть инвариантны по отношению ко времени функционирования системы;

- системы, работающие в **неустановившемся режиме (процесс неустановившийся)**, когда характеристики системы меняются со временем, то есть зависят от времени функционирования системы; неустановившийся режим функционирования системы может быть обусловлен:

- началом работы системы (**переходной режим**);
- нестационарностью параметров системы (**нестационарный режим**), заключающейся в изменении параметров системы со временем;
- перегрузкой системы (**режим перегрузки**), когда система не справляется с возложенной на нее нагрузкой.



## 1.2. Модель

«Если кажется, что работу сделать легко, это непременно будет трудно» (*Теорема Стакмайера*)

**Модель** – физический или абстрактный объект, адекватно отображающий исследуемую систему.

### 1.2.1. Основные требования к модели

Ко всем разрабатываемым моделям предъявляются два противоречивых требования:

- простота модели;
- адекватность исследуемой системе.

Требование *простоты модели* обусловлено необходимостью построения модели, которая может быть рассчитана доступными методами. Построение сложной модели может привести к невозможности получения конечного результата имеющимися средствами в приемлемые сроки и с требуемой точностью.

**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 и, в то же время, менее адекватна исследуемой системе.

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

Адекватность математических моделей зависит от:

- степени полноты и достоверности сведений об исследуемой системе;
  - уровня детализации модели.
- При этом моделирование может проводиться:
- в условиях полной определенности, означающей наличие точной информации обо всех исходных параметрах;
  - в условиях неопределенности, обусловленных:
    - неточностью сведений о параметрах;
    - отсутствием сведений о значениях некоторых параметров.

### 1.2.2. Классификация моделей

Многообразие систем, проявляющееся в многообразии их структурно-функциональной организации, определяет использование множества разных моделей, которые могут быть классифицированы в зависимости от:

1) *характера функционирования исследуемой системы:*

- **детерминированные**, функционирование которых описывается детерминированными величинами;

- **стохастические** или вероятностные, функционирование которых описывается случайными величинами;

2) *характера протекающих в исследуемой системе процессов:*

- **непрерывные**, в которых процессы протекают непрерывно во времени;

- **дискретные**, в которых процессы меняют свое состояние скачкообразно в дискретные моменты времени;

3) *степени достоверности исходных данных об исследуемой системе:*

- с априорно известными параметрами;

- с неизвестными параметрами;

4) *режима функционирования системы:*

- **стационарные**, в которых характеристики не меняются со временем;

- **нестационарные**, в которых характеристики изменяются со временем;

5) *назначения:*

- **статические** или **структурные**, отображающие состав и структуру системы;

- **динамические** или **функциональные**, отображающие функционирование системы во времени;

- **структурно-функциональные**, отображающие структурные и функциональные особенности организации исследуемой системы;

б) *способа представления (описания) и реализации:*

- **концептуальные** или **содержательные**, представляющие собой описание (в простейшем случае словесное) наиболее существенных особенностей структурно-функциональной организации исследуемой системы;

- **физические** или **материальные** – модели, эквивалентные или подобные оригиналу (макеты) или процесс функционирования которых такой же, как у оригинала и имеет ту же или другую физическую природу;

- **математические** или **абстрактные**, представляющие собой формализованное описание системы с помощью абстрактного языка, в частности с помощью математических соотношений, отражающих процесс функционирования системы;

- **программные (алгоритмические, компьютерные)** – программы для ЭВМ, позволяющие наглядно представить исследуемый объект посредством имитации или графического отображения математических зависимостей, описывающих искомый объект.

Соответственно различают физическое, математическое и компьютерное моделирование.

Между классами систем и моделей необязательно должно существовать однозначное соответствие. Например, дискретные системы

могут быть представлены в виде непрерывных моделей, а детерминированные системы – в виде вероятностных моделей, и наоборот.

В дальнейшем основное внимание уделяется математическому моделированию, широко используемому при исследовании сложных технических систем.

### 1.2.3. Параметризация моделей

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

Количественно любая 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 случае составы параметров и характеристик модели и системы различаются, т.к. в первом случае они формулируются в терминах того математического аппарата, который используется при построении модели, а параметры и характеристики системы формулируются 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**.

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 на этапе **параметризации** модели.

## 1.3. Задачи моделирования

«Нет невыполнимой работы для человека, который не обязан делать ее сам» (*Закон Вейлера*)

Моделирование, как процесс исследования сложных систем, в общем случае предполагает решение следующих взаимосвязанных задач:

- разработка модели;
- анализ характеристик системы;
- синтез системы;
- детальный анализ синтезированной системы.

### 1.3.1. Разработка модели

Разработка 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.

### 1.3.2. Анализ характеристик

Анализ характеристик системы с использованием разработанной модели заключается в выявлении свойств и закономерностей, присущих процессам, протекающим в системах с различной организацией, и выработке рекомендаций для решения основной задачи системного проектирования – задачи синтеза.

### 1.3.3. Синтез системы

Синтез системы заключается в определении параметров системы, удовлетворяющих заданным требованиям к характеристикам системы.

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.

### 1.3.4. Детальный анализ синтезированной системы

Детальный анализ синтезированной системы проводится с целью оценки качества решения задачи системного проектирования и 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 синтезированной системы, выполняемый с целью определения фактической эффективности конкретных значений характеристик, обычно проводится на основе более детальных моделей, в качестве которых чаще всего используются имитационные или комбинированные (например, аналитико-имитационные) модели.

## 1.4. Методы моделирования

«Все не так легко, как кажется»  
(Следствие закона Мэрфи)

В зависимости от целей моделирование может проводиться на двух уровнях:

- на качественном;
- на количественном.

Соответственно применяются модели:

- изобразительные (наглядные);
- конструктивные.

Математическое моделирование обычно проводится на количественном уровне с использованием конструктивных моделей.

При исследовании технических систем с дискретным характером функционирования наиболее широкое применение получили следующие методы математического моделирования:

- **аналитические** (аппарат теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории случайных процессов, методы оптимизации, ...);
- **численные** (применение методов численного анализа для получения конечных результатов в числовой форме, когда невозможно получить аналитические зависимости характеристик от параметров в явном виде);

- **статистические** или **имитационные** (исследования на ЭВМ, базирующиеся на методе статистических испытаний и предполагающие применение специальных программных средств и языков моделирования: GPSS [4, 18], SIMULA, ИМСС [11] и др.).

- **комбинированные.**

### 1.4.1. Аналитические методы

**Аналитические методы** состоят в построении математической модели в виде математических символов и отношений, при этом требуемые зависимости выводятся из математической модели последовательным применением математических правил.

*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 выбора оптимальных вариантов структурно-функциональной организации системы на этапе синтеза.

*Недостаток* аналитических методов – использование целого ряда допущений и предположений в процессе построения математических моделей 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 широко применяются численные методы.

Аналитические методы можно разделить на:

- точные;
- приближенные;
- эвристические.

### 1.4.2. Численные методы

**Численные методы** основываются на построении конечной последовательности действий над числами. Применение численных методов сводится к замене математических операций и отношений соответствующими операциями над числами, например, к замене интегралов суммами, бесконечных сумм – конечными и т.п. Результатом применения численных методов являются таблицы и графики зависимостей, раскрывающих свойства объекта. Численные методы являются продолжением аналитических методов в тех случаях, когда результат не может быть получен в явном виде. Численные методы по сравнению с аналитическими методами позволяют решать значительно более широкий круг задач.

### 1.4.3. Статистические методы

В тех случаях, когда анализ математической модели даже численными методами может оказаться нерезультативным из-за

чрезмерной трудоемкости или неустойчивости алгоритмов в отношении погрешностей аппроксимации и округления, строится имитационная модель, в которой процессы, протекающие в ВС, описываются как последовательности операций над числами, представляющими значения входов и выходов соответствующих элементов. *Имитационная модель* объединяет свойства отдельных элементов в единую систему. Производя вычисления, порождаемые имитационной моделью, можно на основе свойств отдельных элементов определить свойства всей 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.

**Достоинством** статистического моделирования является *универсальность*, гарантирующая принципиальную возможность проведения анализа систем любой степени сложности с любой степенью детализации.

**Недостаток** статистического моделирования – *трудоемкость* процесса моделирования и *частный характер результатов*, не раскрывающий зависимости, а лишь определяющий ее в отдельных точках.

Статистическое моделирование широко используется для оценки погрешностей аналитических и численных методов.

#### 1.4.4. Комбинированные методы

Комбинированные методы представляют собой комбинацию выше перечисленных методов, в частности:

- **численно-аналитические**, в которых часть результатов получается численно, а остальные – с использованием аналитических зависимостей;
- **аналитико-имитационные**, представляющие собой имитационное моделирование в сочетании с аналитическими методами, позволяющими сократить время моделирования за счет определения значений ряда характеристик на основе аналитических зависимостей по значениям одной или нескольких характеристик, найденных путем статистической обработки результатов имитационного моделирования.

### 1.5. Резюме

1. Объектами моделирования в технике, в общем случае, являются *системы* и *комплексы*, обладающие *структурной* и *функциональной организацией*. *Структура системы* может быть задана в *графической* или *аналитической* форме. *Функция системы* может быть задана в *алгоритмической*, *аналитической*, *графической* или *табличной* форме.

Системе присущи такие *свойства* как *целостность*, *связность*, *организованность* и *интегативность*. Наличие этих свойств означает, что *систему нельзя рассматривать как простую совокупность элементов*,

поскольку, изучая каждый элемент системы в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом.

2. Моделирование направлено на решение задач *анализа*, связанных с оценкой *эффективности* систем, и *синтеза*, направленных на построение *оптимальных систем* в соответствии с выбранным *критерием эффективности*. Эффективность системы задается в виде совокупности *показателей эффективности*, каждый из которых служит мерой одного свойства системы. Мера эффективности, обобщающая все или некоторые, наиболее существенные, свойства системы в одной оценке называется *критерием эффективности*.

3. Для количественного описания системы используются *параметры*, описывающие *первичные* свойства системы, и *характеристики*, определяемые в процессе решения задач анализа как функция параметров.

Множество параметров технических систем можно разделить на внутренние (*структурные и функциональные*) и внешние (*нагрузочные и параметры внешней среды*). Параметры могут быть *детерминированными* или *случайными* и *управляемыми* или *неуправляемыми*.

Основными характеристиками технических систем являются характеристики *производительности, оперативности, надежности и стоимости*.

4. Изучение сложных систем удобно проводить в терминах *процессов*, с которыми связаны такие понятия как *состояние, переход* из одного состояния в другое и *событие*.

Процессы и соответственно системы, в которых они протекают, могут быть квалифицированы в зависимости:

- от способа изменения значений величин, описывающих состояния (непрерывные и дискретные);
- от характера протекающих в системах процессов (детерминированные и стохастические или, что то же самое, случайные, вероятностные);
- от режима функционирования системы (с установившимся или стационарным режимом и с неустановившимся режимом).

Неустановившийся режим может быть обусловлен началом работы системы (*переходной режим*), нестационарностью параметров системы (*нестационарный режим*), перегрузкой системы (*режим перегрузки*).

5. К разрабатываемым моделям обычно предъявляются два *противоречивых* требования: *простота* и *адекватность* исследуемой системе.

Модели могут быть классифицированы в зависимости от характера функционирования исследуемой системы (*детерминированные* и *стохастические* или *вероятностные*), от характера протекающих в исследуемой системе процессов (*непрерывные* и *дискретные*), от режима функционирования системы (*стационарные* и *нестационарные*), от способа представления и реализации (*концептуальные* или



*содержательные; физические или материальные; математические или абстрактные; программные или компьютерные).*

Одним из важнейших этапов при разработке модели является *этап параметризации*, заключающийся в установлении соответствия между значениями системных и модельных параметров и характеристик.

6. Моделирование, как многоэтапный процесс исследования сложных систем, в общем случае предполагает решение следующих взаимосвязанных задач: разработка модели, анализ характеристик системы, синтез системы, детальный анализ синтезированной системы.

При исследовании технических систем с дискретным характером функционирования наиболее широкое применение получили *аналитические, численные, статистические (имитационные) и комбинированные* методы математического моделирования:

### **1.6. Практикум: обсуждение**

При изложении любой научной и технической дисциплины одним из основных 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.

В разделе 1 определены *базовые* понятия и термины теории моделирования, которые используются в последующих разделах.

Для того чтобы закрепить представление о введенных терминах и понятиях, попытаемся ответить на некоторые конкретные вопросы практического характера.

**Вопрос 1.** Можно ли персональный компьютер рассматривать как систему, элементами которого являются системный блок и связанные с ним внешние устройства – монитор, принтер и сканер?

**Обсуждение.** Понятие «система» широко используется в нашей повседневной жизни. Мы говорим «система знаний», «система оценок», «система взглядов» и т.д. Однако 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 широком, можно сказать, общепринятом смысле. В каждой предметной области может быть введена своя трактовка понятия «система». При моделировании технических систем будем руководствоваться данным выше определением понятия «система».

Итак, 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 элемен-

ты, 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 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.

**Вопрос 2.** Насколько велико различие между «параметрами» и «характеристиками» системы? Могут ли характеристики быть параметрами и наоборот?

**Обсуждение.** В некоторых литературных источниках не акцентируется внимание на различии между параметрами и характеристиками. Более того, часто одни и те же величины называются то параметрами, то характеристиками.

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

В то же время следует понимать, 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 её состав элементов. Можно было бы сказать, что параметры системы в основном описывают элементы системы и их взаимосвязь (как структурную, так и функциональ-

ную), 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).

**Вопрос 3.** Являются ли синонимами термины «показатель эффективности» и «характеристика»?

**Обсуждение.** Действительно, термины «показатель эффективности» и «характеристика» довольно близкие понятия по определению. Можно даже считать, что это одно и то же. И все же, 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 иметь качественный характер. Так, например, при описании вычислительных 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 особого значения.

**Вопрос 4.** Сколько критериев эффективности используется при синтезе оптимальной системы?

**Обсуждение.** Для описания системы обычно используется множество зачастую противоречивых показателей эффективности. Эти противоречия заключаются в том, что 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 *один*

критерий эффективности, то есть одну целевую функцию, позволяющую 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, которые рассматриваются в разделе «Технология моделирования». Это, прежде всего так называемые составные критерии эффективности (аддитивные и мультипликативные), представляющие объединение 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.

В то же время, следует заметить, 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 производительность 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.

В заключение хотелось бы заметить, что фразы типа «более оптимальная система» или «менее оптимальная система» являются некорректными, поскольку оптимальная система существует в единственном экземпляре. Это та система, которая обеспечивает экстремум (максимум или минимум) функции, задающей критерий эффективности.

**Вопрос 5.** В литературе часто встречается такое понятие как «многокритериальная задача». Означает ли это, что задача оптимального синтеза может решаться с использованием сразу нескольких критериев эффективности?

**Обсуждение.** 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 (часто

условного) 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.

**Вопрос 6.** Можно ли систему, работающую в неустановившемся режиме, исследовать методами, разработанными для установившегося режима?

**Обсуждение.** Как сказано выше, неустановившийся режим работы системы может быть обусловлен тремя факторами: началом работы системы, нестационарностью нагрузки и перегрузками.

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 в том или ином виде разработаны для переходного режима и режима перегрузок.

В то же время многие реальные системы, в том числе технические, работают в неустановившемся режиме, обусловленном нестационарностью нагрузки. Для исследования таких систем методами, разработанными для установившегося режима, могут использоваться различные подходы, основными среди которых являются следующие. Во-первых, можно попытаться выделить достаточно продолжительные интервалы времени, в течение которых нагрузка не изменяется, то есть является стационарной, или же изменение нагрузки незначительно и им можно пренебречь. Во-вторых, исследование методами, разработанными для установившегося режима, можно проводить в расчете на максимальную или некоторую среднюю нагрузку.

**Вопрос 7.** Каким способом достигается разумный компромисс между простотой и адекватностью модели?

**Обсуждение.** Достижение разумного компромисса между простотой модели и ее адекватностью исследуемой системе является одной из сложнейших проблем теории моделирования. Действительно, с одной стороны, желательно иметь модель с максимальной степенью детализации, отражающую все особенности структурно-функциональной организации. С другой стороны, такая модель может оказаться настолько сложной, что ее исследование будет невозможным или же потребует неоправданно больших материальных и временных ресурсов. Следует также учитывать, что для исследования сложных моделей обычно невозможно разработать

точные математические методы, а применение громоздких приближенных методов может привести к значительным погрешностям результатов. Есть ещё один важный момент, который следует иметь в виду при разработке моделей. Это точность представления исходных данных, особенно связанных с нагрузочными параметрами. Если погрешность представления нагрузочных или структурно-функциональных параметров велика, то, очевидно, нет смысла строить сверхточную модель.

Более подробно и предметно проблема выбора уровня детализации разрабатываемой модели обсуждается в последнем разделе «Технология моделирования».

**Вопрос 8.** Каково значение параметризации модели в процессе исследования реальной системы?

**Обсуждение.** Этап параметризации модели в процессе исследования реальной системы имеет большое значение для получения корректных результатов. На этом этапе фактически 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.

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 используются такие термины и элементы, как состояние, переход, событие, граф переходов, матрица вероятностей переходов и т.д. Выявить и грамотно установить соответствие между указанными понятиями и элементами и является одной из задач этапа параметризации.

Фактически, параметризация – это промежуточный этап установления взаимнооднозначного соответствия между концептуальной и математической моделями.

**Вопрос 9.** Насколько необходим детальный анализ спроектированной системы?

**Обсуждение.** Настолько, насколько важно получение 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, естественно, 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.

**Вопрос 10.** Если, как сказано выше, статистические (имитационные) методы исследования сложных систем являются универсальными, то насколько актуально применение аналитических методов?

**Обсуждение.** Действительно, имитационное моделирование может рассматриваться как универсальное средство исследования сложных систем со стохастическим характером функционирования, позволяющее проводить анализ эффективности функционирования систем любой степени сложности с любой степенью детализации. 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 суперЭВМ. 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, практически невозможным (либо это сопряжено с большими временными и материальными затратами) оказывается решение задачи оптимального синтеза сложных систем, характеризующихся большой размерностью, то есть наличием большого числа структурно-функциональных и нагрузочных параметров.

Таким образом, аналитические методы моделирования следует применять 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.

**Вопрос 11.** В некоторых литературных источниках вместо понятия «оптимальная система» используется понятие «рациональная система». Каково соотношение между этими двумя понятиями?

**Обсуждение.** «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 называться 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. Ясно, что в этом случае вообще нет речи об оптимизации.

**Вопрос 12.** В чем различие между понятиями «синтез» и «проектирование»?

**Обсуждение.** Эти понятия достаточно близкие по смыслу и часто используются как синонимы. В то же время между ними существует некоторое различие, вытекающее, прежде всего, из их иностранного происхождения.

Термин «синтез» (от греческого слова *synthesis* – соединение, сочетание, составление) означает соединение различных элементов в единое целое – систему и неразрывно связан с термином «анализ».

Термин «проектирование» (от латинского слова *projectus*, буквально означающего – брошенный вперед) означает процесс создания проекта – прототипа новой системы.

В процессе проектирования технических систем основная задача заключается в создании проекта, 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 предполагает, прежде всего, применение различных инженерно-технических решений, обоснование которых может осуществляться математическими расчетами.

### **1.7. Самоконтроль: перечень вопросов**

1. Дать определение понятий: моделирование, элемент, система, сложная система, комплекс, структура, функция, структурная и функциональная организация, анализ, синтез, эффективность, показатель эффективности, критерий эффективности, оптимальная система.

2. В каких случаях моделирование оправдано и необходимо?

3. Перечислить и дать краткую характеристику способов описания структуры системы. Проиллюстрировать эти способы на примере персонального компьютера.

4. Перечислить и дать краткую характеристику способов описания функции системы. Проиллюстрировать эти способы на примере решения задачи в компьютере.

5. Способ достижения поставленной цели за счет выбора определенной структуры и функции системы называется ...?

6. Чем отличается реализация функциональной организации системы от структурной?

7. Что определяется в процессе анализа системы?

8. Что определяется в процессе синтеза системы?

9. Чем оценивается эффективность системы?

10. Чем инверсный критерий эффективности отличается от прямого?

11. Что понимается под оптимальной системой?

12. Свойства, присущие сложной системе, и их краткая характеристика.

13. В чем состоит различие между параметрами и характеристиками?

14. Перечислить состав параметров технической системы. Привести примеры структурных, функциональных, нагрузочных параметров.

15. Перечислить состав характеристик технической системы. Привести примеры мощностных, надежностных, стоимостных характеристик.

16. В чем состоит проблема выбора уровня детализации моделей?

17. Перечислить основные этапы моделирования систем.

18. Методы моделирования систем, их достоинства и недостатки.

19. Какой метод исследования систем является наиболее точным?

20. Какой метод исследования систем является наиболее универсальным?

21. Какой метод позволяет выполнять исследование систем на моделях любой степени детализации?