

## ТЕМА 1. Методологические основы моделирования

1. Современное состояние проблемы моделирования.
2. Имитационное моделирование.
3. Принципы системного подхода в моделировании.
4. Основные этапы моделирования.
5. Вычислительный эксперимент.
6. Оценка модели.

### 1. Современное состояние проблемы моделирования

#### 1.1. Понятие модели и моделирования

**Моделирование** можно рассматривать как замещение исследуемого объекта (оригинала) его условным образом, описанием или другим объектом, именуемым **моделью** и обеспечивающим близкое к оригиналу поведение в рамках некоторых допущений и приемлемых погрешностей.

Моделирование обычно выполняется с *целью познания свойств оригинала* путем исследования его модели, а не самого объекта. Разумеется, моделирование оправдано в том случае когда оно проще создания самого оригинала или когда последний по каким-то причинам лучше вообще не создавать.

Под **моделью** понимается физический или абстрактный объект, свойства которого в определенном смысле сходны со свойствами исследуемого объекта. При этом требования к модели определяются решаемой задачей и имеющимися средствами. Существует ряд общих требований к моделям:

- 1) адекватность – достаточно точное отображение свойств объекта;
- 2) полнота – предоставление получателю всей необходимой информации об объекте;
- 3) гибкость – возможность воспроизведения различных ситуаций во всем диапазоне изменения условий и параметров;
- 4) трудоемкость разработки должна быть приемлемой для имеющегося времени и программных средств.

**Моделирование** – это процесс построения модели объекта и исследования его свойств путем исследования модели.

Таким образом, моделирование предполагает 2 основных этапа:

- 1) разработка модели;
- 2) исследование модели (анализ результатов и выводы).

На каждом из этапов решаются разные задачи и используются отличающиеся по сути методы и средства.

В зависимости от способа реализации, все модели можно разделить на два больших класса: физические и математические.

**Математическое моделирование** принято рассматривать как средство исследования процессов или явлений с помощью их математических моделей.

Под **физическим моделированием** понимается исследование объектов и явлений на физических моделях, когда изучаемый процесс воспроизводят с сохранением его физической природы или используют другое физическое явление, аналогичное изучаемому. При этом **физические модели** предполагают, как правило, реальное воплощение тех физических свойств оригинала, которые являются существенными в конкретной ситуации. Например, при

проектировании нового самолета создается его макет, обладающий теми же аэродинамическими свойствами; при планировании застройки архитекторы изготавливают макет, отражающий пространственное расположение ее элементов. В связи с этим физическое моделирование называют также **макетированием**.

**Полунатурное моделирование** представляет собой исследование управляемых систем на моделирующих комплексах с включением в состав модели реальной аппаратуры. Наряду с реальной аппаратурой в замкнутую модель входят имитаторы воздействий и помех, математические модели внешней среды и процессов, для которых неизвестно достаточно точное математическое описание. Включение реальной аппаратуры или реальных систем в контур моделирования сложных процессов позволяет уменьшить априорную неопределенность и исследовать процессы, для которых нет точного математического описания. С помощью полунатурного моделирования исследования выполняются с учетом малых постоянных времени и нелинейностей, присущих реальной аппаратуре. При исследовании моделей с включением *реальной аппаратуры используется понятие динамического моделирования*, при исследовании сложных систем и явлений - **эволюционного, имитационного и кибернетического моделирования**.

Очевидно, действительная польза от моделирования может быть получена только при соблюдении двух условий:

- 1) модель обеспечивает корректное (адекватное) отображение свойств оригинала, существенных с точки зрения исследования;
- 2) модель позволяет устранить перечисленные выше проблемы, присущие проведению исследований на реальных объектах.

Математическое моделирование для исследования характеристик систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное. В свою очередь, ММ делятся на имитационные и аналитические.

## **2. Имитационное моделирование**

При **имитационном моделировании** реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени.

*Основным преимуществом* имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют легко учитывать наличие дискретных или непрерывных элементов, нелинейные характеристики, случайные воздействия и др. Поэтому этот метод широко применяется на этапе проектирования сложных систем. Основным средством реализации имитационного моделирования служит ЭВМ, позволяющая осуществлять цифровое моделирование систем и сигналов.

В связи с этим определим словосочетание **«компьютерное моделирование»**, которое все чаще используется в литературе. Будем полагать, что **компьютерное моделирование** - это математическое моделирование с использованием средств вычислительной техники. Соответственно, технология компьютерного моделирования предполагает выполнение следующих действий:

- 1) определение цели моделирования;
- 2) разработка концептуальной модели;

- 3) формализация модели;
- 4) программная реализация модели;
- 5) планирование модельных экспериментов;
- 6) реализация плана эксперимента;
- 7) анализ и интерпретация результатов моделирования.

Содержание первых двух этапов практически не зависит от математического метода, положенного в основу моделирования (и даже наоборот - их результат определяет выбор метода). А вот реализация остальных пяти этапов существенно различается для аналитического и имитационного моделирования.

При *имитационном моделировании* используемая ММ воспроизводит алгоритм («логику») функционирования исследуемой системы во времени при различных сочетаниях значений параметров системы и внешней среды. Примером простейшей аналитической модели может служить уравнение прямолинейного равномерного движения. При исследовании такого процесса с помощью имитационной модели должно быть реализовано наблюдение за изменением пройденного пути с течением времени.

Очевидно, в одних случаях более предпочтительным является аналитическое моделирование, в других - имитационное (или сочетание того и другого). Чтобы выбор был удачным, необходимо ответить на два вопроса.

С какой целью проводится моделирование?

К какому классу может быть отнесено моделируемое явление?

Ответы на оба эти вопроса могут быть получены в ходе выполнения двух первых этапов моделирования.

Имитационные модели не только по свойствам, но и по структуре соответствуют моделируемому объекту. При этом имеется однозначное и явное соответствие между процессами, получаемыми на модели, и процессами, протекающими на объекте. *Недостатком* имитационного моделирования является большое время решения задачи для получения хорошей точности.

Результаты имитационного моделирования работы стохастической системы являются реализациями случайных величин или процессов. Поэтому для нахождения характеристик системы требуется многократное повторение и последующая обработка данных. Чаще всего в этом случае применяется разновидность имитационного моделирования - *статистическое моделирование* (или метод Монте-Карло), т.е. воспроизведение в моделях случайных факторов, событий, величин, процессов, полей. По результатам статистического моделирования определяют оценки вероятностных критериев качества, общих и частных, характеризующих функционирование и эффективность управляемой системы. Статистическое моделирование широко применяется для решения научных и прикладных задач в различных областях науки и техники. Методы статистического моделирования широко применяются при исследовании сложных динамических систем, оценке их функционирования и эффективности.

Заключительный этап статистического моделирования основан на математической обработке полученных результатов. Здесь используют методы математической статистики (параметрическое и непараметрическое оценивание, проверку гипотез). Примером параметрической оценки является выборочное

среднее показателя эффективности. Среди непараметрических методов большое распространение получил *метод гистограмм*.

Рассмотренная схема основана на многократных статистических испытаниях системы и методах статистики независимых случайных величин. Эта схема является далеко не всегда естественной на практике и оптимальной по затратам. Сокращение времени испытания систем может быть достигнуто за счет использования более точных методов оценивания. Как известно из математической статистики, наибольшую точность при заданном объеме выборки имеют эффективные оценки. Оптимальная фильтрация и метод максимального правдоподобия дают общий метод получения таких оценок.

В задачах статистического моделирования обработка реализаций случайных процессов необходима не только для анализа выходных процессов. Весьма важен также и контроль характеристик входных случайных воздействий. Контроль заключается в проверке соответствия распределений генерируемых процессов заданным распределениям. Эта задача часто формулируется как *задача проверки гипотез*.

Общей тенденцией моделирования с использованием ЭВМ у сложных управляемых систем является стремление к уменьшению времени моделирования, а также проведение исследований в реальном масштабе времени. Вычислительные алгоритмы удобно представлять в рекуррентной форме, допускающей их реализацию в темпе поступления текущей информации.

### 3. Принципы системного подхода в моделировании

Основные положения теории систем возникли в ходе исследования динамических систем и их функциональных элементов. Под *системой* понимают группу взаимосвязанных элементов, действующих совместно с целью выполнения заранее поставленной задачи. *Анализ систем* позволяет определить наиболее реальные способы выполнения поставленной задачи, обеспечивающие максимальное удовлетворение поставленных требований.

Элементы, составляющие основу теории систем, не создаются с помощью гипотез, а обнаруживаются экспериментальным путем. Для того чтобы начать построение системы, необходимо иметь общие характеристики технологических процессов. Это же справедливо и в отношении принципов создания математически сформулированных критериев, которым должен удовлетворять процесс или его теоретическое описание. Моделирование является одним из наиболее важных методов научного исследования и экспериментирования.

При построении моделей объектов используется *системный подход*, представляющий собой методологию решения сложных задач, в основе которой лежит рассмотрение объекта как системы, функционирующей в некоторой среде. Системный подход предполагает раскрытие целостности объекта, выявление и изучение его внутренней структуры, а также связей с внешней средой. При этом *объект* представляется как часть реального мира, которая выделяется и исследуется в связи с решаемой задачей построения модели. Кроме этого, системный подход предполагает последовательный переход от общего к частному, когда в основе рассмотрения лежит цель проектирования, а объект рассматривается во взаимосвязи с окружающей средой.

Сложный объект может быть разделен на *подсистемы*, представляющие собой части объекта, удовлетворяющие следующим требованиям:

- 1) подсистема является функционально независимой частью объекта. Она связана с другими подсистемами, обменивается с ними информацией и энергией;
- 2) для каждой подсистемы могут быть определены функции или свойства, не совпадающие со свойствами всей системы;
- 3) каждая из подсистем может быть подвергнута дальнейшему делению до уровня элементов.

В данном случае под *элементом* понимается подсистема нижнего уровня, дальнейшее деление которой нецелесообразно с позиций решаемой задачи.

Таким образом, *систему* можно определить как представление объекта в виде набора подсистем, элементов и связей с целью его создания, исследования или усовершенствования. При этом укрупненное представление системы, включающее в себя основные подсистемы и связи между ними, называется *макроструктурой*, а детальное раскрытие внутреннего строения системы до уровня элементов – *микроструктурой* [19].

Наряду с системой обычно существует *надсистема* – система более высокого уровня, в состав которой входит рассматриваемый объект, причём функция любой системы может быть определена только через надсистему. Следует выделить понятие *среды* как совокупности объектов внешнего мира, существенно влияющих на эффективность функционирования системы, но не входящих в состав системы и ее надсистемы.

В связи с системным подходом к построению моделей используется понятие *инфраструктуры*, описывающей взаимосвязи системы с ее окружением (средой).

При этом выделение, описание и исследование свойств объекта, существенных в рамках конкретной задачи называется *стратификацией объекта*, а всякая модель объекта является его стратифицированным описанием.

Для системного подхода важным является определение *структуры системы*, т.е. совокупности связей между элементами системы, отражающих их взаимодействие. Для этого рассмотрим структурный и функциональный подходы к моделированию.

При *структурном подходе* выявляются состав выделенных элементов системы и связи между ними. Совокупность элементов и связей позволяет судить о структуре системы. Наиболее общим описанием структуры является топологическое описание. Оно позволяет определить составные части системы и их связи с помощью графов.

Менее общим является функциональное описание, когда рассматриваются отдельные функции, т. е. алгоритмы поведения системы. При этом реализуется *функциональный подход*, определяющий функции, которые выполняет система.

На базе системного подхода может быть предложена последовательность разработки моделей, когда выделяют две основные стадии проектирования: макропроектирование и микропроектирование.

На стадии *макропроектирования* строится модель внешней среды, выявляются ресурсы и ограничения, выбирается модель системы и критерии для оценки адекватности.

Стадия *микропроектирования* в значительной степени зависит от конкретного типа выбранной модели. В общем случае предполагает создание

информационного, математического, технического и программного обеспечения системы моделирования. На этой стадии устанавливаются основные технические характеристики созданной модели, оцениваются время работы с ней и затраты ресурсов для получения заданного качества модели.

Независимо от типа модели при ее построении необходимо руководствоваться рядом **принципов системного подхода**:

1. последовательное продвижение по этапам создания модели;
2. согласование информационных, ресурсных, надежностных и других характеристик;
3. правильное соотношение различных уровней построения модели;
4. целостность отдельных стадий проектирования модели.

### ***Принципы построения моделей***

Рассмотрим основные принципы моделирования, отражающие опыт, накопленный к настоящему времени в области разработки и использования моделей.

**1. Принцип информационной достаточности.** При полном отсутствии информации об исследуемой системе построение ее модели невозможно. При наличии полной информации о системе ее моделирование лишено смысла. Существует некоторый критический уровень априорных сведений о системе (уровень информационной достаточности), при достижении которого может быть построена ее адекватная модель.

**2. Принцип осуществимости.** Создаваемая модель должна обеспечивать достижение поставленной цели исследования с вероятностью, существенно отличающейся от нуля, и за конечное время.

**3. Принцип множественности моделей.** Данный принцип является ключевым. Речь идет о том, что создаваемая модель должна отражать в первую очередь те свойства реальной системы (или явления), которые влияют на выбранный показатель эффективности. Соответственно при использовании любой конкретной модели познаются лишь некоторые стороны реальности. Для более полного ее исследования необходим ряд моделей, позволяющих с разных сторон и с разной степенью детальности отражать рассматриваемый процесс.

**4. Принцип агрегирования.** В большинстве случаев сложную систему можно представить состоящей из агрегатов (подсистем), для адекватного математического описания которых оказываются пригодными некоторые стандартные математические схемы. Принцип агрегирования позволяет, кроме того, достаточно гибко перестраивать модель в зависимости от задач исследования.

**5. Принцип параметризации.** В ряде случаев моделируемая система имеет в своем составе некоторые относительно изолированные подсистемы, характеризующиеся определенным параметром, в том числе векторным. Такие подсистемы можно заменять в модели соответствующими числовыми величинами, а не описывать процесс их функционирования. При необходимости зависимость значений этих величин от ситуации может задаваться в виде таблицы, графика или аналитического выражения (формулы). Принцип параметризации позволяет сократить объем и продолжительность

моделирования. Однако надо иметь в виду, что параметризация снижает адекватность модели.

Степень реализации перечисленных принципов и каждой конкретной модели может быть различной, причем это зависит не только от желания разработчика, но и от соблюдения им технологии моделирования. А любая технология предполагает наличие определенной последовательности действий

**Общая цель моделирования** может быть сформулирована следующим образом: это определение (расчет) значений выбранного показателя эффективности (ПЭ) для различных стратегий проведения операции (или вариантов реализации проектируемой системы). При разработке конкретной модели цель моделирования должна уточняться с учетом используемого критерия эффективности. Для критерия пригодности модель, как правило, должна обеспечивать расчет значений ПЭ для всего множества допустимых стратегий. При использовании критерия оптимальности модель должна позволять непосредственно определять параметры исследуемого объекта, дающие экстремальное значение ПЭ.

Таким образом, цель моделирования определяется как целью исследуемой операции, так и планируемым способом использования результатов исследования.

Сам по себе выбор показателя эффективности еще не определяет «архитектуру» будущей модели, поскольку на этом этапе не определена концептуальная модель исследуемой системы.

В целом при решении любой задачи построения модели основную роль играют следующие четыре элемента:

- 1) эксперимент;
- 2) модель;
- 3) показатели эффективности;
- 4) критерии принятия решений.

Необходимо должным образом определить перечисленные элементы и понять их взаимосвязь, поскольку они оказывают большое влияние на **проектирование системы** и на планирование ее работы в целом. Критерии принятия решений позволяют выбрать наиболее эффективные параметры системы. Обычно этот процесс называется **оптимизацией**.

#### **4. Основные этапы моделирования**

**Первым этапом** моделирования является **постановка задачи, определение объекта и целей исследования**, задание критериев (признаков) изучения объектов и управления ими. Неправильная или неполная постановка задачи может свести на нет результаты всех последующих этапов.

**Вторым этапом** моделирования является **выбор типа модели**, что является важнейшим моментом, определяющим направление всего исследования. Обычно последовательно строится несколько моделей. Сравнение результатов их исследования с реальностью позволяет установить наилучшую из них. На этапе выбора типа модели при помощи анализа данных поискового эксперимента устанавливаются: линейность или нелинейность, динамичность или статичность, стационарность или не стационарность, а также степень детерминированности исследуемого объекта или процесса.

Процесс выбора модели объекта заканчивается ее **предварительным контролем**, который также является первым шагом на пути к исследованию модели. При этом осуществляются следующие виды контроля (проверки): размерностей; порядков; характера зависимостей; экстремальных ситуаций; граничных условий; математической замкнутости; физического смысла; устойчивости модели.

Контроль **размерностей** сводится к проверке выполнения правила, согласно которому приравняться и складываться могут только величины одинаковой размерности.

Контроль **порядков** величин направлен на упрощение модели. При этом определяются порядки складываемых величин и явно малозначительные слагаемые отбрасываются.

Анализ **характера зависимостей** сводится к проверке направления и скорости изменения одних величин при изменении других. Направления и скорость, вытекающие из модели, должны соответствовать физическому смыслу задачи.

Анализ **экстремальных ситуаций** сводится к проверке наглядного смысла решения при приближении параметров модели к нулю или бесконечности.

Контроль **граничных условий** состоит в том, что проверяется соответствие модели граничным условиям, вытекающим из смысла задачи. При этом проверяется, действительно ли граничные условия поставлены и учтены при построении искомой функции и что эта функция на самом деле удовлетворяет таким условиям.

Анализ **математической замкнутости** сводится к проверке того, что модели дает однозначное решение.

Анализ **физического смысла** сводится к проверке физического содержания промежуточных соотношений, используемых при построении модели.

Проверка **устойчивости модели** состоит в проверке того, что варьирование исходных данных в рамках имеющихся данных о реальном объекте не приведет к существенному изменению решения.

### 1.5. Вычислительный эксперимент

В настоящее время основным способом исследования модели и проверки ее качественных показателей служит вычислительный эксперимент.

**Вычислительным экспериментом** называется методология и технология исследований, основанные на применении прикладной математики и ЭВМ как технической базы при использовании модели. Вычислительный эксперимент основывается на создании модели изучаемых объектов, которые формируются с помощью некоторой особой математической структуры, способной отражать свойства объекта, проявляемые им в различных экспериментальных условиях, и включает в себя следующие этапы.

1. Для исследуемого объекта строится модель, фиксирующая разделение всех действующих в рассматриваемом явлении факторов на главные и второстепенные, которые на данном этапе исследования отбрасываются; одновременно формулируются допущения и условия применимости модели, границы, в которых будут справедливы полученные результаты; модель записывается в математических терминах; создание модели проводится специалистами, хорошо знающими данную проблемную область, а также

математиками, представляющими себе возможности решения математической задачи.

2. Разрабатывается метод решения сформулированной задачи. Эта задача представляется в виде совокупности набора действий и условий. Набор этих действий и условий носит название **вычислительного алгоритма**. Вычислительный эксперимент имеет многовариантный характер, так как решения поставленных задач часто зависят от многочисленных входных параметров. Тем не менее, каждый конкретный расчет в вычислительном эксперименте проводится при фиксированных значениях всех параметров. Между тем в результате такого эксперимента часто ставится задача определения оптимального набора параметров. Поэтому при создании оптимальной установки приходится проводить большое число расчетов однотипных вариантов задачи, отличающихся значением некоторых параметров.

3. Разрабатываются алгоритм и программа решения задачи на ЭВМ. Программирование решений определяется теперь не только искусством и опытом исполнителя, а перерастает в самостоятельную науку со своими принципиальными подходами.

4. Проведение расчетов на ЭВМ. Результат получается в виде некоторой цифровой информации, которую далее необходимо будет расшифровать. Точность информации определяется при вычислительном эксперименте достоверностью модели, положенной в основу эксперимента, правильностью алгоритмов и программ (проводятся предварительные «тестовые» испытания).

5. Обработка результатов расчетов, их анализ и выводы. На этом этапе могут возникнуть необходимость уточнения модели (усложнения или, наоборот, упрощения), предложения по созданию упрощенных инженерных способов решения, дающих возможности получить необходимую информацию более простым способом.

Вычислительный эксперимент приобретает исключительное значение в тех случаях, когда натурные эксперименты и построение физической модели оказываются невозможными.

Пригодность модели для решения задач исследования характеризуется тем, в какой степени она обладает так называемыми целевыми свойствами, основными из которых являются адекватность, устойчивость и чувствительность.

## 1.6. Оценка модели

### Оценка адекватности

В общем случае под **адекватностью** понимают степень соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится. Вместе с тем, создаваемая модель ориентирована, как правило, на исследование определенного подмножества свойств этого объекта. Поэтому можно считать, что адекватность модели определяется степенью ее соответствия не столько реальному объекту, сколько целям исследования. В наибольшей степени это утверждение справедливо относительно моделей проектируемых систем (т. е. в ситуациях, когда реальная система вообще не существует).

Тем не менее, во многих случаях полезно иметь формальное подтверждение (или обоснование) адекватности разработанной модели. Один из наиболее

распространенных способов такого обоснования - использование методов математической статистики. Суть этих методов заключается в проверке выдвинутой гипотезы (в данном случае - об адекватности модели) на основе некоторых статистических критериев. При этом следует заметить, что при проверке гипотез методами математической статистики необходимо иметь в виду, что статистические критерии не могут доказать ни одной гипотезы - они могут лишь указать на отсутствие опровержения.

Итак, каким же образом можно оценить адекватность разработанной модели реально существующей системе?

Процедура оценки основана на сравнении измерений на реальной системе и результатов экспериментов на модели и может проводиться различными способами. Наиболее распространенные из них:

- по средним значениям откликов модели и системы;
- по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы;
- по максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы.

На проектируемой системе провести измерения, естественно, не представляется возможным. Единственный способ преодолеть это препятствие заключается в том, чтобы принять в качестве эталонного объекта концептуальную модель проектируемой системы. Тогда оценка адекватности программно реализованной модели заключается в проверке того, насколько корректно она отражает концептуальную модель.

#### ***Оценка устойчивости***

При проверке адекватности модели как существующей, так и проектируемой системы реально может быть использовано лишь ограниченное подмножество всех возможных значений входных параметров (рабочей нагрузки и внешней среды). В связи с этим для обоснования достоверности получаемых результатов моделирования большое значение имеет проверка устойчивости модели. В теории моделирования это понятие трактуется следующим образом:

**Устойчивость модели** - это ее способность сохранять адекватность при исследовании эффективности системы на всем возможном диапазоне рабочей нагрузки, а также при внесении изменений в конфигурацию системы.

Каким образом может быть оценена устойчивость модели? Универсальной процедуры проверки устойчивости модели не существует. Разработчик вынужден прибегать к методам «для данного случая», частичным тестам и здравому смыслу. Часто полезна апостериорная проверка. Она состоит в сравнении результатов моделирования и результатов измерений на системе после внесения в нее изменений. Если результаты моделирования приемлемы, уверенность в устойчивости модели возрастает.

В общем случае можно утверждать, что чем ближе структура модели структуре системы и чем выше степень детализации, тем устойчивее модель. Устойчивость результатов моделирования может быть также оценена методами математической статистики. Здесь уместно вспомнить основную задачу математической статистики, которая заключается в том, чтобы проверить гипотезу относительно свойств некоторого множества элементов, называемого генеральной совокупностью, оценивая свойства какого-либо подмножества генеральной совокупности (то есть выборки). В генеральной совокупности

исследователя обычно интересует некоторый признак, который обусловлен случайностью и может иметь качественный или количественный характер.

В данном случае именно устойчивость результатов моделирования можно рассматривать как признак, подлежащий оценке. Для проверки гипотезы об устойчивости результатов может быть использован **критерий Уилкоксона**, который служит для проверки того, относятся ли две выборки к одной и той же генеральной совокупности (т. е. обладают ли они одним и тем же статистическим признаком). Например, в двух партиях некоторой продукции измеряется определенный признак и требуется проверить гипотезу о том, что этот признак имеет в обеих партиях одинаковое распределение; другими словами, необходимо убедиться, что технологический процесс от партии к партии изменяется несущественно. При статистической оценке устойчивости модели соответствующая гипотеза может быть сформулирована следующим образом: при изменении входной (рабочей) нагрузки или структуры модели закон распределения результатов моделирования остается неизменным.

### ***Оценка чувствительности***

Очевидно, что устойчивость является положительным свойством модели. Однако если изменение входных воздействий или параметров модели (в некотором заданном диапазоне) не отражается на значениях выходных параметров, то польза от такой модели невелика. В связи с этим возникает задача оценивания чувствительности модели к изменению параметров рабочей нагрузки и внутренних параметров самой системы [10].

Такую оценку проводят по каждому параметру модели в отдельности. Основана она на том, что обычно диапазон возможных изменений параметра известен. Данные, полученные при оценке чувствительности модели, могут быть использованы, в частности, при планировании экспериментов: большее внимание должно уделяться тем параметрам, по которым модель является более чувствительной.

### ***Заключительные замечания***

Роль, которую играет математическое моделирование, безусловно, зависит от характера рассматриваемой задачи, мастерства экспериментатора, располагаемого времени и отпущенных средств, а также от выбранной модели. Необходимо постоянно иметь в виду первоначальную задачу. Самая распространенная ошибка связана с тем, что теряется из виду основная цель. Другой ошибкой является переход к моделированию при отсутствии достаточного количества данных о поведении системы в прошлом.

Основной метод последовательного решения задачи, состоит из следующих этапов:

- 1) формулировка задачи;
- 2) накопление экспериментальных данных (в том числе, анализ возможных ошибок в системе регистрации данных, а в некоторых случаях разработка новой системы регистрации, которая будет давать соответствующие данные);

3) определение влияния рабочих параметров системы или процесса (анализ случайных колебаний процесса с целью выяснения статистической зависимости результатов от соответствующих параметров);

4) составление методики эксперимента (например, изменение параметров с целью определения фактического воздействия на результат);

5) уменьшение числа «рабочих» параметров (оставление лишь тех параметров, к изменению которых результаты наиболее чувствительны); б) выяснение ограничений, свойственных методу.

Одной из основных ошибок при моделировании является стремление к искажению реальных условий, т. е. условий, наблюдаемых в естественной или технической системе. Эти искажения часто делаются для того, чтобы воспользоваться определенной, уже созданной для другой цели моделью. Такой порядок неразумен, даже если он кажется целесообразным.

Задача экспериментатора не ограничивается построением модели. После разработки модели в нее необходимо ввести определенную информацию, чтобы проверить, насколько приближаются воспроизводимые ею данные к ранее зарегистрированным экспериментальным данным, которые соответствуют введенной информации. Лишь в том случае, когда воспроизводимые данные достаточно близки к исходной информации, можно будет гарантировать определенный успех при использовании модели для экспериментирования.