Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

Т. Ю. Бугакова, П. Ю. Бугаков

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия для обучающихся по направлению подготовки
09.03.02 Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата)

Новосибирск
СГУГиТ
2020

УДК 004.94
Б90

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент НГТУ *В. С. Карманов*
кандидат технических наук, доцент, СГУГиТ *А. А. Колесников*

Бугакова, Т. Ю.
Б90 Моделирование систем [Текст] : учеб. пособие / Т. Ю. Бугакова, П. Ю. Бугаков. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 82 с.
ISBN 978-5-907320-58-1

Учебное пособие подготовлено кандидатами технических наук, доцентами Т. Ю. Бугаковой и П. Ю. Бугаковым на кафедре прикладной информатики и информационных систем СГУГиТ.

В пособии кратко изложены основные понятия теории моделирования систем, классификация видов моделирования систем, имитационные модели информационных процессов, математические методы моделирования информационных процессов и систем, формализация и алгоритмизация процессов функционирования информационных систем, основные понятия и методы планирования экспериментов на моделях систем.

Учебное пособие по дисциплине «Моделирование систем» предназначено для обучающихся по направлению подготовки 09.03.02 Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата).

Рекомендовано к изданию кафедрой прикладной информатики и информационных систем, Ученым советом Института геодезии и менеджмента СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 004.94

ISBN 978-5-907320-58-1
© СГУГиТ, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5

1. Основные понятия теории моделирования систем. Классификация видов моделирования систем 6

1.1. Понятие системы 6

1.2. Признаки существования системы 7

1.3. Определение содержательной части системы 8

1.4. Классификация видов моделирования систем 13

2. Имитационные модели информационных процессов 18

2.1. Понятие имитационной модели. Основные этапы имитационного моделирования на компьютере 18

2.2. Требования, предъявляемые к имитационным моделям 20

2.3. Основные принципы имитационного моделирования информационных процессов 21

3. Математические методы моделирования информационных процессов и систем. Формализация процессов функционирования информационных систем 23

3.1. Понятие математической модели 23

3.2. Методы определения математических моделей 25

3.3. Формы представления математических моделей 25

3.4. Обобщенная схема основных этапов математического моделирования 29

3.5. Методы реализации математических моделей 33

3.6. Оценка правильности математической модели 33

3.7. Математические схемы моделирования систем 34

3.8. Основные этапы разработки и исследования моделей на компьютере 39

4. Разработка концептуальных и блочных моделей систем. Алгоритмизация процессов функционирования информационных систем 41

4.1. Понятие концептуальной модели 41

4.2. Переход от описания к блочной модели 42

5. Логическая структура моделей. Построение моделирующих алгоритмов 44
5.1. Схемы алгоритмов 44
5.2. Этапы моделирования систем 48

6. Статистическое моделирование на компьютере. Системный анализ предметной области 50

7. Инструментальные средства. Языки моделирования 54

8. Планирование имитационных экспериментов с моделями 60
8.1. Понятие планирования эксперимента 60
8.2. Методы теории планирования эксперимента при проведении научно-исследовательских работ и научно-технических разработок 61
8.3. Стратегическое и тактическое планирование машинных экспериментов с моделями систем 65

9. Оценка точности и достоверности результатов моделирования. Анализ и интерпретация результатов моделирования на компьютере 68
9.1. Модель «черного ящика» 68
9.2. Модель «белого ящика» 71
9.3. Методы тестирования моделей систем 73
9.4. Способы устранения расхождения между реальностью и результатами моделирования 76

Заключение 79

Библиографический список 80

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Моделирование систем» содержит теоретические сведения для формирования у обучающихся общепрофессиональных компетенций, определяющих их способность применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности; применять математические модели, методы и средства проектирования информационных и автоматизированных систем в процессе изучения фундаментальных основ теории моделирования, вопросов теории построения компьютерных моделей и технологии использования моделирования как инструмента исследования и проектирования сложных систем, в том числе информационных систем.

Учебное пособие рекомендовано для изучения теоретического материала по дисциплине «Моделирование систем» у обучающихся по направлению подготовки 09.03.02 Информационные системы и технологии (уровень бакалавриата) и смежных с ним направлений подготовки.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ

1.1. Понятие системы

Система является основным понятием системного анализа. Существует много определений системы, и поскольку определение – это модель вербальная, то различия целей и требований к модели приводят к разным формулировкам одного и того же понятия.

Понятие «система» означает «целое, составленное из частей». Но такого понимания системы недостаточно, так как целое обладает свойствами, которые отличаются от свойств частей, из которых она состоит.

Системой называется некоторая совокупность частей (элементов и подсистем), объединенных общими ресурсами, функциональными связями между элементами, целью существования; обладающая свойствами, отсутствующими у отдельных ее частей. Система выделена в окружающей среде как единое целое и взаимодействует через ее входы и выходы, поэтому все объекты любого происхождения можно рассматривать как системы. Солнечная система, гидросфера, компьютер, автомобиль, торговый комплекс – все это примеры естественных и искусственных систем [1].

Любая система предназначена для достижения некоторой цели. Прежде чем ответить на вопрос «что такое цель системы?», необходимо отметить, что все системы возникают вследствие возникновения некоторой эмпирической ситуации, расплывчатой и сложной, которая называется проблемной ситуацией. Необходимость разрешения проблемной ситуации определяет потребность построения системы.

Субъективный или объективный результат, разрешающий проблему, является *целью системы*. Человек определяет субъективные цели, а природа – объективные. Без цели ни одна система не имеет смысла существования.

Будущее состояние системы и окружающей среды, которое реально состоится в результате осуществления объективных закономерностей, представляет собой *объективную цель*.

Образ желаемого, но неосуществимого будущего состояния системы и окружающей среды называется *субъективной целью*. Например, полет на другие планеты является пока целью субъективной. Субъективные цели могут быть достижимыми или недостижимыми. Если цель противоречит законам природы, то она является недостижимой. Например, создание вечного двигателя – недостижимая субъективная цель.

1.2. Признаки существования системы

Объективно понять, что рассматриваемый объект представляет собой систему, а не множество разрозненных элементов, можно по некоторым критериям (признакам).

1. Любая система должна обладать *целостностью* и выделяться из окружающей среды, быть обособленной от нее. Свойство целостности системы не предполагает неделимости или однородности. В системе всегда различают составные части. Части в системе не изолированы друг от друга, они взаимосвязаны функциональными связями и образуют целое благодаря этим связям.

2. В целом система имеет свойства, которых нет у ее структурных частей. Это свойство появляется тогда, когда система как целое начинает взаимодействие с внешней средой через входы и выходы.

3. Поскольку все части системы имеют функциональные взаимосвязи, то воздействие на какую-либо ее часть неизменно повлечет за собой изменение свойств других элементов этой системы. То же самое произойдет, если изъять часть из системы или, наоборот, добавить. Именно в этом проявляется внутренняя целостность систем. Без нарушения свойства целостности системы нельзя рассматривать структурные ее части вне их взаимодействия друг с другом.

4. Все системы открыты, так как они существуют в среде, взаимодействуют с ней, обмениваются со средой веществом, энергией, информацией. Поэтому не существует изолированных (замкнутых) от среды систем. Доказать существование замкнутых (изолированных) систем невозможно. Ясных и объективных доказательств их существования нет, так как такие системы не обмениваются со средой веществом и энергией. Обмен может

происходить только в виде информации. Поэтому изолированные системы являются абстракцией.

5. Открытые системы, связанные со средой, всегда являются частью другой большей системы. И наоборот, любая открытая система может включать в себя более мелкие системы (подсистемы).

6. Любая система имеет цель своего существования. Цель всегда диктует *структуру* и *функцию* системы. Целеустремленность системы определяется *функцией* системы, а ее *структура* является вариантом реализации цели.

7. Все системы динамичны, так как в результате внутренних и внешних взаимодействий они изменяются. Цель может изменяться, система адаптируется (подстраивается) под ее достижение. В том случае, если система не адаптируется к достижению новой видоизмененной цели, то такая система перестанет существовать. Ярким примером такой адаптации является эволюция живых организмов на земле. Поэтому структурную адаптацию систем можно назвать эволюцией [1, 3].

1.3. Определение содержательной части системы

Внутреннее строение объектов неоднородно (если это не монолитный, неделимый объект). Объект может быть разделен на части, в которых, в свою очередь, могут быть выделены составные части и т. д. В связи с этим возникает необходимость структурирования системы.

Поэтому различают элементарные (неделимые части) и сложные части (подсистемы). *Простыми, элементарными частями (элементами) системы* считаются условно неделимые (монолитные). Например, деревья – элементы системы «лес», обучающиеся в вузе – элементы системы «вуз». Однако неделимость систем весьма условна.

Сложными частями (подсистемами) системы считают совокупность элементов, которые объединены функциональными отношениями и ресурсами. Малые планеты в Солнечной системе, устройства в компьютере можно назвать подсистемами [1, 2].

Объединение элементов в системе порождает новое, системное свойство, характеризующее не каждый отдельный элемент, а всю систему в це-

лом. Количественные показатели системного свойства называются *интегральными характеристиками систем*. Когда говорится об элементарном объекте, то нужно понимать, что элементарность – понятие относительное. То, что с одной стороны является элементом, с другой оказывается подсистемой, которая может быть разделена на части. Зависит «элементарность» структурных частей системы от целей. Одна и та же система может агрегировать разные элементы в зависимости от того, какая преследуется цель [3].

Состав системы в общем виде представлен на рис. 1.1.

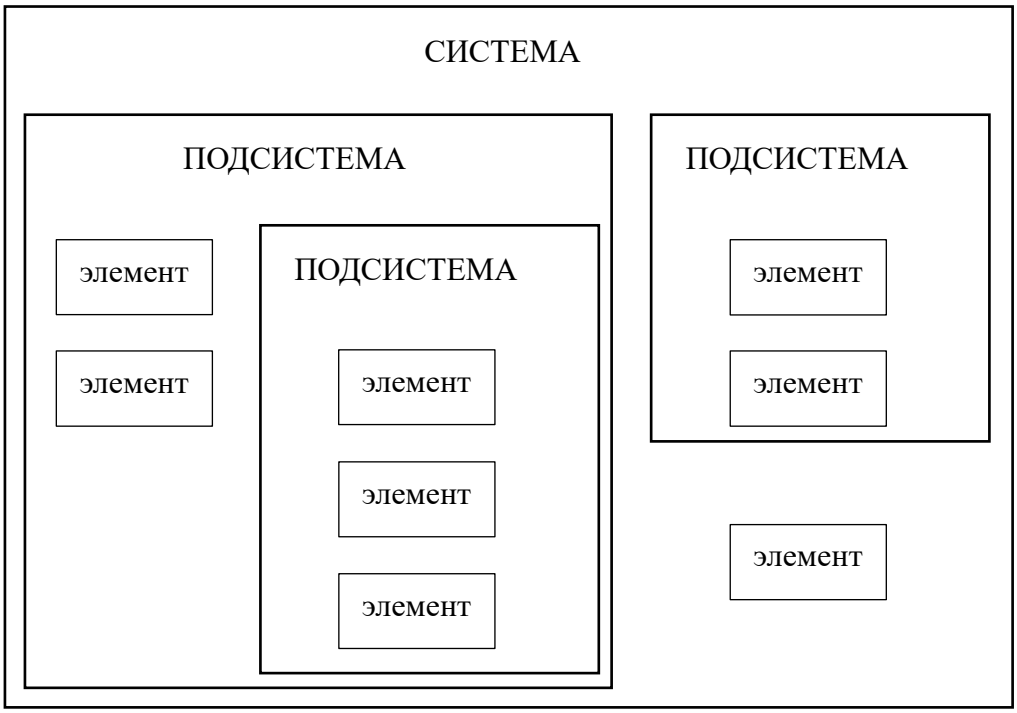


Рис. 1.1. Состав системы

Примером модели состава системы может служить материнская плата компьютера (рис. 1.2), где четко прослеживается как совокупность отдельных элементов, так и выделение элементов в группы (подсистемы).

Выбор элементарных объектов напрямую зависит от сложности и изученности объекта, а также целей построения системы. Таким образом, любая система может быть представлена различным набором элементарных объектов, которые подбираются в систему на основании ценности своих свойств, для достижения общей цели системы.

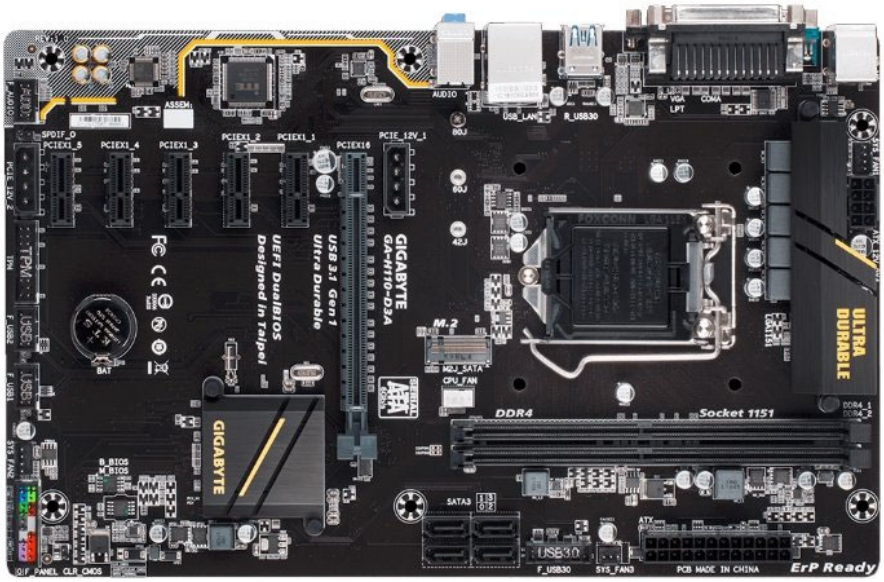


Рис. 1.2. Материнская (системная) плата компьютера

Системное свойство (свойство, присущее системе в целом), которое отсутствует у каждого элемента в отдельности, называют *свойством эмерджентности (системообразующим свойством)*. Этим свойством элементы системы в отдельности не обладают. Оно проявляется в результате взаимодействия системы с окружающей средой и путем взаимодействия друг с другом. Это и есть тот результат, для которого существует система. Например, свойством эмерджентности высшего учебного заведения служит то, что все элементы (факультеты), входящие в систему, рассматриваются относительно других вузов как самостоятельный, неделимый объект, основной целью которого является подготовка специалистов высшей квалификации.

Особенность в определении состава системы (т. е. того, из чего она состоит) заключается в том, что границы между подсистемами условны и разделение целостной системы на части является относительным. Так же относительны и границы между системой и окружающей средой, т. е. форма системы.

Если система утрачивает какой-то элемент, то система теряет не только свойства этого элемента, но и часть системных свойств. Элемент, изъятый из системы, тоже теряет свойства, которые проявлялись в результате его взаимодействия с другими элементами в рамках системы. В связи

с этим, изучая каждый элемент в отдельности, невозможно познать все свойства системы в целом.

Устанавливая функции взаимосвязи (отношения) между элементарными объектами, можно найти информацию, описывающую объект в целом. Множество связей (отношений) между элементарными объектами, необходимых и достаточных для достижения цели, называется *структурой объекта*.

Распределение функций между частями объекта между собой и внешней средой определяют понятие структуры системы. Реальные объекты могут иметь огромное количество отношений между собой, однако существенными для достижения цели являются лишь некоторые. Поэтому в структуре системы учитывается только количество связей, существенных для достижения цели.

Устройство объекта полностью определяют состав и структура системы. Сущность организации системы, которая проявляется в агрегировании элементов и приводит к возникновению новых свойств, отличных от свойств элементов, называется *принципом организации*. Разные принципы организации приводят к созданию систем, отличающихся своими структурами, но тождественных по функциональному назначению. Разнообразие структур определяется сложностью объекта. Самыми распространенными структурами являются линейные, иерархические (древовидные), сетевые и матричные структуры, изображенные на рис. 1.3–1.6.

Линейная структура устанавливает связь между элементарными объектами в линейную зависимость, т. е. подчиненность последующего элемента предшествующему элементу (см. рис. 1.3).

Примерами линейных структур являются: схема линейного алгоритма, список обучающихся в алфавитном порядке в группе, схема маршрута автобуса и т. д.

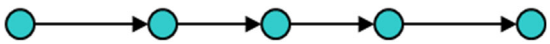


Рис. 1.3. Линейная структура

В *иерархических* (древовидных) структурах существует строгая подчиненность элементов последующего уровня элементам вышестоящего уровня (рис. 1.4). При этом связи между элементарными объектами одного уровня, как правило, запрещены, хотя допускаются и исключения. В этом случае иерархическая структура превращается в сетевую.

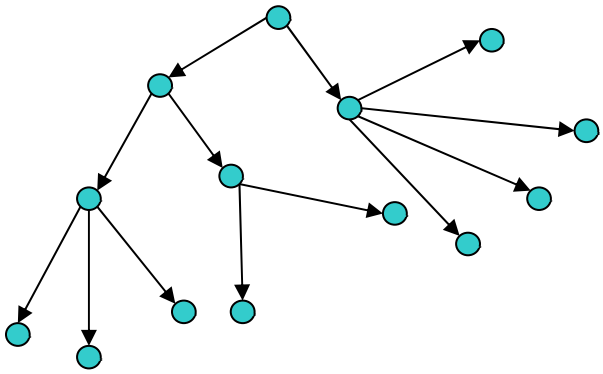


Рис. 1.4. Иерархическая (древовидная) структура

Ярким примером иерархической структуры является структура власти, генеалогическое древо, файловая структура и т. д.

Сетевые структуры представляют собой объединение иерархических структур. В них связи между элементарными объектами определяются произвольно, где каждый элементарный объект может быть связан с любым другим элементом системы (рис. 1.5).

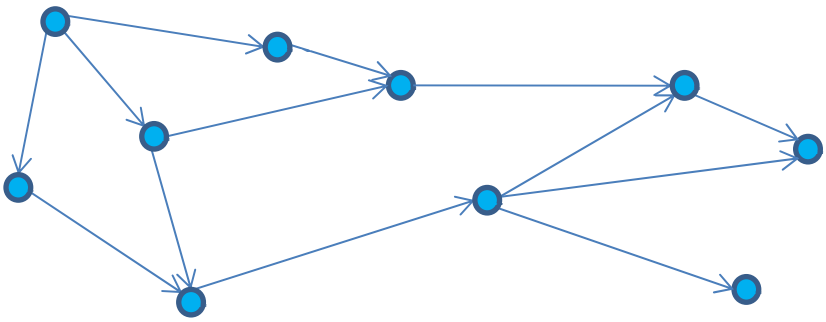


Рис. 1.5. Сетевая структура

Примером сетевой структуры является принцип соединения компьютеров в сети.

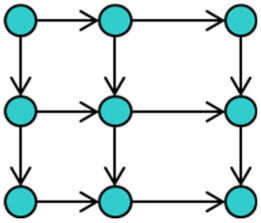


Рис. 1.6. Матричная структура

Матричные структуры обычно представлены двумерными таблицами и отображают отношения между элементарными объектами, где каждый элемент располагается на пересечении строк и столбцов (рис. 1.6).

Пример такой структуры – файловая система, таблица Excel и др.

Система образует целое благодаря связям между ее элементами. Связи определяют правила функционирования системы. По характеру связи бывают прямыми и обратными, а по виду проявления (описания) – детерминированными и вероятностными.

Для передачи вещества, энергии, информации от одного элемента к другому в рамках одного процесса существуют *прямые связи*.

Обратные связи отражают изменение состояния системы в результате управляющего воздействия на нее. Без использования обратных связей процессы управления, адаптации, саморегулирования, самоорганизации, развития невозможны [1, 3].

1.4. Классификация видов моделирования систем

Классификация всегда основана на распознавании образов. Процесс классификации напрямую зависит от целей моделирования. Элементы системы подбирают по признакам (характеристикам), необходимым для достижения целей моделирования системы. На рис. 1.7 приведена классификация, основанная на четырех признаках, определяющих целенаправленное содержание системы.

Детерминированное и стохастическое моделирование основаны на характере процессов, учитываемых в модели системы [4].

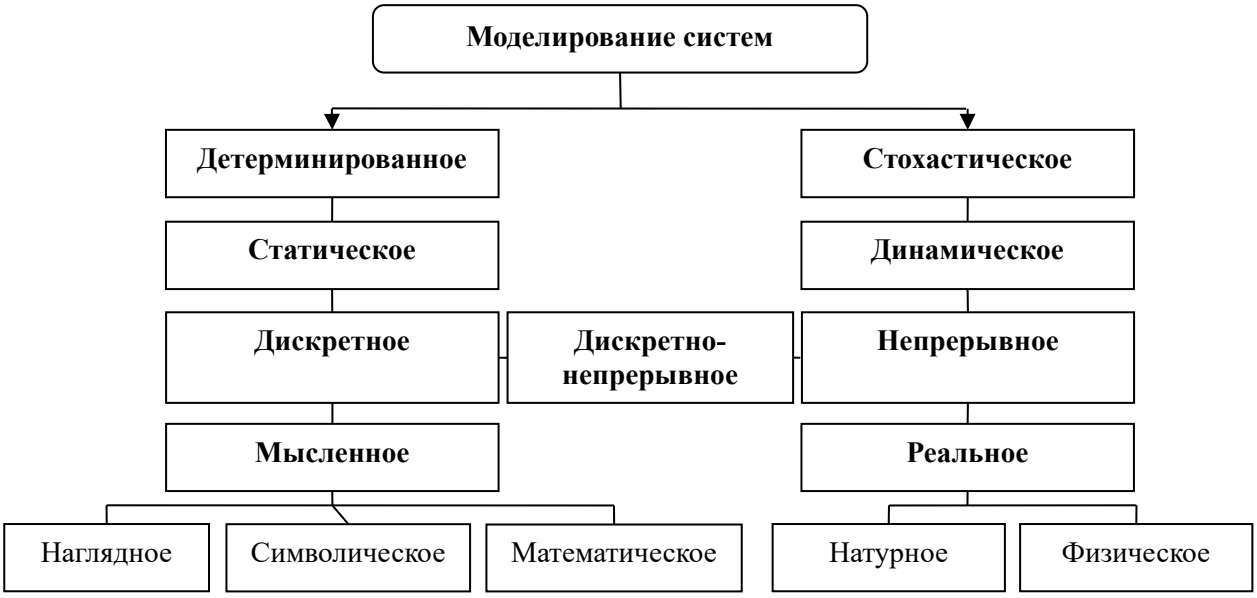


Рис. 1.7. Классификация видов моделей систем

В детерминированных моделях систем поведение объекта определяется конкретными значениями начальных условий и входных переменных. В них отсутствуют любые случайные изменения, например, влияние внешних воздействий, внутренних процессов. В таких моделях все точно определено и предсказуемо.

В стохастических моделях присутствуют случайные процессы, а независимой переменной служит время. Подобные модели характеризуются плотностями или функциями распределения вероятностей и средними значениями смещения и распределения, например, математическим ожиданием и дисперсией.

По фактору времени выделяют статические и динамические модели систем.

Статические модели систем предназначены для описания состояния объекта в дискретные моменты времени. Динамическое же моделирование отражает поведение объекта во времени. Примеры статических моделей: карта местности, схема персонального компьютера и т. д.

Динамические модели – модели, в которых все процессы в системах рассматриваются в зависимости от фактора времени. Функционирование динамических моделей происходит так же, как и в статических, но с явным указанием роли времени.

Дискретное моделирование служит для описания процессов, которые предполагаются дискретными, т. е. конечными относительно какой-либо шкалы, например, времени. Непрерывное моделирование позволяет отразить непрерывные процессы в системах. Дискретно-непрерывное моделирование позволяет выделить наличие как дискретных, так и непрерывных процессов. Пример: определение состояний объекта в дискретные моменты времени на непрерывной временной оси.

В дискретном моделировании определены значения функции в определенные (дискретные) моменты времени. В промежутках между дискретными значениями функция не определена.

Мысленное и реальное моделирование подразделяет модели в зависимости от формы представления объекта. Зачастую мысленное моделирование является единственным способом моделирования объектов, которые либо практически невозможно реализовать, либо в настоящее время

нет условий, при которых была бы возможность их физического создания. Например, с помощью мысленного моделирования могут быть проанализированы процессы, происходящие на других планетах, не поддающиеся физическому эксперименту.

Мысленное моделирование может быть классифицировано в виде наглядного, символического и математического. Наглядные модели создаются на основе представлений человека о реальных объектах и воспроизводят существенные для достижения цели свойства изучаемого объекта, что позволяет создать объект-«заместитель» для его изучения.

Процесс создания объекта, в котором все свойства объекта заменены определенными символами, представляет собой символическое моделирование. Примером может служить текст, формула, алгоритмические языки программирования, совокупность знаков, обозначающих правила дорожного движения, и т. д.

Математическая модель служит для исследования процесса функционирования любой системы формальными, математическими методами. Замена реального объекта математическим представляет собой математическое моделирование. А объект-аналог, свойства которого представлены математическим соотношениями, – математическую модель. Необходимо заметить, что математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения к действительности. Математическая модель является абстрактной моделью.

Реальное моделирование дает возможность исследования различных характеристик на реальном объекте. Оно является наиболее адекватным, однако некоторые его возможности ограничены с учетом особенностей реальных объектов.

Пример: проведение реального моделирования – землетрясения, что в большинстве случаев невозможно.

В свою очередь, реальное моделирование делится на натурное и физическое.

Проведение исследований на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия называется *натурным* моделированием. При функционировании объекта в соответствии с поставленной целью выявляются закономерности протекания ре-

ального процесса. Пример натурных моделей: манекен, кукла, игрушка и т. д.

Физическое моделирование представляет собой другой вид реального моделирования и отличается от натурного тем, что проводится на физических установках, отображающих природу явлений и обладающих физическим подобием. На физических установках воспроизводятся свойства реального объекта, функции взаимодействия его с окружающей средой. Примерами физической модели могут служить материальная точка, абсолютно твердое тело, математический маятник или идеальный газ.

Физическое моделирование включает моделирование в реальном масштабе времени и в нереальном (измененном) масштабе времени. При реальном моделировании исследования могут выполняться на самом объекте, на его части или на его модели. В последнем случае изучению подлежат так называемые замороженные процессы, которые фиксируются в некоторый момент времени. Пример: идеальный газ, идеальная жидкость.

Наибольший интерес представляет физическое моделирование в реальном масштабе времени. Например, модель организационного управления цехами и участками или управления технологическими процессами выпуска различных изделий.

Другая классификация моделирования систем по способу отображения объектов делит модели на два класса: 1-й класс – изобразительные, аналоговые и символьные; 2-й класс – познавательные и прагматические.

Изобразительная модель – простейший из типов моделей. Это подобие оригинала, которое отображает лишь внешние свойства объектов.

Пример: фотографии, картины, скульптуры и пр.

Аналоговые модели имеют природу, отличную от природы реального объекта. В основе своей это вспомогательные объекты-заместители. Проще говоря, это модели, в которых совокупность одних свойств представляется в виде совокупности других свойств.

Пример: лекарства, разные по названию, но обладающие одним и тем же действием при абсолютно разном ингредиентном составе.

Модели, в которых объекты описываются на формальном языке, состоящем из конечного набора символов, правил, отношений между ними и правил интерпретации этих символов, являются *символьными моделями*.

Пример: алгоритмические языки программирования, азбука Морзе.

Формы организации и представления знаний посредством соединения новых знаний с имеющимися представляют собой *познавательные модели*. В таких моделях всегда отображается реальность, т. е. модель «подгоняется» под реальность. Примерами познавательных моделей являются схема развития Вселенной, механизм эволюции организмов.

Способ представления образцово-правильных действий или их результатов являются *прагматическими моделями*. Эти модели имеют нормативный характер и играют роль стандарта. В прагматических моделях действительность всегда «подгоняется» под модель. Примеры прагматических моделей: план мероприятия, список покупок, список учеников в классе.

2. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Понятие имитационной модели. Основные этапы имитационного моделирования на компьютере

Далеко не всегда возможно изучить сложную систему, тем более, когда нет возможности для натурного эксперимента. В этом случае применяется имитационное моделирование. Имитационная модель не описывает объект моделирования, а имитирует его с целью получения новой информации об объекте исследования [1, 5].

Имитационное моделирование – это создание модели, в которой реализуется задача: путем имитации элементарных явлений, составляющих процесс, определить функционирование системы во времени. С появлением современных информационных технологий имитационное моделирование стали выполнять на компьютере, поэтому в последующем его стали называть компьютерным моделированием. Основные этапы имитационного моделирования на компьютере представлены на рис. 2.1.

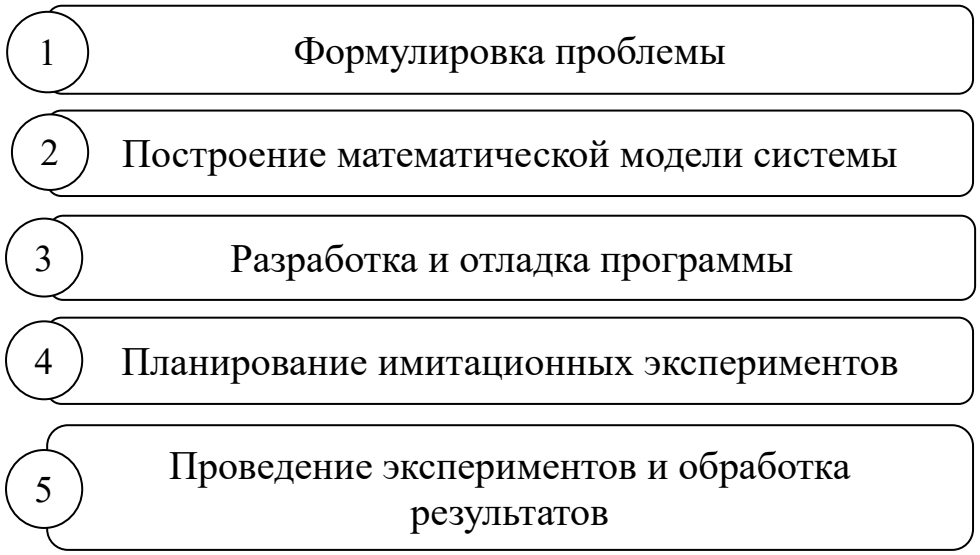


Рис. 2.1. Этапы имитационного моделирования

Суть имитационного моделирования заключается в декомпозиции всей системы исследования на структурные части. При этом должно соблюдаться условие сохранения всех функциональных связей между частями системы и возможность их воспроизведения при помощи математических алгоритмов. За счет этого появляется возможность управлять процессом имитации и анализировать результаты. Возможную реальность в имитационном моделировании можно воспроизводить путем изменения некоторых параметров изучаемой системы [1, 2, 5, 6].

Имитационное моделирование позволяет воспроизводить и изучать как непрерывные, так и дискретные динамические процессы в системах.

На основании принципа Δt обычно выполняют имитационное моделирование непрерывных динамических процессов. А имитацию динамики систем, где изменение состояний происходит в отдельные моменты времени, – при помощи принципа особых состояний.

В первом случае для моделирования динамических процессов составляется их математическое описание. На основании этого составляются моделирующие алгоритмы, при этом сохраняется последовательность протекания процессов, а также сохраняется их логико-информационное описание. Последовательный моделирующий алгоритм получается путем развертывания квазипараллельных процессов функционирования в системе по принципу Δt.

Согласно принципу Δt, непрерывная шкала времени $[0; T]$, относительно которой рассматривается работа системы, разбивается на интервалы конечной длины Δt. Таким образом происходит дискретизация процесса по времени. После этого последовательно на каждом интервале вычисляются все значения процесса. При высокой частоте дискретизации можно добиться хорошего приближения имитируемых процессов к процессам, протекающим в системе. В данном случае, чем выше дискретизация, тем точнее получается результат, однако нагрузка вычислительных операций на процессор возрастает.

Однако этот способ малоэффективен для имитации дискретных процессов, смысл которых состоит в изучении перехода системы из состояния в состояние, когда в промежутках между переходами состояние системы остается неизменным.

Смысл заключается в том, что каждый такой переход связан с наступлением некоторого события в системе. Им может стать отказ элемента, достижение системой заданного порогового значения и др. И если это событие наступает в промежуток между определяемыми значениями процесса в дискретные моменты Δt, то такое состояние может остаться «незамеченным». Поэтому имитацию процессов в системах, где изменение состояний происходит в отдельные моменты времени, выполняют при помощи принципа особых состояний.

Принцип особых состояний позволяет выполнить построение алгоритма имитации. С его помощью можно представить процесс в виде совокупности параллельно протекающих подпроцессов. Каждый такой подпроцесс определяется последовательностью событий, при которых происходит изменение состояния системы. При этом подпроцессы не являются независимыми, они взаимодействуют друг с другом.

Для организации совокупности параллельно протекающих подпроцессов в единый последовательный алгоритм необходимо упорядочить во времени моменты наступления событий в каждом из процессов.

Получение имитационной модели алгоритма функционирования системы достигается путем сканирования ранжированных по времени особых состояний и выполнения имитации реакции системы на происходящее событие. В этом и состоит содержание принципа особых состояний.

2.2. Требования, предъявляемые к имитационным моделям

Существует ряд требований, предъявляемых к имитационным моделям. Имитационная модель должна:

1. Быть полной в информационном плане, адекватной, должна обеспечивать возможность включения дополнительных параметров и их изменений. Это обеспечивает требуемую точность воспроизведения исследуемого объекта. Для учета большого числа результатов моделирования и результатов исследования в целом модель должна удовлетворять критериям полноты и воспроизводить все функции, которые необходимо учитывать при исследовании объекта, то есть быть функциональной.

2. Быть абстрактной, чтобы оперировать большим числом переменных. Причем физический смысл исследуемого объекта и возможность оценки полученных результатов не должны быть потеряны.

3. По временным и материальным ресурсам не выходить за рамки ограничений при решении задач. Допустимое время решения определяется временем функционирования объекта.

4. Быть физически осуществимой, т. е. реализуемой на уровне современных технологий.

5. В рамках поставленной задачи исследования обеспечивать получение полезной информации об объекте. Это требование оптимизации модели: определять проблемную ситуацию и позволять находить пути ее разрешения средствами полученной информации.

6. В процессе построения использовать общепринятую терминологию.

7. Обеспечивать проверку адекватности реальному объекту и целям моделирования на каждом этапе реализации.

8. Обладать устойчивостью по отношению к погрешностям и ошибкам в исходных данных. Это важно при принятии решений в условиях неопределенности развития внешней среды, неопределенности проблемных ситуаций внутри объекта, условий прогнозирования параметров системы [7].

2.3. Основные принципы имитационного моделирования информационных процессов

Принципы системных исследований и моделирования совпадают с требованиями имитационного моделирования [1, 5, 6].

1. Принцип информационной достаточности. Построение модели системы невозможно при полном отсутствии информации об изучаемой системе. Моделирование системы лишено смысла, если имеется полная информация о ней. Существует некий критический уровень априорных сведений о системе, при достижении которого может быть построена ее адекватная модель.

2. Принцип осуществимости. Достижение поставленной цели исследования модель должна обеспечивать за конечное время и с вероятностью,

существенно отличающейся от нуля. Задают приемлемую границу t времени достижения цели и пороговое значение P_y вероятности ее достижения. Если может быть выполнено условие $P(t) > P_y$, то модель считают осуществимой.

3. Принцип множественности моделей. В первую очередь в модели отображаются те свойства реальной системы (или явления), которые влияют на показатель эффективности. Использование конкретной модели дает возможность познания лишь некоторых сторон реальности. Необходимо несколько моделей, позволяющих с разных сторон и с разной степенью детальности отражать рассматриваемый процесс для более полного ее исследования.

4. Принцип агрегирования. Модель системы должна создаваться от частного к общему, т. е. агрегировать свойства элементов в системное свойство системы.

5. Обычно сложную систему можно представить в виде агрегатов (подсистем), для адекватного математического описания которых применяют некоторые стандартные математические схемы.

Реализация имитационного моделирования выполняется посредством прикладного программного обеспечения и инструментальных средств, набора математических приемов и методов, позволяющих проводить в режиме «имитации» целенаправленное моделирование сложного процесса и оптимизацию некоторых его параметров.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

3.1. Понятие математической модели

Математическую модель объекта получают путем его описания математическими средствами, которые позволяют при помощи формальных процедур заменять свойства реальных объектов математическими [1, 2]. В связи с этим все операции и преобразования в математических моделях осуществляются над математическими объектами: векторами, множествами, числами, матрицами, функциями и т. д. В общем виде математическая модель объекта представляется уравнением

$$F(X,Y) = \text{const}, \tag{3.1}$$

где X, Y – множества управляемых и неуправляемых параметров модели.

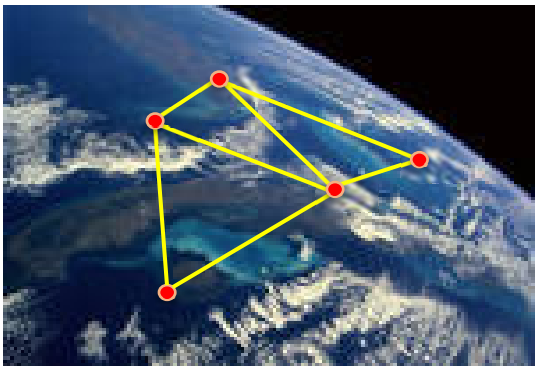
Формализация предполагает построение некоторой структуры с целью логического описания и понимания изучаемого объекта.

Построение математических моделей, как и любых других, начинается с выявления и формального описания всех имеющихся сведений об объекте моделирования. Математическая модель должна соответствовать уровню знаний об объекте, поскольку исходные данные могут быть не известны в полной мере.

Описание объекта начинается с определения его состояния в данный момент времени. Это состояние называют фазовым состоянием, а численные значения параметров модели, соответствующие этому состоянию, – фазовыми координатами. Под действием внешних сил или внутренних процессов происходит изменение состояния объекта, что выражается в изменении фазовых координат.

Рассмотрим несколько простых примеров математических моделей реальных объектов.

Пример 1. Объект моделирования – фрагмент участка земной поверхности (рис. 3.1). Этот объект можно описать разными моделями: изобразительной (фотоснимок из космоса), аналоговой моделью (карта, глобус). В том случае, если будут известны координаты точек поверхности, математической моделью будет уравнение поверхности $AX + BY + CX \pm D = 0$.



$$AX + BY + CZ \pm D = 0$$

Рис. 3.1. Математическая модель участка земной поверхности

Пример 2. Пусть требуется найти расстояние между двумя материальными точками. Данные – координаты X и Y каждой точки. Применяя математические методы обработки, можно вычислить расстояние между двумя точками. Вычисленное расстояние будет являться математической моделью объекта (рис. 3.2).

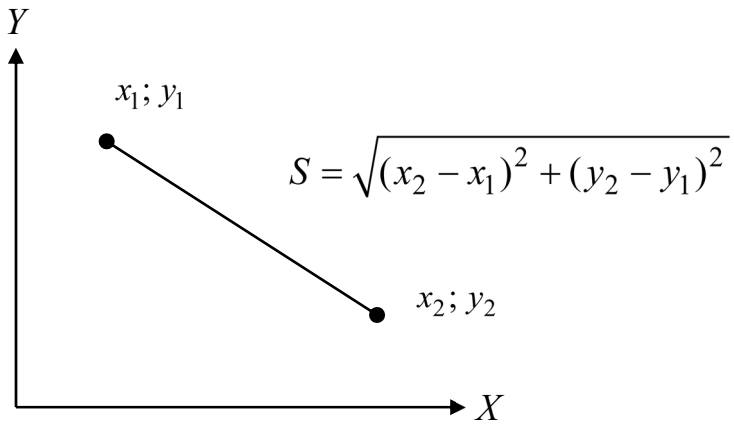


Рис. 3.2. Математическая модель объекта

3.2. Методы определения математических моделей

В математических моделях осуществляется абстрактное, упрощенное или приближенное описание объектов моделирования. Это происходит в результате замены реальных объектов математическими, поэтому в создании математических моделей участвуют два метода математики – аксиоматический и конструктивный.

Аксиоматический метод основан на процедуре перехода из предметной области к абстрактной модели, которая определяется непротиворечивым набором правил (аксиом). Свойство непротиворечивости системы аксиом (совместимость) заключается в том, что она не позволяет вывести противоречия, т. е. двух предложений, одно из которых является отрицанием другого.

Недостатком аксиоматического метода является то, что он лишь формирует утверждение о существовании модели и не определяет пути реализации. Связывает утверждение о существовании модели с возможностью ее построения *конструктивный* метод. Конструктивное определение модели зависит от способа ее построения. Построение конструктивной модели подтверждает непротиворечивость аксиоматического определения.

3.3. Формы представления математических моделей

Математические модели по форме представления подразделяются на аналитические, алгоритмические, графические и цифровые.

В *аналитической* форме представления запись модели выполняется в виде параметрических, явных, неявных функций, интегральных и дифференциальных уравнений или других аналитических выражений, связывающих управляемые и неуправляемые переменные и цель моделирования. Преобразование математических моделей в аналитической форме возможно в соответствии с законами математики.

Пример 1. Пусть требуется найти площадь треугольника (рис. 3.3), заданного тремя точками с координатами $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$, (X_3, Y_3, Z_3).

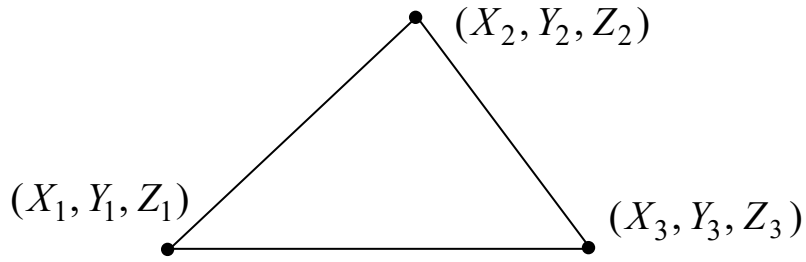


Рис. 3.3. Треугольник с известными длинами

По формуле Герона вычислим площадь треугольника:

$$S = \sqrt{p \cdot (p-a) \cdot (p-b) \cdot (p-c)}, \tag{3.2}$$

где a, b, c – стороны треугольника;

p – полупериметр.

Формула (3.2) и есть искомая математическая модель для определения площади треугольника, полученная аналитическим образом и представленная в аналитической форме. Математические модели, представленные в аналитической форме, позволяют выявить наиболее общие закономерности, присущие объекту моделирования.

Высокая степень общности и значимости результатов моделирования является достоинством математических моделей, представленных в аналитической форме. Высокая чувствительность к степени сложности объекта является их недостатком, так как сложные объекты в данном случае представляются грубо и неточно. Разновидностью моделей, представленных в аналитической форме, являются инвариантные модели. Инвариантность модели определяется относительно какой-либо совокупности преобразований. Если модель не изменяется при заданной совокупности преобразований, значит, она инвариантна.

В *алгоритмической* форме модель представляется в форме алгоритма, т. е. в виде последовательности действий и операций над исходными данными с целью получения результата.

В модели, представленной в алгоритмической форме, указывается алгоритм в виде последовательности действий от исходных данных к искомому результату.

Модель объекта в *цифровой* форме представляет собой упорядоченный набор чисел (Y_i) из некоторого допустимого множества значений и алгоритм (F), функционально связывающий множество чисел Y_i.

Примером представления математической модели объекта в цифровой форме является цифровая модель рельефа, состоящая из последовательности отметок точек, отделенных друг от друга конечными интервалами, и алгоритмов аппроксимации этой информации.

Другим примером является программная реализация модели в алгоритмической форме.

Графическая форма модели всегда представляется на некотором графическом языке, например, на языке эквивалентных схем, диаграмм, языке графов и т. д.

Эквивалентная схема – это схема реального устройства, где наглядно отражается состав устройства, параметры элементов состава, функциональные процессы в нем. Яркими примерами эквивалентных схем являются схемы радиоприемника, телефона, телевизора и других устройств (рис. 3.4).

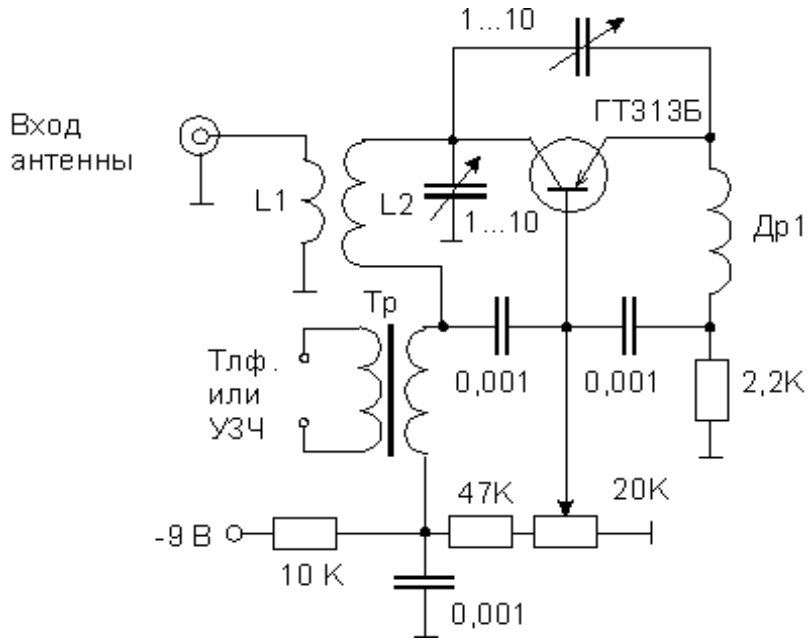


Рис. 3.4. Пример эквивалентной схемы

Один из способов изображения зависимости между объектами осуществляется с помощью диаграммы или графика. При этом диаграммы

могут использовать различные системы координат, например, прямоугольные диаграммы строятся в прямоугольной системе координат, а круговые – в полярной системе координат. Графики отображают изменение числовых параметров объекта, как правило, в прямоугольной системе координат. Примеры диаграмм разных типов показаны на рис. 3.5.

Рис. 3.5. Примеры диаграмм

Отображение объекта моделирования в виде множества элементарных объектов, связанных функциональными отношениями, осуществляется с использованием языка графов. Элементарные объекты могут быть интерпретированы как точки и называются вершинами графа. Функциональные зависимости изображаются в виде линий, соединяющих вершины, и называются ребрами графа. Графом называют объект, состоящий из двух множеств (множества точек и множества линий), которые между собой находятся в некотором отношении. Вершины графа могут быть соединены между собой любым количеством ребер (рис. 3.6). Если одна вершина соединена сама с собой, то такая связь называется петлей. Простейшими примерами графов могут служить структурные схемы, схемы дорог, маршрутов общественного транспорта и т. д.

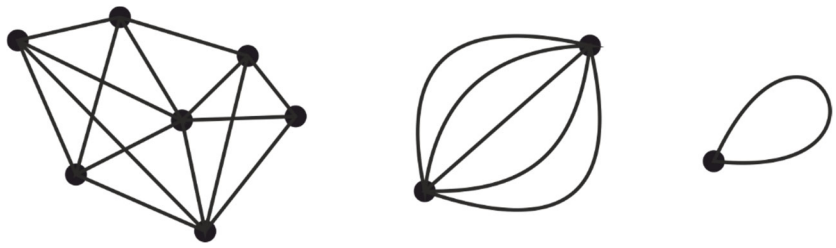


Рис. 3.6. Пример форм графов

Например, между коллегами по работе может быть несколько форм отношений: партнеры по бизнесу, друзья, родственники.

3.4. Обобщенная схема основных этапов математического моделирования

Математическая модель может быть сформирована в результате:

1) изучения и обобщения информации, полученной при выполнении экспериментов;

2) исследования частных моделей и их обобщения методом индукции;

3) применения процесса дедукции, в результате которого модель формируется из некоторой более общей модели и рассматривается как частный случай.

Необходимость построения математической модели возникает тогда, когда появляется некая сложная, расплывчатая ситуация, точное описание которой представляется затруднительным процессом. Такая ситуация называется проблемной ситуацией.

Процедура построения математической модели представляет собой преобразование проблемной ситуации к виду, когда ее изучение может быть осуществлено с использованием математических методов (рис. 3.7).

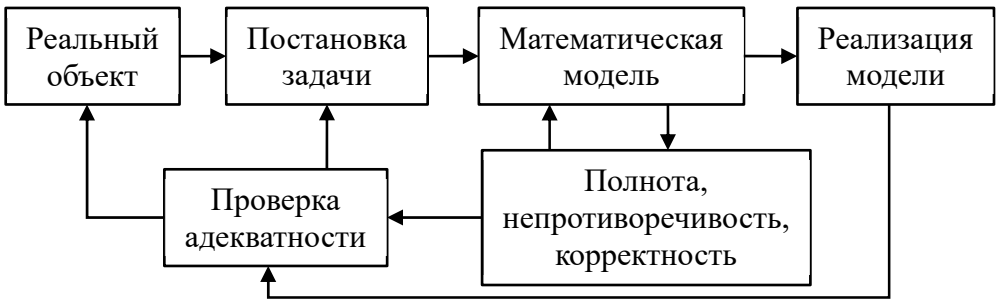


Рис. 3.7. Общая схема построения математической модели

Рассмотрим этапы математического моделирования.

Первый этап – абстрагирование.

1. Процесс математического моделирования начинается с изучения и анализа объекта. При этом выявляются его основные, существенные особенности (свойства), необходимые для достижения целей. Свойства, не имеющие практической значимости для конечного результата, исключаются из процесса моделирования.

2. Устанавливаются и математически описываются, т. е. формализуются, связи между элементами.

3. Анализируются цели исследования. Они могут быть качественными и количественными.

Измерить степень достижения качественных целей очень трудно. Эти цели в основном носят описательный характер. В связи с этим показатели качественных целей сопоставляют с некоторыми условными шкалами, например: оценить качество знаний обучающегося можно, сопоставив результат с условной шкалой в баллах.

Второй этап – постановка задачи.

Формулировка задачи в процессе моделирования может меняться или уточняться. Корректировка задачи в процессе моделирования идет непрерывно. В процессе постановки задачи могут быть отвергнуты те стратегии, которые не могут быть использованы из-за ограниченности ресурсов. В результате определяются критерии эффективности, которые должны позволять выбирать наиболее эффективные стратегии достижения целей.

Третий этап – создание математической модели – состоит из формализации функционирования всех элементов и процессов объекта. Полученная модель должна быть непротиворечивой и корректной.

Задача называется корректной, если существует ее решение; оно устойчиво, единственно и непрерывно зависит от исходных данных. В процессе создания математической модели используется два подхода.

Первый подход основан на принципе Δt. Сущность данного подхода заключается в следующем. Определяется состояние $x(t)$ моделируемого объекта на момент t и оператор T, представляющий процедуру перехода объекта в состояние $x(t+\Delta t)$, как показано на рис. 3.8.

Состояние $x(t)$ сопоставляется с точкой фазового пространства F. Изменение состояния объекта представляет собой траекторию в фазовом пространстве, называемой фазовой траекторией. Таким образом, математическая модель объекта определяется фазовым пространством F и оператором T.

При таком подходе исследование объекта на математической модели сводится к изучению способов декомпозиции (деления) фазового пространства на траектории, зависящие от физических параметров объекта.

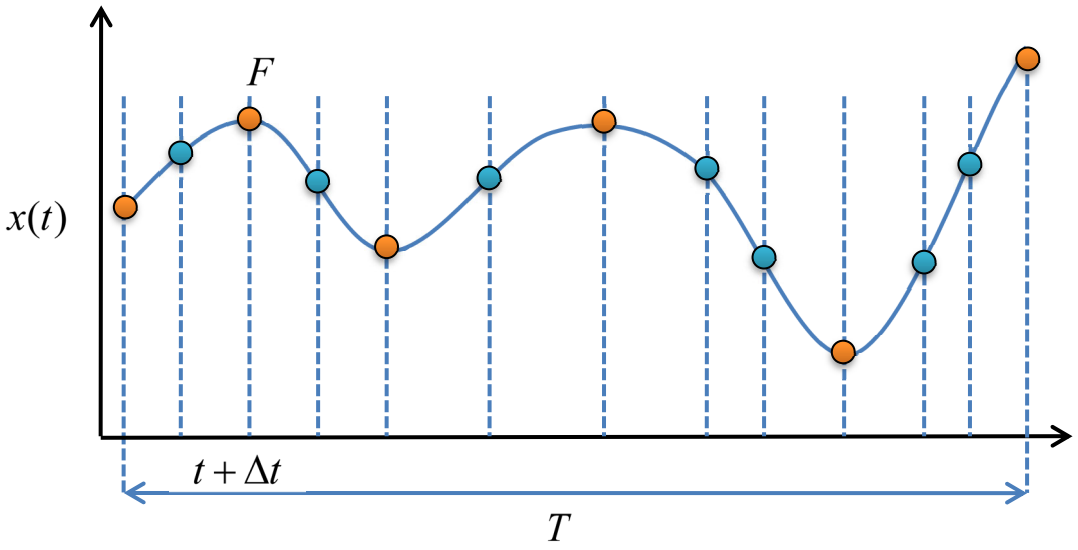


Рис. 3.8. Создание математической модели по принципу Δt

Второй подход основывается на принципе особых состояний, в которых модель рассматривается в концепции «черного ящика» с известными «входами» и «выходами», связанными между собой оператором T. Математическая модель определяется пространством входов и выходов, а также оператором T. При этом знать внутреннюю структуру моделируемого объекта не требуется (рис. 3.9). Суть математической модели заключается в изучении перехода системы из состояния в состояние, причем в промежутках между переходами состояние объекта остается неизменным.

Выполнение экспериментов, оценка адекватности модели относительно целей моделирования, получение и анализ результатов моделирования происходит на ч*етвертом этапе.*

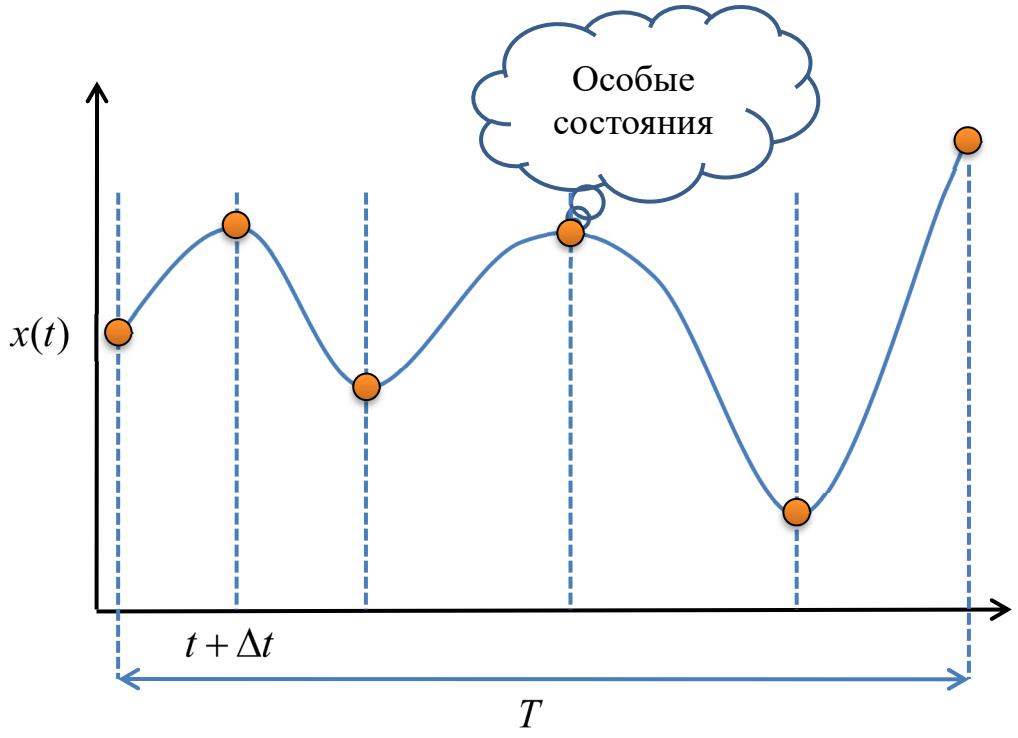


Рис. 3.9. Создание математической модели по особым состояниям

При этом возникает две ситуации:

1) считается, что все параметры модели известны и в целом модель полностью определена. Отклонения результатов моделирования от теоретических, нормативных дают информацию об адекватности модели и степени достижения цели. Модель бракуется, если отклонения выходят за допустимые границы (допуски);

2) характеристики или некоторые параметры модели остаются неопределенными. Тогда значения этих характеристик находят в процессе моделирования. Если значения характеристик определить не удается, то считается, что модель непригодна для исследования рассматриваемых явлений, и она бракуется.

На пятом этапе на основании полученных результатов моделирования, изменения целей моделирования и появления новой информации об изучаемом объекте выполняется анализ и модернизация модели.

3.5. Методы реализации математических моделей

Реализация математических моделей может осуществляться двумя методами: аналитическим и численным.

Аналитический метод применяется в случае, если установлена аналитическая зависимость искомых результатов от множества данных, описывающих исходные состояния объекта. Такая зависимость выражается явной или неявной функцией и может быть исследована методами математического анализа. В результате моделирования формулируются выводы о существовании решения, его единственности и корректности. Результатами аналитического метода являются в основном качественные показатели.

Численная реализация математической модели основана на нахождении количественных характеристик в результате выполнения вычислительных экспериментов, которые включают совместное использование математического анализа, вычислительной математики и технических средств.

Процесс вычислительного эксперимента включает ряд этапов:

1) составляется план вычислительного эксперимента в виде алгоритма действий, выполняется подбор необходимых алгебраических формул и логических условий для вычислений, определяются параметры промежуточного контроля вычислительного процесса и модели в целом;

2) на языке программирования разрабатывается программный код для реализации алгоритма;

3) выполняется вычислительный эксперимент. Вычисления предусматривают возможность контроля всего эксперимента (программы, алгоритма, результатов);

4) выполняется обработка и анализ результатов вычислений. Итогом этого этапа является принятие решения о приемлемости результатов или необходимости внесения изменений в модель, алгоритм или программу.

3.6. Оценка правильности математической модели

Оценка математической модели определяет, правильно ли математическая модель отображает объект, достигаются ли цели моделирования, имеют ли результаты познавательную или прагматическую ценность. Оценка правильности математической модели должна осуществляется до,

после и в процессе моделирования. Решение этой задачи является неформальной процедурой, которая всегда включает мнение экспертов. Причин правильности или неправильности модели может быть множество. Например, в модели не учтены какие-либо свойства, важные для достижения цели, неправильно отображается структура объекта, неверно подобраны параметры моделирования и т. д.

Правильно или неправильно построена модель, становится однозначно известно в результате практической реализации модели. Однако не всегда модели поддаются экспериментальной проверке.

Оценку правильности модели определяют по признакам правильности, которые представляют собой качественные или количественные критерии.

Качественные критерии представляют собой совокупность упорядоченных по значимости субъективных показателей, характеризующих соответствие или несоответствие свойств модели и объекта. Субъективность качественных показателей обуславливается применением неформальных методов экспертных оценок.

Одним из способов численного выражения качества являются количественные критерии. Они позволяют видеть численные значения допустимых границ изменений состояний моделируемого объекта, прогнозные значения его состояний в будущем.

Количественные критерии делятся на частные и общие. Частные критерии – это параметры, характеристики или свойства объекта, представленные в численном виде. Общие критерии применяются для оценки модели, представленной совокупностью параметров и свойств, в целом [1, 6].

3.7. Математические схемы моделирования систем

Сведения о назначении и условиях работы исследуемой системы являются основой для формулирования цели моделирования системы и позволяют определить требования к разрабатываемой математической модели и выбор математической схемы [4, 8].

Математические схемы играют существенную роль при переходе к математической модели.

Основными подходами при построении математических моделей процессов функционирования систем S выделяют:

– непрерывно-детерминированный;

– дискретно-детерминированный;

– дискретно-стохастический;

– непрерывно-стохастический;

– подход, основанный на сетевых моделях;

– подход, основанный на комбинированных моделях.

Непрерывно-детерминированный подход основан на использовании дифференциальных уравнений в математических моделях.

В дифференциальных уравнениях неизвестными параметрами являются функции одной или нескольких переменных. При рассмотрении функции одной переменной уравнения называются обыкновенными дифференциальными уравнениями, иначе, уравнениями в частных производных.

В математических моделях время t является независимой переменной, от которой зависят все неизвестные искомые функции.

Для детерминированных систем математическое соотношение в общем виде имеет вид:

$$y^1 = f(y,t);\ \ y(t_0) = y_0, \tag{3.3}$$

где $y^1 = dy/dt$, $y = (y_1, y_2, ..., y_n)$, $f = (f_1, f_2, ..., f_n)$ – переменные n-векторы;

$f(y,t)$ – вектор-функция является непрерывной и определена на некотором $(n+1)$-мерном (y,t) множестве.

Математические схемы вида (3.3) отражают динамику изучаемой системы S и называются D-схемами.

Основой *дискретно-детерминированных* моделей является теория автоматов. В данном случае система представляется в виде автомата, который в допустимые моменты времени преобразовывает дискретную информацию о состоянии системы.

Автомат – это устройство «черный ящик» с известными входными, выходными данными и некоторыми внутренними состояниями.

В качестве математического аппарата на этапе формализации процесса функционирования систем в дискретно-детерминированном подходе используется математический аппарат теории автоматов.

В дискретно-детерминированном подходе система представляется в виде конечного автомата (автомат, у которого множество внутренних состояний и входных сигналов являются конечными множествами), перерабатывающего дискретную информацию и меняющего свои внутренние состояния лишь в допустимые моменты времени.

Конечный автомат характеризуется шестью элементами и представляет собой математическую F-схему.

F-схема определена:

– конечным множеством X входных сигналов;

– конечным множеством Y выходных сигналов;

– конечным множеством Z внутренних состояний системы;

– начальным состоянием $z_0, z \in Z$;

– функцией переходов $\phi(z, x)$ из состояния в состояние;

– функцией выходов $j(z, x)$.

Автомат, заданный F-схемой $F = \{Z, X, Y, j, y, z_0\}$, работает в дискретные моменты времени, так называемые такты, равные друг другу, каждый из которых имеет постоянные значения входных и выходных сигналов и внутренние состояние.

Дискретно-стохастический подход аналогичен конечному автомату, однако здесь значительную роль играет влияние фактора стохастичности (вероятностности), поэтому этот подход основан на вероятностных (стохастических) автоматах.

Вероятностный (стохастический) автомат – это дискретный потактный преобразователь информации с памятью, работа которого в каждом такте может быть описана статистически и зависит только от состояния памяти в нем.

Основой вероятностного (стохастического) автомата является математическая P-схема, которая важна для разработки методов проектирования дискретных систем со статистически закономерным случайным поведением.

Примером применения *непрерывно-стохастического* подхода являются системы массового обслуживания, которые представляют собой класс математических типовых схем (Q-схем) в теории массового обслуживания.

Процессы функционирования экономических, производственных, технических и других систем являются процессами обслуживания. Стохастический характер процесса их функционирования при этом заключается в случайном появлении заявок на обслуживание и завершение обслуживания в случайные моменты времени.

Обслуживание включает:

1) ожидание обслуживания заявки;

2) обслуживание заявки.

На рис. 3.10 обслуживание заявок изображено в виде i-го прибора Π_i, состоящего из H_i – накопителя заявок, в котором может одновременно находиться $l_i = 0...L_i^H$ заявок. L_i^H – емкость i-го накопителя, и канала обслуживания заявок (или просто канала) K_i.

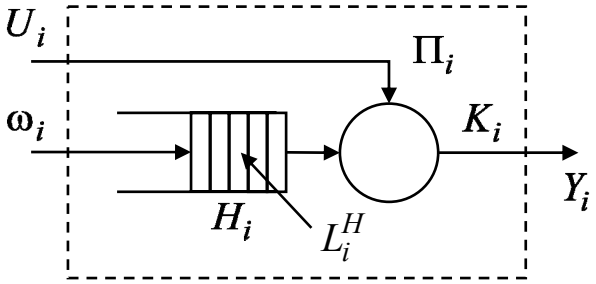


Рис. 3.10. Прибор обслуживания Π_i

На каждый элемент прибора обслуживания Π_i поступают потоки событий: в накопитель H_i – поток заявок ω_i, на канал K_i – поток обслуживания U_i. Потоком событий называют последовательность событий, происходящих одно за другим в случайные моменты времени.

В сложных системах, где одновременно параллельно протекает несколько процессов, для анализа и установления причинно-следственных связей используют *сетевые модели* (N-схемы). Примером математических

N-схем являются сети Петри, описывающие структуру и взаимодействие параллельных систем и процессов.

Формально сеть Петри (*N*-схема) задается четверкой вида $N = \langle B, D, L, O \rangle$, где B – конечное множество символов (позиций); D – конечное множество символов (переходов); L – прямая функция инцидентности (входная функция); O – обратная функция инцидентности (выходная функция).

Графически *N*-схема изображается в виде графа, отображающего совокупность переходов от элемента одного множества к элементу другого множества.

Важной особенностью моделей процесса функционирования систем с использованием типовых *N*-схем является возможность эффективного использования *N*-схем для моделирования параллельных и конкурирующих процессов в различных системах. Например, при строительстве здания подводка коммуникаций и отделочные работы могут осуществляться параллельно.

Поведение непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических систем позволяет описывать подход, основанный на понятии агрегативной системы и представляющий собой формальную схему общего вида, которая называется *комбинираванной схемой* (*A*-схемой).

Агрегативная система является математической схемой, отображающей системный характер изучаемых объектов. В данном случае в таких системах сначала дается формальное определение объекта моделирования – агрегативной системы, отображающей системный характер изучаемых объектов. Суть агрегативного подхода состоит в том, что сложный объект (система) разделяется на конечное число частей (подсистем). При этом связи, обеспечивающие взаимодействие частей системы, сохраняются.

Элементом *A*-схемы является агрегат, причем он сам может рассматриваться как *A*-схема, т. е. может разбиваться на элементы (агрегаты) следующего уровня. Связь между агрегатами определяется оператором сопряжения R.

На использовании обобщенной типовой математической схемы моделирования *A*-схемы базируется построение имитационной системы и ее математическое обеспечение.

3.8. Основные этапы разработки и исследования моделей на компьютере

Современное информационное и техническое обеспечение позволяет исследовать информационные модели различных объектов и систем в зависимости от значения тех или иных параметров. В процессе разработки моделей и их исследования можно выделить ряд основных этапов [4, 8, 9].

1. На первом этапе исследования модели объекта или процесса относительно целей проводимого исследования выделяют существенные параметры объекта. Несущественные параметры исключают из рассмотрения. В результате формируется описательная информационная модель объекта.

2. Основой второго этапа является разработка формализованной модели. Полученная на первом этапе описательная информационная модель записывается с помощью какого-либо формального языка, т. е. математических объектов: формул, уравнений, неравенств и др.

Если не удается найти формулы, явно выражающие искомые величины через исходные данные, то для получения результатов с заданной точностью используются приближенные математические методы.

3. Формализация информационной модели происходит на третьем этапе исследований. Процесс преобразования в компьютерную модель производится при помощи языка программирования или при помощи программного обеспечения.

4. Компьютерный эксперимент проводится на четвертом этапе исследования информационной модели. Компьютерную модель, существующую в виде программы, запускают на выполнение и получают результаты.

Если для исследования компьютерной модели используется приложение, например, в СУБД, то эксперимент запускается по установленному алгоритму вычислений, в результате чего можно выполнить сортировку или поиск данных, построить диаграмму, график и т. д.

5. На пятом этапе выполняется анализ полученных результатов и корректировка исследуемой модели. Если результаты, полученные при исследовании информационной модели, расходятся с измеряемыми параметрами реальных объектов, то это свидетельствует о том, что на предыдущих этапах построения модели были допущены ошибки. Например, на первом

этапе неправильно отобраны существенные свойства объектов или допущены ошибки в формулах в процессе формализации на втором этапе и т. д. В данной ситуации проводят корректировку модели, которая заключается в исключении допущенных неточностей и может происходить в несколько итераций, пока анализ результатов не покажет их соответствие изучаемому объекту.

Процесс моделирования является процессом неформальным и включает не только формальные процедуры, но и экспертные оценки. В наиболее общем виде процесс моделирования представлен на схеме (рис. 3.11):

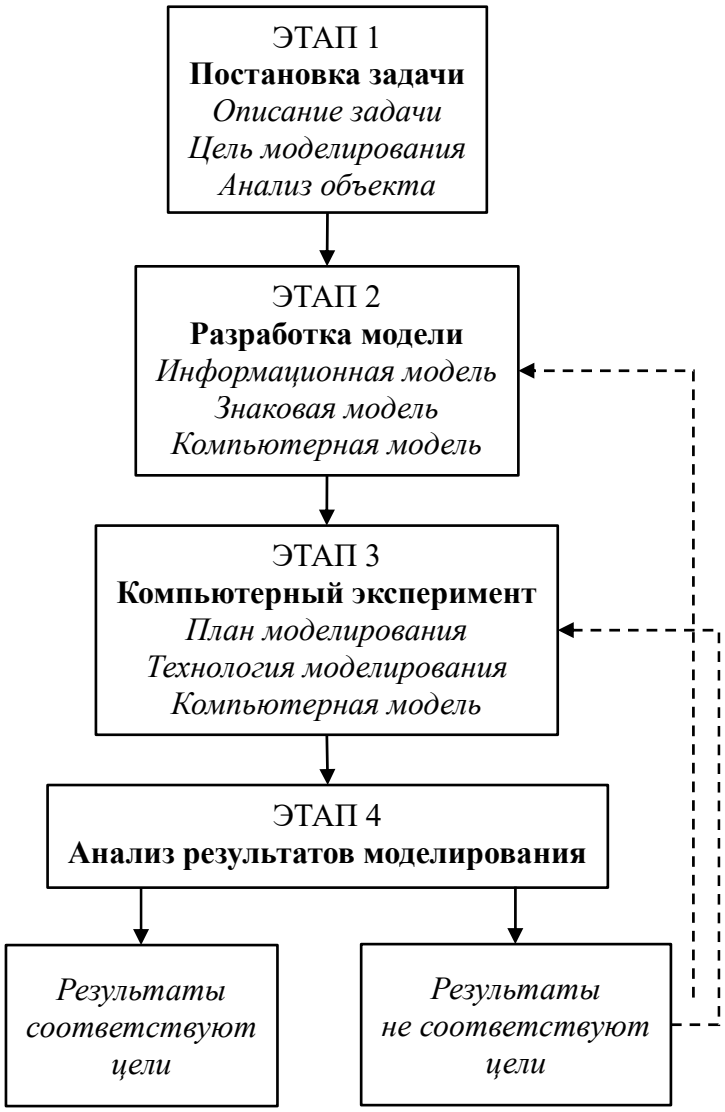


Рис. 3.11. Процесс моделирования

4. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ И БЛОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ. АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

4.1. Понятие концептуальной модели

Первым этапом машинного моделирования является построение концептуальной модели. Его суть заключается в переходе от содержательного описания объекта к его математической модели.

Обобщенная формальная схема модели, в которой определяются: цель моделирования, граница между объектом и внешней средой, функция оценки эффективности, типовые математические схемы моделирования, необходимые гипотезы, предположения и ожидаемые результаты, называется концептуальной моделью объекта [4, 9–11].

Концептуальная модель рассматривается как теоретическая основа при разработке моделей систем, она отражает основные концепции принятия решения о построении модели по намеченному плану. Схематически концептуальная модель системы показана на рис. 4.1.

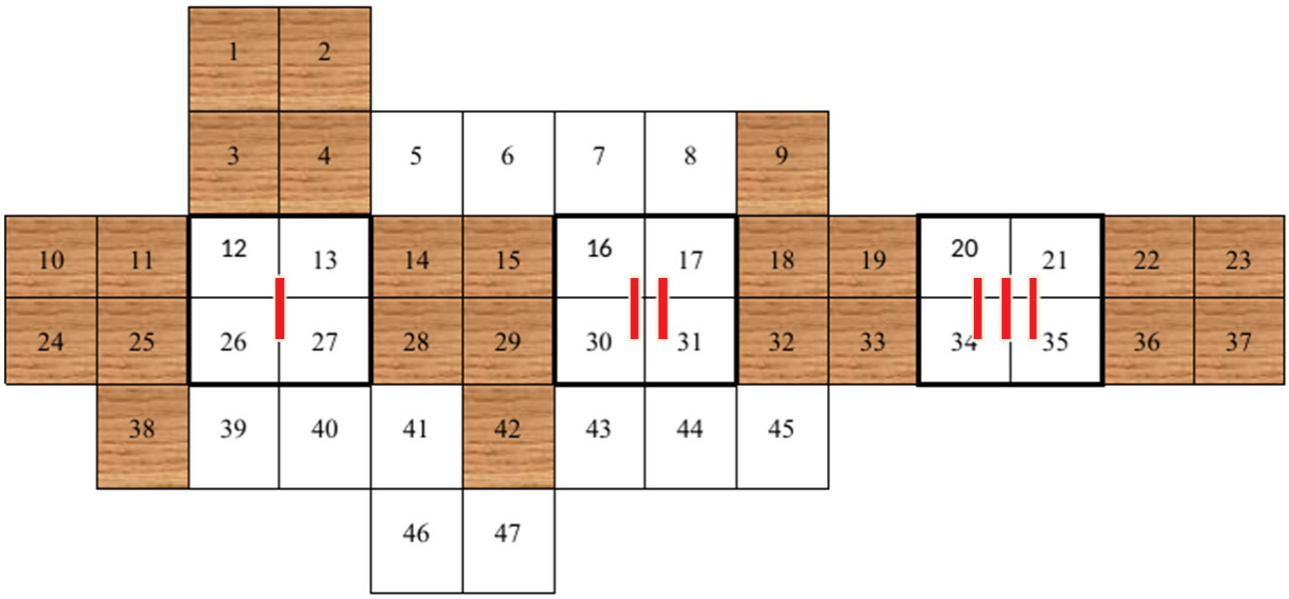


Рис. 4.1. Концептуальная модель системы

На рис. 4.1 элементы 5–8, 39–41,43–47 определяют переход от описания системы к ее модели. В некоторых случаях эти элементы выполняют исключительно описательную функцию, поэтому в данной интерпретации модели указанные элементы рассматриваются как второстепенные.

Элементы 14, 15, 28, 29, 42 отражают внутренние свойства системы.

Воздействие внешней среды на систему и влияющие на нее некоторые внешние факторы показаны элементами 1–4, 10, 11, 24, 25 и 38.

Элементами 9, 18, 19, 32, 33 показано взаимодействие внешней среды и ее воздействие на систему.

Воздействие системы на внешнюю среду характеризуется элементами 22, 23, 36, 37.

Элементы системы 12, 13, 26, 27, 16, 17, 30, 31 и 20, 21, 34, 35 отображают процесс функционирования исследуемой системы и группируются в блоки I, II, III, показанные на рис. 4.1.

4.2. Переход от описания к блочной модели

Концептуальная модель определяет полную, содержательную модель системы. Для применения концептуальной модели в практических целях она должна быть преобразована в так называемую блочную модель. В отличие от концептуальной, в блочной модели не учитываются второстепенные элементы, имеющие описательный характер. В блочной модели присутствуют только необходимые элементы, и она формализует построение системы, приводя ее к практическому применению.

Блочная модель является результатом формализации концептуальной модели. Схематически блочная модель изображена на рис. 4.2.

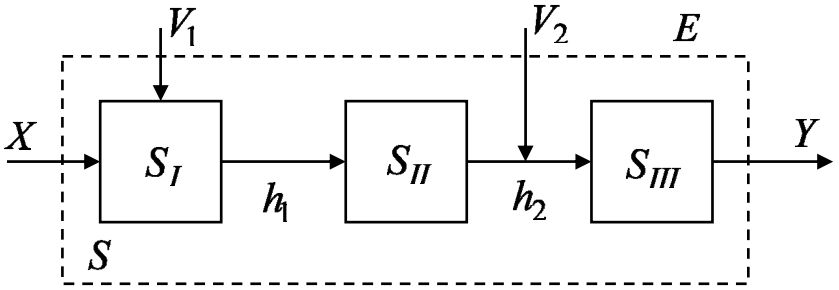


Рис. 4.2. Блочная модель системы

На рис. 4.2 блок S_I представляет собой имитатор воздействия внешней среды на систему и объединяет элементы под номерами 12, 13, 26, 27.

Объединение элементов концептуальной модели 16, 17, 30, 31 происходит в блоке S_{II}. Этот блок показывает непосредственно функционирование системы *S*.

Блок S_{III} включает в себя элементы 20, 21, 34, 35 и служит для машинной реализации блоков S_I и S_{II}.

Группа элементов 14, 15, 28, 29, 42 концептуальной модели заменяется пассивными связями h_1.

Элементы 1–4, 10, 11, 24, 25 заменяются входными факторами *X* и воздействиями внешней среды *E*.

Элементы 9, 18, 19, 32, 33 заменяются пассивными связями h_2.

Элементы 22, 23, 36, 37 представлены элементами выходного сигнала *Y*.

Суть блочного принципа состоит в построении отдельных логически законченных блоков, отражающих какую-либо сторону рассматриваемого процесса. Этот принцип широко используется в построении математических моделей.

Блочный принцип построения моделей позволяет:

– выполнять декомпозицию общей задачи построения математической модели на отдельные подзадачи с целью упрощения ее решения;

– повторно использовать разработанные блоки в других моделях;

– заменять отдельные блоки на новые без ущерба для остальных.

Блочный принцип построения математических моделей основывается на системном подходе, который позволяет масштабировать процессы, т. е. выполнять деформацию математической модели за счет изменения геометрических размеров, характеризующих аппаратное оформление процесса. При взаимном соответствии входных и выходных переменных всех блоков модели блочная модель может иметь различную степень детализации математического описания.

5. ЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МОДЕЛЕЙ. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ

5.1. Схемы алгоритмов

Выделяют четыре вида схем моделирующих алгоритмов: обобщенную, детальную, логическую и программную.

Обобщенная (укрупненная) схема моделирующего алгоритма, как правило, имеет линейную структуру и задает общий порядок действий при моделировании системы без каких-либо уточняющих деталей. Часто для пояснения отдельных действий используются блоки комментариев. Фрагмент обобщенной схемы представлен на рис. 5.1.

В обобщенной блок-схеме присутствуют ссылки на детальные схемы моделирующего алгоритма. Это обеспечивает семантическую связь между схемами и позволяет рассматривать алгоритм как единое целое с разной детализацией.

Детальная схема моделирующего алгоритма содержит уточнения, отсутствующие в обобщенной схеме. Она показывает не только, что необходимо выполнить на очередном шаге моделирования системы, но и как это реализовать. Как правило, детальная схема моделирующего алгоритма содержит все алгоритмические конструкции (ветвления и циклы). Для пояснения процедуры реализации того или иного шага моделирования в детальной схеме присутствует указание используемых структур данных (переменных, массивов, стеков и т. д.). Детальная схема или ее фрагменты часто сопровождаются ссылками на блоки программной схемы.

Логическая схема моделирующего алгоритма представляет собой графическое описание логической структуры модели процесса функционирования системы. Логическая схема указывает упорядоченную во времени последовательность логических операций, связанных с решением задачи моделирования. Таким образом, данная схема предназначена прежде всего для описания процесса решения задачи с использованием модели исследуемого объекта. Структурно логическая схема имеет ветв-

ления и циклы, однако содержательная ее часть не содержит подробного описания программной реализации процесса моделирования. Фрагмент логической схемы представлен на рис. 5.3.

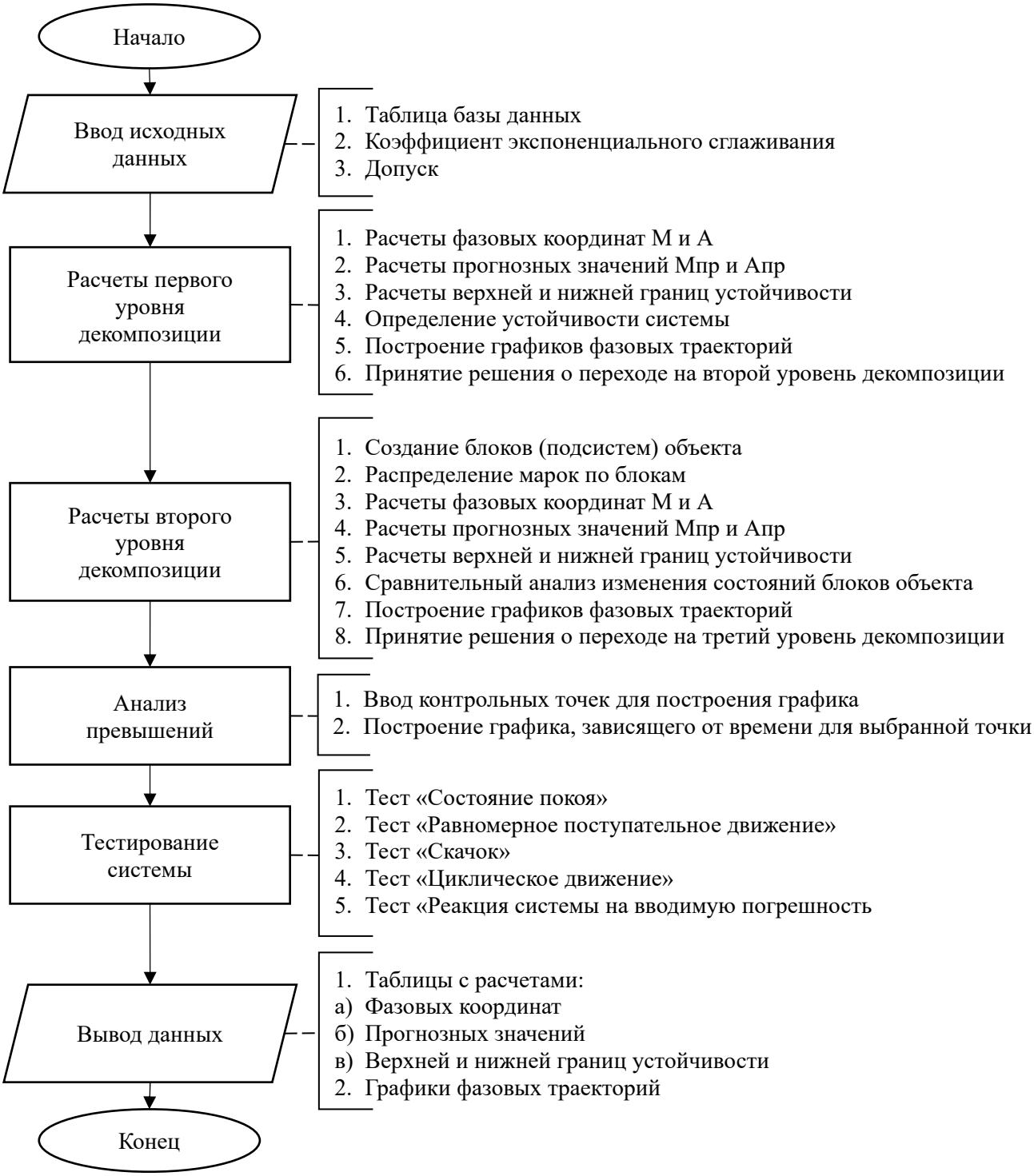


Рис. 5.1. Обобщенная схема работы программы

Фрагмент детального моделирующего алгоритма представлен на рис. 5.2.

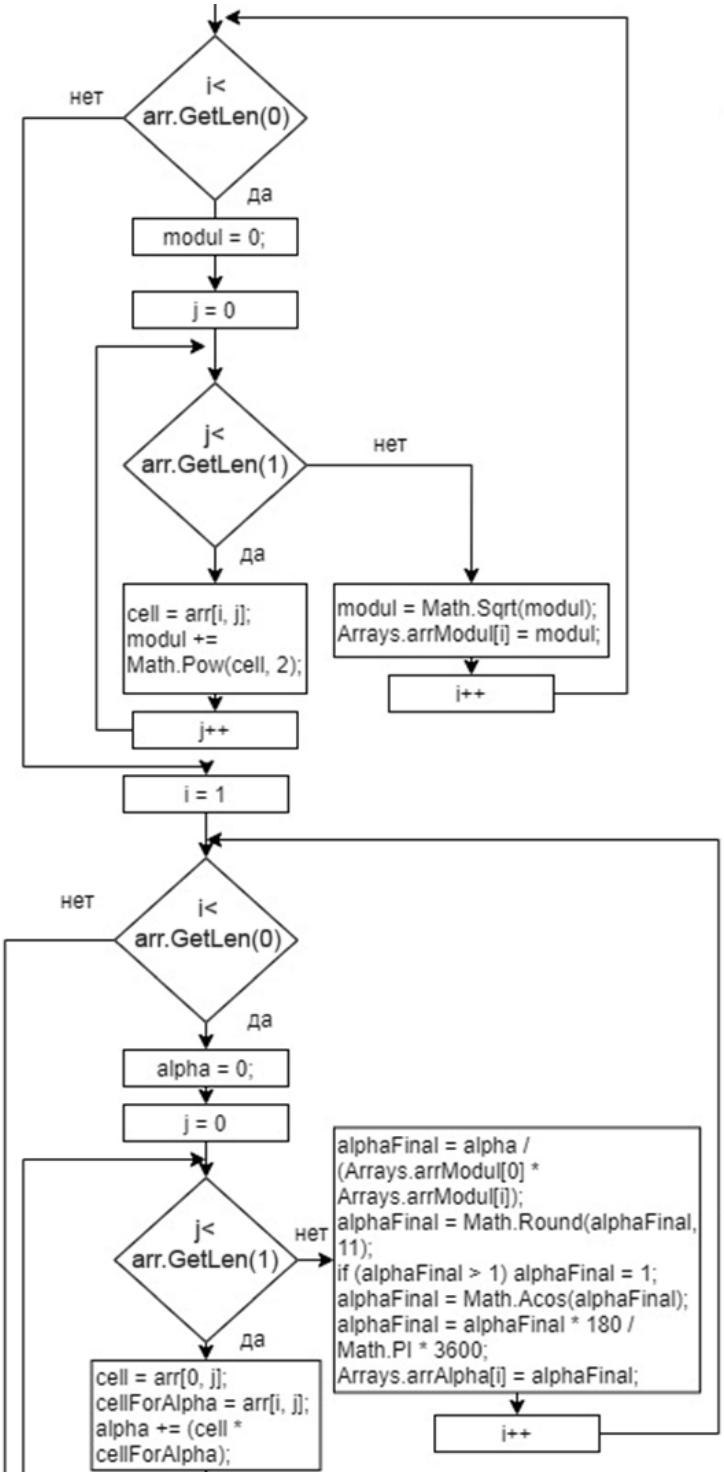


Рис. 5.2. Фрагмент детальной схемы работы программы

Схема программы отображает порядок программной реализации моделирующего алгоритма с использованием конкретного математического обеспечения. Схема программы представляет собой интерпретацию логи-

ческой схемы моделирующего алгоритма с использованием конкретного алгоритмического языка. Различие между этими схемами заключается в том, что логическая схема отражает логическую структуру модели процесса функционирования системы, а схема программы – логику машинной реализации модели с использованием конкретных программно-аппаратных средств моделирования.

Оформление схемы программы регламентируется стандартами по построению блок-схем программного обеспечения. Именно данная схема впоследствии используется в качестве основы для программной реализации компьютерной модели. Фрагмент схемы программы представлен на рис. 5.4.

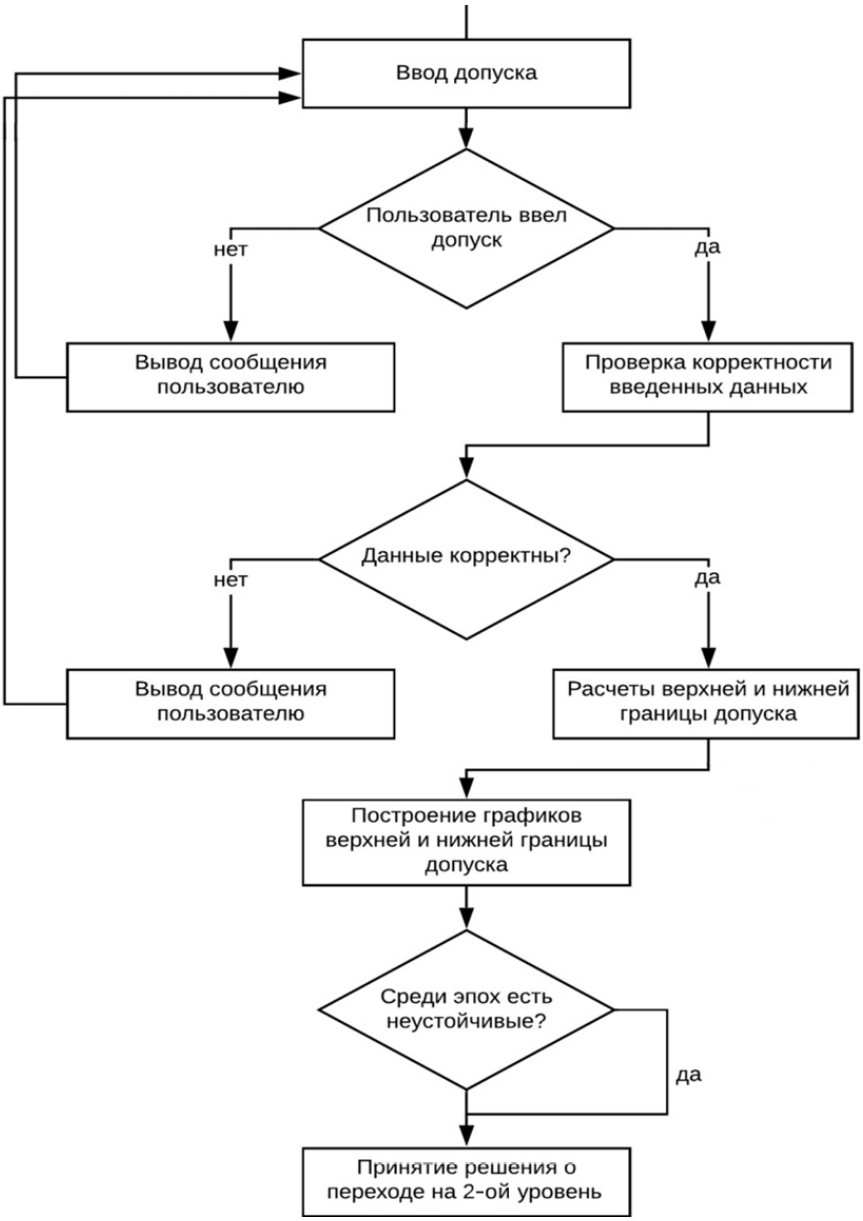


Рис. 5.3. Фрагмент логической схемы работы программы

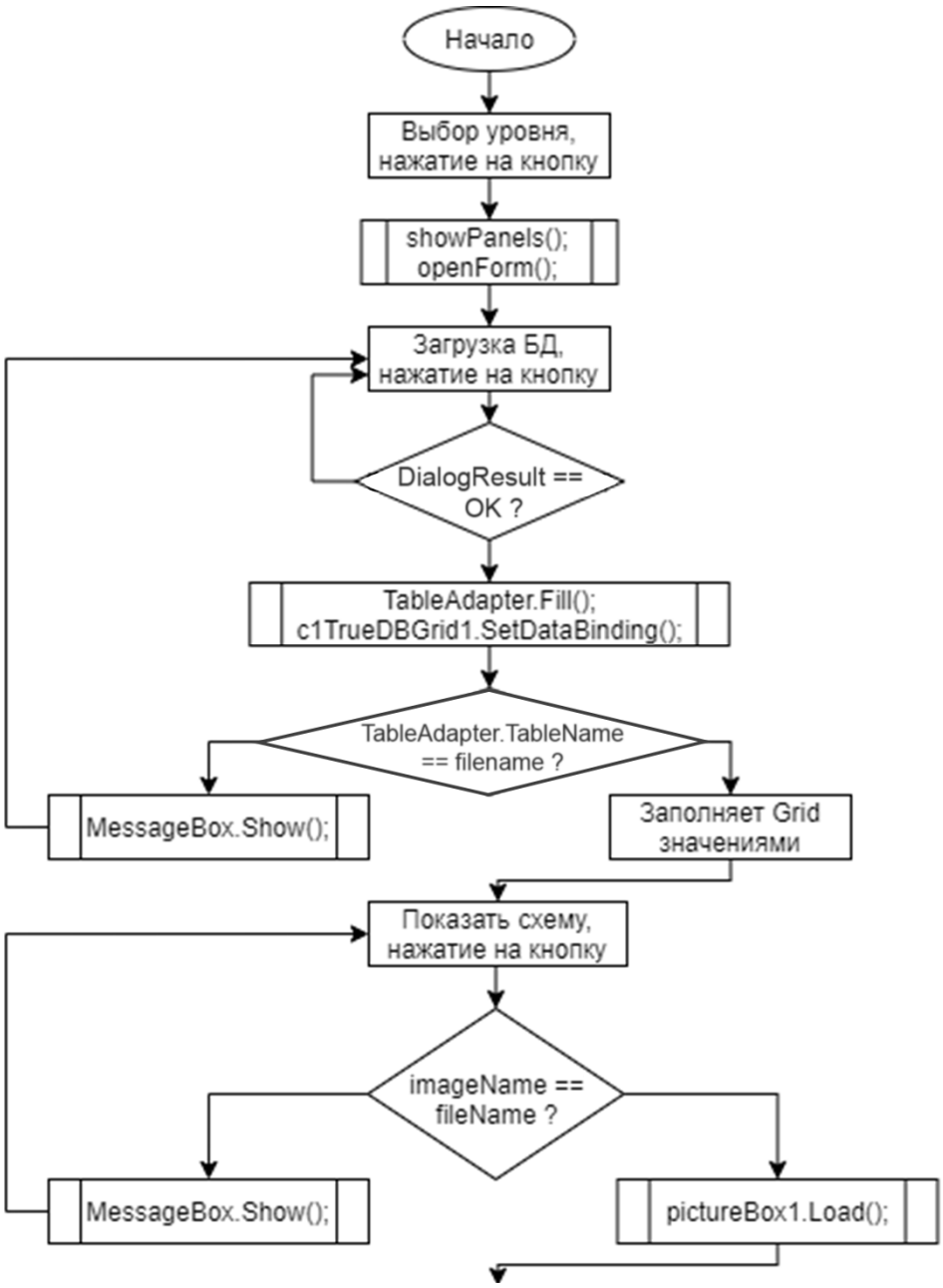


Рис. 5.4. Фрагмент схемы программы

5.2. Этапы моделирования систем

Требования, предъявляемые к моделирующему алгоритму:

– универсальность относительно структуры, функционирования и параметров системы;

– обеспечение возможности одновременной и независимой работы необходимого числа элементов схемы;

– обеспечение приемлемых затрат ресурсов компьютера в процессе реализации машинного эксперимента;

– обеспечение возможности разбиения системы на автономные логические части;

– гарантирование выполнения рекуррентного правила, согласно которому событие, происходящее в момент времени t_k, может моделироваться только после того, как промоделированы все события, произошедшие в момент времени $t_{k-1} < t_k$.

Процесс моделирования системы включает в себя три этапа:

1) построение концептуальной модели системы и ее формализация;

2) алгоритмизация модели системы и ее машинная реализация;

3) получение и интерпретация результатов моделирования системы.

На этапе построения концептуальной модели проводится изучение моделируемого объекта, выделяются основные составляющие процесса его функционирования. Также определяются необходимые аппроксимации.

Результатом второго этапа является обобщенная схема модели системы *S*, которая путем последовательной алгоритмизации и программирования преобразуется в машинную модель.

Третий этап моделирования системы заключается в получении и интерпретации результатов моделирования системы *S* с учетом воздействия внешней среды *E*.

6. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА КОМПЬЮТЕРЕ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Метод статистического моделирования заключается в построении моделирующего алгоритма, который имитирует поведение и взаимодействие элементов системы с учетом случайных входных воздействий и воздействий внешней среды.

При исследовании сложных систем, подверженных случайным воздействиям, используются вероятностные имитационные модели, в которых влияние случайных факторов учитывается с помощью задания вероятностных характеристик случайных процессов. Полученные результаты при воспроизведении на имитационной модели рассматриваемого процесса являются случайными реализациями. Поэтому требуется многократное воспроизведение процесса для нахождения объективных и устойчивых его характеристик и статистическая обработка полученных данных. По этой причине исследование сложных процессов и систем с помощью имитационного моделирования, подверженных случайным возмущениям, называют статистическим моделированием [12, 13].

Статистическая модель случайного процесса представляет собой алгоритм, имитирующий работу сложной системы, которая подвержена случайным возмущениям. Здесь имитируется взаимодействие элементов системы, носящих вероятностный характер. Статистическое моделирование является способом изучения сложных процессов и систем с помощью имитационных моделей, подверженных случайным возмущениям [4, 12, 13].

Этапы методики статистического моделирования с помощью метода Монте-Карло:

1) выполняется моделирование псевдослучайных последовательностей с заданным законом распределения вероятностей и корреляцией, имитирующее на компьютере случайные значения параметров при каждом испытании;

2) в имитационных математических моделях используются полученные числовые последовательности.

3) статистическая обработка результатов моделирования.

Пример. Пусть требуется оценить надежность системы (рис. 6.1).

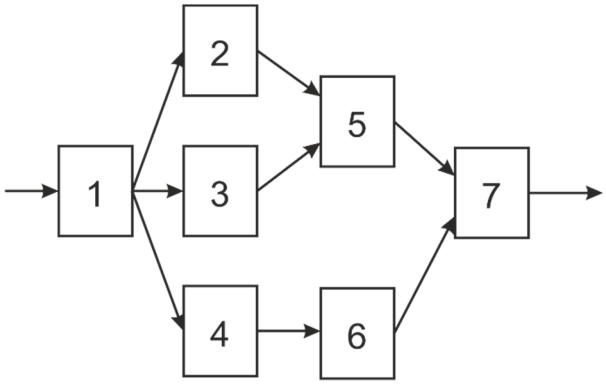


Рис. 6.1. Блочная структура системы

Если работают цепочки блоков: 1, 2, 5, 7; 1, 3, 5, 7; 1, 4, 6, 7, то система выполняет свою функцию. При этом существует вероятность, что какие-то блоки могут отказать. Каждый блок характеризуется временем безотказной работы $t_i, i = 1,7$. Заданы плотности распределения $p_i(t_i), i = 1,7$. Необходимо оценить надежность системы в целом.

Рассмотрим случайную величину:

$$\gamma = \min\left\{\tau_1, \max\left[\min\left(\tau_4, \tau_6\right), \min\left[\max\left(\tau_2, \tau_3\right), \tau_5\right]\right], \tau_7\right\}, \qquad (4.1)$$

где γ – время безотказной работы системы.

В качестве количественного показателя оценки надежности системы выступает среднее арифметическое времени безотказной работы системы. По результатам расчетов, выполненных по формуле (3.1), можно построить закон распределения вероятностей случайной величины γ в виде гистограммы.

Метод статистического моделирования может быть применен в двух областях:

– для изучения стохастических систем;

– для решения детерминированных задач.

Решение детерминированных задач методом статистического моделирования заключается в замене детерминированной задачи эквивалентной схемой некоторой стохастической системы. В данном случае вместо точного решения используется приближенное. При этом с увеличением числа испытаний (реализаций моделирующего алгоритма) погрешность результатов решения уменьшается.

Результатом статистического моделирования системы является серия частных значений искомых величин или функций. Статистическая обработка данных значений позволяет получить информацию о поведении реального объекта или процесса в произвольные моменты времени.

Результаты, полученные с достаточной точностью, могут быть приняты в качестве оценок искомых характеристик функционирования системы. Они приобретают статистическую устойчивость, если количество реализаций достаточно велико.

Множества случайных явлений (событий, величин) подчиняются определенным закономерностям. Эти закономерности позволяют прогнозировать поведение случайных значений и количественно оценивать их некоторые средние характеристики.

В распределениях случайных величин, которые образуются при сложении множества воздействий на систему, наблюдаются характерные закономерности. Предельные теоремы теории вероятностей являются выражением этих закономерностей. Их принципиальное значение состоит в том, что они гарантируют высокое качество статистических оценок при весьма большом числе испытаний.

Учет стохастических воздействий при статистическом моделировании систем является одним из основных вопросов.

При реализации моделирующего алгоритма на компьютере количество случайных чисел, используемых для получения статически устойчивой оценки процесса функционирования системы, колеблется в достаточно широких пределах. Это зависит от вида оцениваемых характеристик, класса объекта моделирования, необходимой точности и достоверности результатов моделирования.

В методе статистического моделирования на компьютере большое число операций и большая доля машинного времени расходуется на дей-

ствия со случайными числами. От качества исходных последовательностей случайных чисел зависят результаты статистического моделирования.

Существуют и применяются на практике *три основных способа генерации случайных чисел:*

– аппаратный (физический);

– табличный (файловый);

– алгоритмический (программный).

Случайные последовательности при аппаратном способе генерации вырабатываются генератором случайных чисел, например, при помощи дополнительного прибора, имитирующего случайные воздействия.

Способ получения случайных чисел называется табличным, когда случайные числа, структурированные таблицы в виде массива, сохранены в файле.

Способ получения последовательности случайных чисел с помощью специальных алгоритмов и реализующих их программ называется алгоритмическим. Каждое случайное число вычисляется с помощью функций, представляющих собой генератор случайных чисел по мере возникновения потребностей при моделировании системы.

7. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА. ЯЗЫКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Алгоритмические языки при моделировании систем служат вспомогательным аппаратом разработки, машинной реализации и анализа характеристик моделей [10, 13]. При выборе конкретного языка для решения задачи моделирования процесса функционирования системы исследователь получает тщательно разработанную систему абстракций, предоставляющую ему основу для формализации процесса функционирования исследуемой системы *S*. Высокий уровень проблемной ориентации языка моделирования значительно упрощает программирование моделей, а специально предусмотренные в нем возможности сбора, обработки и вывода результатов моделирования позволяют быстро и подробно анализировать возможные исходы имитационного эксперимента с моделью M_M.

Качество языков моделирования определяется:

– удобством описания процесса функционирования системы *S*;

– удобством ввода исходных данных моделирования и варьирования структуры, алгоритмов и параметров модели;

– реализуемостью статистического моделирования;

– эффективностью анализа и вывода результатов моделирования;

– простотой отладки и контроля работы моделирующей программы;

– доступностью восприятия и использования языка.

Язык программирования представляет собой набор символов, распознаваемых компьютером и обозначающих операции, которые можно реализовать с его помощью.

Машинно-ориентированные языки (машинные коды, ассемблер) всегда отражают специфику конкретного процессора и, следовательно, могут быть применены только на той платформе, для которой они предназначены. Машинно-ориентированные языки описывают элементарные действия процессора (инструкции) и не обладают проблемной ориентацией.

Процедурно-ориентированные языки являются аппаратно-независимыми (на уровне текста программы) и предназначены для определенного класса задач. Языки такого типа включают в себя инструкции, удобные для формулировки способов решения типичных задач.

Языком моделирования может быть любой искусственный язык, который можно использовать для выражения информации и знаний или системы в структуре, которая определена последовательным набором правил. Правила используются для интерпретации значений компонентов в структуре.

По форме представления язык моделирования может быть графическим или текстовым.

Языки графического моделирования используют технику диаграмм с именованными символами, которые представляют собой концепции и связи, показывающие их соотношения. Рассмотрим языки графического моделирования в области информатики, управления проектами и системной инженерии.

Behavior Trees – это формальный язык графического моделирования, используемый в основном в системной и программной инженерии. Обычно используется для однозначного представления сотен или даже тысяч требований к естественному языку, которые обычно используются для выражения потребностей заинтересованных сторон в крупномасштабной системе.

BPMN и XML-форма BPML – пример языка моделирования бизнес-процессов.

Блок-схема – это схематическое представление алгоритма или пошагового процесса.

IDEF – это семейство нотаций, представляющих собой графические языки моделирования. Данное семейство языков включает в себя IDEF0 для функционального моделирования, IDEF1X для информационного моделирования, IDEF3 для моделирования бизнес-процессов, IDEF4 для объектно-ориентированного проектирования и IDEF5 для моделирования онтологий.

Объектно-ролевое моделирование (ORM) в области разработки программного обеспечения – это метод концептуального моделирования, ко-

торый может использоваться как инструмент для анализа информации и правил.

FORML (Formal Object-Role Modeling Language) – формальный язык моделирования «объект – роль». Основан на концепциях ORM и поддерживает систематический и строгий подход к моделированию бизнес-концепций. Концептуальный моделер FORML позволяет вербализовать данные, представить их в символической или диаграммной форме, ограничить концептуальную модель фактами, иллюстрирующими утверждения, и проверить правильность модели.

DRAKON – это язык алгоритмического моделирования общего назначения для описания систем с интенсивным использованием программного обеспечения, схематического представления алгоритма или пошагового процесса, а также семейства языков программирования.

Язык EXPRESS (EXPRESS-G) – это международный стандартный язык моделирования данных общего назначения.

Отдельное внимание стоит уделить унифицированному языку моделирования UML.

Unified Modeling Language (UML) – это язык моделирования общего назначения, являющийся отраслевым стандартом для описания систем с интенсивным использованием программного обеспечения.

Диаграммы UML являются результатом работы языка унифицированного моделирования. Это графическое представление классов, объектов и отношений между ними. UML-диаграмма – это модель, которая описывает часть системы. Она используется для определения функциональности или дизайна системы. Диаграмма должна быть четкой и лаконичной, чтобы зритель мог легко ее понять. UML-диаграммы делятся на три категории:

- структурная схема;
- поведенческая диаграмма;
- диаграмма взаимодействия.

Структурные диаграммы. Структурные диаграммы используются для статического представления системы. Они представляют собой часть системы, которая составляет структуру системы. Структурная схема показывает различные объекты в системе. Ниже приведены различные структурные схемы в UML:

– диаграмма классов;

– диаграмма объектов;

– схема упаковки;

– диаграмма компонентов;

– диаграмма развертывания.

Поведенческие диаграммы. Любая реальная система может быть представлена в статической или динамической форме. Система считается полной, если она выражается как статическим, так и динамическим способом. Диаграмма поведения представляет собой функционирование системы.

Диаграммы UML, которые имеют дело со статической частью системы, называются структурными диаграммами. Диаграммы UML, которые имеют дело с движущимися или динамическими частями системы, называются диаграммами поведения. Ниже приведены различные поведенческие диаграммы в UML:

– диаграмма деятельности;

– диаграмма вариантов использования;

– схема конечного автомата.

Диаграммы взаимодействия. Диаграмма взаимодействия – это не что иное, как подмножество поведенческих диаграмм. Оно используется для визуализации потока между различными вариантами использования системы. Диаграммы взаимодействия используются, чтобы показать взаимодействие между двумя объектами и то, какие потоки данных содержатся внутри них. Ниже приведены различные диаграммы взаимодействия в UML:

– временная диаграмма;

– диаграмма последовательности;

– диаграмма сотрудничества.

Языки текстового моделирования могут использовать стандартизированные ключевые слова, сопровождаемые параметрами или терминами и комментариями на естественном языке. Информационные модели могут быть выражены с использованием формализованных естественных языков. Наиболее распространенным языком текстового моделирования является язык Gellish. Он имеет варианты естественного языка, такие как

Gellish Formal English и Gellish Formal Dutch и т. д. Основой языка Gellish выступают выражения в форме «таксономия – онтология». Он подходит не только для выражения знаний, требований и словарей, таксономий и онтологий, но и для передачи информации об отдельных объектах.

Также в области информационных технологий широко используются более специфические, проблемно-ориентированные типы языков моделирования.

Языки алгебраического моделирования (AML) представляют собой класс языков программирования высокого уровня, предназначенных для описания и решения проблем высокой сложности. Они применяются в крупномасштабных математических вычислениях (то есть задач крупномасштабного типа оптимизации). Одним из особых преимуществ AML является сходство их синтаксиса с математической записью задач оптимизации. Это позволяет дать очень краткое и удобочитаемое определение проблем в области оптимизации, которое поддерживается определенными языковыми элементами, такими как наборы, индексы, алгебраические выражения, ограничения с произвольными именами. Особенностью алгебраического языка моделирования является то, что алгебраическая формулировка модели не содержит подсказок, как ее обрабатывать.

Поведенческие языки моделирования предназначены для описания наблюдаемого поведения сложных систем, состоящих из компонентов, которые выполняются одновременно. Эти языки сосредоточены на описании таких ключевых понятий, как параллелизм, недетерминизм, синхронизация и коммуникация. Семантические основы поведенческих языков – это исчисление процессов или алгебра процессов.

Дисциплинарно-ориентированные языки моделирования направлены на результаты, связанные с этапом жизненного цикла разработки конкретных программ. Следовательно, такой язык предлагает отдельный словарь, синтаксис и обозначения для каждого этапа, такого как открытие, анализ, дизайн, архитектура, сокращение и т. д. Например, на этапе анализа проекта разработчик моделей использует определенные обозначения анализа для предоставления диаграммы предложения анализа. Однако на этапе проектирования используется логическая нотация проектирования для описания взаимосвязи между программными объектами. Кроме того, пе-

редовые практики языка моделирования для конкретных дисциплин не мешают практикам комбинировать различные обозначения в одной диаграмме.

Доменно-ориентированные языки моделирования (DSM) основаны на методологии разработки программного обеспечения для проектирования и разработки таких ИТ-систем, как компьютерное программное обеспечение. Она предполагает систематическое использование графического предметно-ориентированного языка (DSL) для представления различных аспектов системы. Языки DSM, как правило, поддерживают абстракции более высокого уровня, чем языки моделирования общего назначения, поэтому для определения данной системы требуется меньше усилий и меньше деталей низкого уровня.

Предметно-ориентированные языки моделирования (FSML) предназначены для применения в рамках объектно-ориентированного программирования. FSML определяют абстракции, предоставляемые структурой, как концепции FSML и разлагают абстракции на функции. Конфигурация концепции описывает, как должна быть завершена структура, чтобы создать реализацию концепции.

Объектно-ориентированный язык моделирования – это язык моделирования, основанный на стандартизированном наборе символов и способах их упорядочения для моделирования (части) объектно-ориентированного проектирования программного обеспечения или системного проектирования. Некоторые организации широко используют их в сочетании с методологией разработки программного обеспечения для перехода от начальной спецификации к плану реализации и для передачи этого плана всей группе разработчиков и заинтересованных сторон. Поскольку язык моделирования является визуальным и находится на более высоком уровне абстракции, чем код, использование моделей способствует формированию общего видения, которое может предотвратить проблемы различной интерпретации на более позднем этапе разработки. Часто для построения этих моделей используются программные инструменты моделирования, которые затем могут быть автоматически переведены в код.

8. ПЛАНИРОВАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕЛЯМИ

8.1. Понятие планирования эксперимента

Получение необходимой информации об исследуемой системе при ограниченных ресурсах (затраты машинного времени, памяти и т. п.) является основной задачей планирования машинных экспериментов. Увеличение точности и достоверности результатов моделирования, проверка адекватности модели – это частные задачи планирования компьютерных экспериментов [12].

Получение информации о характеристиках процесса функционирования объекта является целью компьютерного эксперимента с моделью системы. План эксперимента определяет объем и порядок проведения вычислений на компьютере, приемы накопления и статистической обработки результатов моделирования системы *S*.

Важное значение в теории планирования эксперимента имеют следующие возможности:

1) простота итераций эксперимента на компьютере с моделью системы *S*;

2) управление экспериментом с моделью, включая его прерывание и возобновление;

3) возможность имитации воздействий внешней среды при исследовании системы;

4) наличие корреляции этапов моделирования.

Преимущества и недостатки машинных экспериментов:

Преимуществами компьютерных экспериментов перед натурным являются:

– возможность полного воспроизведения условий эксперимента с моделью исследуемой системы *S* для сравнения двух и более альтернатив;

– простота управления компьютерным экспериментом для анализа результатов и принятия решений об его дальнейшем ходе.

Основным *недостатком* компьютерных экспериментов является наличие зависимости последующих результатов наблюдений от результатов одного или нескольких предыдущих, т. е. результаты наблюдений являются зависимыми. Поэтому в них содержится меньше информации, чем в независимых наблюдениях.

Планирование эксперимента

Эксперимент – это система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях.

Опыт – отдельная элементарная часть эксперимента, которая воспроизводит исследуемое явление в определенных условиях проведения эксперимента с возможной регистрацией его результатов.

Планирование эксперимента (ПЭ) – процедура выбора количества опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Все факторы, определяющие процесс, изменяются одновременно по специальным правилам, а результаты эксперимента представляются в виде математической модели.

Примерами задач, для решения которых может использоваться планирование эксперимента, могут быть оценка и уточнение констант теоретических моделей, выбор существенных факторов, выбор наиболее приемлемых из некоторого множества гипотез о механизме явлений, поиск оптимальных условий и т. д.

8.2. Методы теории планирования эксперимента при проведении научно-исследовательских работ и научно-технических разработок

Раздел математической статистики, изучающий рациональную организацию опытов, подверженных случайным ошибкам, представляет собой планирование эксперимента. Процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью, составляет содержание.

Существует три типа экспериментов:

1) эксперимент называется активным в том случае, если имеется неограниченная возможность вмешательства в процесс и сознательное изменение его условий;

2) если имеется лишь возможность регистрации результатов и никакое вмешательство в процесс невозможно, – это пассивный эксперимент;

3) смешанным (активно-пассивным) экспериментом называется эксперимент при ограниченных возможностях вмешательства в процесс, например, выбор значений некоторых параметров или возможность выбора условий эксперимента.

Эксперимент всегда выполняется над некоторым объектом (процессом). В теории планирования эксперимента объект рассматривается как «черный ящик». Система, у которой доступны для наблюдения лишь внешние воздействия (факторы) и ее реакция на эти воздействия в виде численных характеристик целей исследования, является моделью системы «черный ящик». Функцией (8.1) определяется связь между внешними воздействиями и реакцией системы на них:

$$Y = f(X), \tag{8.1}$$

где Y, X – множества, составленные из значений внешних факторов и реакций системы.

Функция (5) является функцией отклика. Когда функция (5) определена, проводится планирование и проведение эксперимента. Рассмотрим два варианта постановки задачи планирования эксперимента.

Пример 1. Предположим, что имеется m возможных стратегий $A_1, A_2, ..., A_m$ (внешних воздействий) и n вариантов реакции объекта на каждое из них. Допустим, известна функция отклика и возможно оценить «стоимость» $a_{i,j} (i = 1, 2, ..., m; j = 1, 2, ..., n)$ использования каждой стратегии относительно каждой возможной реакции объекта. Необходимо выбрать наиболее предпочтительную (более выгодную) по сравнению с другими стратегию A.

Пример 2. Условия одного из возможных опытов определяют состояние системы «черного ящика» и численных значений факторов. Требуется выбрать условия проведения опытов и их количество, минимально необ-

ходимое для нахождения оптимальных условий, выполнить математическую обработку результатов. На основании полученных результатов принять решение о продолжении или завершении эксперимента.

Задачами, необходимыми при планировании эксперимента, являются:

– выбор области, где имеет смысл планировать эксперимент;

– определение внешних воздействий на объект (систему) и реакции объекта на них;

– определение функции отклика;

– составление плана эксперимента по имеющимся данным;

– выполнение активных и пассивных экспериментов в автоматическом и диалоговом режиме;

– анализ результатов и принятие на его основе решений о необходимых дальнейших действиях.

В системе различают входные и выходные переменные.

Переменная может являться либо фактором, либо реакцией, в зависимости от того, какую роль играет каждая переменная в проводимом эксперименте.

Допустим, имеются две переменные: x и y. Цель эксперимента – изучение влияния переменной x на переменную y. В данном случае x – фактор, а y – реакция. В экспериментах с компьютерными моделями экзогенной или управляемой (входной) переменной является фактор, а эндогенной (выходной) переменной – реакция.

Каждый фактор $x_{i,j} = \overline{1,k}$ может принимать в эксперименте одно из множества значений, называемых *уровнями.* В этом случае одно из возможных состояний рассматриваемой системы определяется фиксированным набором уровней факторов.

Каждому фиксированному набору уровней факторов соответствует определенная точка в многомерном пространстве. Это пространство называется *факторным пространством.*

Между уровнями факторов и реакцией (откликом) системы существует связь, которую можно представить в виде соотношения

$$y_l = \psi_l(x_1, x_2, ..., x_k), l = \overline{1,m}. \qquad (8.2)$$

Функцию, связывающую реакцию с факторами ψ_l, называют *функцией реакции*, а геометрический образ, соответствующий функции реакции, – *поверхностью реакции.*

Исследователю заранее не известен вид зависимостей $\psi_l, l = \overline{1,m}$, поэтому используют приближенные соотношения (8.3):

$$\tilde{y}_l = \psi_l(x_1, x_2, ..., x_k), l = \overline{1,m}. \qquad (8.3)$$

При планировании экспериментов необходимо определить основные свойства факторов. При проведении экспериментов факторы могут быть наблюдаемыми и ненаблюдаемыми, управляемыми и неуправляемыми, изучаемыми и неизучаемыми, фиксированными и случайными, количественными и качественными.

Если уровни фактора целенаправленно выбираются исследователем в процессе эксперимента, то фактор называется *управляемым*. При компьютерной реализации модели на основании управления изменением в допустимых пределах различных факторов исследователь принимает соответствующие решения.

Если значения фактора наблюдаются и регистрируются, то фактор называется *наблюдаемым.* Так как управлять фактором, не наблюдая его, является нерациональной процедурой, то в компьютерном эксперименте с моделью наблюдаемые факторы совпадают с управляемыми. Однако неуправляемый фактор также можно наблюдать.

Наблюдаемые неуправляемые факторы – называются *сопутствующими.*

Если фактор включен в модель, то он относится к *изучаемым.*

Если значения фактора – числовые величины, влияющие на реакцию, то фактор является *количественным*, иначе фактор называется *качественным.*

Когда в эксперименте исследуются все интересующие экспериментатора значения фактора, то фактор называется *фиксированным.* Если исследуется только некоторая случайная выборка из генеральной совокупности значений факторов, то фактор называется *случайным.*

Для полного определения фактора необходимо указать последовательность операций, с помощью которых устанавливаются его конкретные уровни. Определение такого фактора называется *операциональным.*

Требование управляемости фактора и требование непосредственного воздействия на объект – основные требования, предъявляемые к факторам. Возможность установки и поддержания выбранного нужного уровня фактора постоянным в течение всего испытания или изменяющимся в соответствии с заданной программой называется управляемостью фактора.

Чтобы предъявить требования к совокупности факторов, необходимо:

1) отобрать факторы $x_i, i = \overline{1,k}$, влияющие на объект, и описать их функциональную зависимость;

2) установить диапазон изменения факторов $x_{i\min} : x_{i\max}, x_1, x_2, ..., x_k$;

3) определить координаты точек факторного пространства, в которых следует проводить эксперимент;

4) оценить необходимое число реализаций и их порядок в эксперименте.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется *полным факторным экспериментом* (ПФЭ).

8.3. Стратегическое и тактическое планирование машинных экспериментов с моделями систем

Можно выделить стратегическое и тактическое планирование экспериментов на моделях систем [4].

Основной целью *стратегического* планирования является получение необходимой информации о системе с помощью модели, реализованной на компьютере.

Целями стратегического планирования экспериментов могут быть:

– получение функции реакции системы от независимых фактов;

– определение экстремума этой функции.

Планирование машинного эксперимента – это итерационный процесс, то есть выбранная модель плана эксперимента проверяется на реализуемость, а затем (если это необходимо) в нее вносятся соответствующие коррективы.

Планирование эксперимента с моделью проводится в два этапа:

– построение структурной модели;

– построение функциональной модели.

Число факторов и число уровней для каждого фактора характеризует структурную модель планирования эксперимента. Из опыта известно, что 20 % факторов определяют 80 % свойств системы.

Ортогональное распределение плана упрощает определение коэффициентов аппроксимации. Упрощение дает принятие числа уровней всех факторов одинаковыми (не больше трех). Функциональная модель ПЭ определяет количество элементов структурной модели $N_ф$, т. е. необходимое число различных информационных точек $N_ф$. Причем $N_ф < N_c$, где $N_c = q_1, q_2, ..., q_k$ – число экспериментов ПФЭ.

Функциональная модель определяет функционирование системы за счет математического описания взаимосвязи ее элементов.

Тактическое планирование определяет способы проведения каждой серии испытаний компьютерной модели.

При тактическом планировании решают следующие задачи:

– определение начальных условий и их влияния на достижения установившегося результата при моделировании;

– обеспечение точности и достоверности результатов моделирования;

– уменьшение дисперсии оценок характеристик процесса функционирования моделируемых систем;

– выбор правил автоматической остановки имитационного эксперимента с моделями.

Везде, где используется стратегическое планирование, возникает потребность в тактическом планировании. Тактика является одной из форм выражения стратегии. В связи с этим тактическое планирование неразрывно связано со стратегическим.

Сущность стратегии и тактики заключается в определении средств, с помощью которых система стремится к достижению поставленных целей. Тактику можно рассматривать как определенные этапы для достижения общей цели, предусмотренной стратегией.

Рассмотрим различия между стратегическим и тактическим планированием эксперимента:

– в стратегическом планировании проводится планирование общих планов системы для достижения цели. Тактическое планирование конкретизирует действия к достижению цели;

– планы в стратегическом планировании характеризуются долгосрочностью, а в тактическом планировании – краткосрочностью;

– в стратегическом планировании характер проблемы рассматривается в целом, а в тактическом планировании решаются задачи для устранения проблемы;

– в стратегическом планировании действия могут носить как регулярный, так и нерегулярный характер. В тактическом планировании принят четкий план действий;

– в стратегическом планировании может быть много альтернатив, в тактическом планировании таких альтернатив ограниченное количество.

9. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА КОМПЬЮТЕРЕ

9.1. Модель «черного ящика»

Система есть совокупность взаимосвязанных элементов, обособленная от среды и взаимодействующая с нею как целое для достижения поставленной цели [3].

Если внутреннее строение системы неизвестно, то систему представляют как «черный ящик», а ее функционирование изучается по входному и выходному сигналам.

При изучении системы способом «белого ящика», наоборот, известны все ее элементы и их взаимосвязи.

Систему рассматривают как «серый ящик» в том случае, когда внутреннее строение объекта известно частично. Например, модель состава системы известна, а структура – нет, или наоборот, известен состав модели, а структура неясна.

Модель «черного ящика» – это модель системы, представляющая собой «черный ящик» с известными выходными и входными параметрами и неизвестным внутренним устройством. Исследуя множества входных и выходных данных, с помощью такой модели можно получить представление о внутреннем устройстве системы. Управление системой «черный ящик» происходит только через входные данные. Устанавливая корреляцию между входными и выходными данными, определяется функция отклика системы на внешнее или внутреннее воздействие. Схематично модель «черного ящика» представлена на рис. 9.1.

Модель «черного ящика» применяется в основном для изучения сложных систем в тех случаях, когда:

– содержимое системы неизвестно полностью;

– содержимое системы настолько сложно, что его изучение по временным или другим ресурсам не сопоставимо с применением метода «черного ящика».

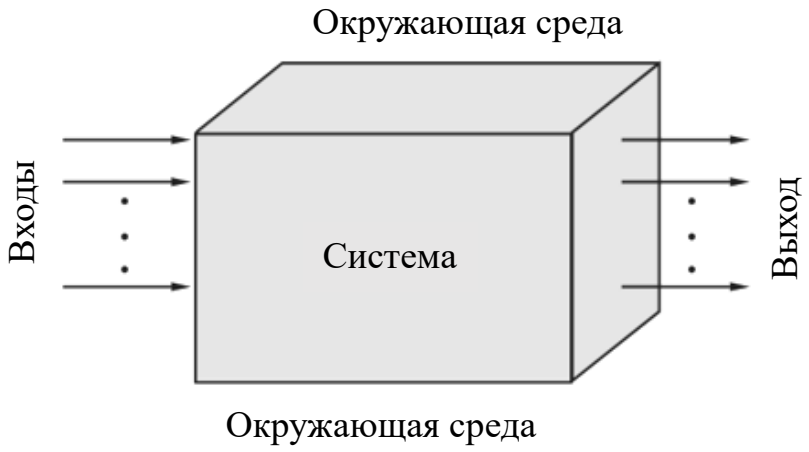


Рис. 9.1. Модель системы «черный ящик»

Один и тот же объект может являться по отношению к исследователю моделью «черного» или «белого» ящиков. Например, система «телевизор» для обычного пользователя является моделью «черного ящика». Он может настроить систему только через «входы» системы. В то же самое время система «телевизор» для телевизионного мастера является моделью «белого ящика». Настройку телевизора он выполнит путем внесения корректировки в работу элементов телевизора.

Система не является полностью изолированной несмотря на то, что она обособлена и выделена из среды. Это объясняется тем, что целью системы является обработка поступающей информации от среды, фиксирование ее изменений. Т. е. система существует в окружающей среде и взаимодействует с ней через «входы» и «выходы».

«Входы» системы – это каналы связи с окружающей средой, через которые в систему поступает необходимая информация. Т. е. «входы» дают возможность передачи в систему исходных данных (информации, вещества, энергии) для достижения цели. «Выходы» системы – это канал передачи данных от системы в окружающую среду. Фактически система через эти каналы отдает окружающей среде тот материал, ради которого функционирует.

Для более определенной и точной характеристики системы необходимо иметь ее модель, преобразуя имеющиеся сведения так, чтобы выделить существенные ее стороны, такие, как взаимосвязи, соподчиненность и т. д.

Большую роль сыграло представление системы как черного ящика с определенными функциями на входе и выходе.

Модель «черного ящика» – это модель, в которой полностью отсутствуют сведения о внутреннем ее содержании. Здесь неизвестны ни состав, ни структура системы. Известны лишь «входы» и «выходы». Неизвестна даже граница системы со внешней средой. Однако такая модель иногда оказывается единственно возможной при изучении системы. Это связано прежде всего со сложностью системы. Например, для управления системой «телевизор» обычному пользователю возможно оперировать только через «входы», потому что содержание слишком сложно и трудозатратно для того, чтобы самостоятельно его изучить.

Модель «черного ящика» обладает множеством «входов» и «выходов». Это объясняется тем, что любая реальная система взаимодействует с окружающей средой неограниченным числом способов. При построении системы «черного ящика» выбираются только те «входы» и «выходы», которые обеспечивают функционирование системы для достижения цели. Таким образом, устанавливаются критерии отбора. Те «входы» и «выходы», которые существенны и важны для достижения цели, включаются в модель, а те, которыми можно пренебречь, не включаются.

Необходимо отметить, что входные или выходные данные, которые исключаются из рассмотрения, все равно продолжают воздействовать на исследуемую систему; а то, что исследователь не включил в рассмотрение, может оказаться важным и существенным. Кроме того, при выборе входных и выходных данных необходимо устанавливать причинно-следственные связи, что является непростой задачей. Поэтому на этапе выбора «входов» и «выходов» возникает наибольшее количество ошибок. В таких случаях иногда полезно рассмотреть две конкурирующие модели «черного ящика», в одной из которых эта связь причислена к «входам», а в другой – к «выходам». В связи с изложенным, простота модели «черного ящика» обманчива. Всегда существует опасность неполноты перечней «входов» и «выходов» как вследствие того, что важные из них могут показаться несущественными, так и в силу неизвестности некоторых из них на момент построения модели.

9.2. Модель «белого ящика»

Зная модель «входов» и «выходов», модель состава и структуры системы, получаем другую модель – модель «белого» («прозрачного») ящика или структурную схему системы (рис. 9.2).

В модели «белого ящика» известными являются все ее компоненты, а именно: множества «входов» и «выходов», из каких элементов состоит система, взаимосвязь элементов между собой, т. е. задано математическое описание функциональных зависимостей между элементами [3].

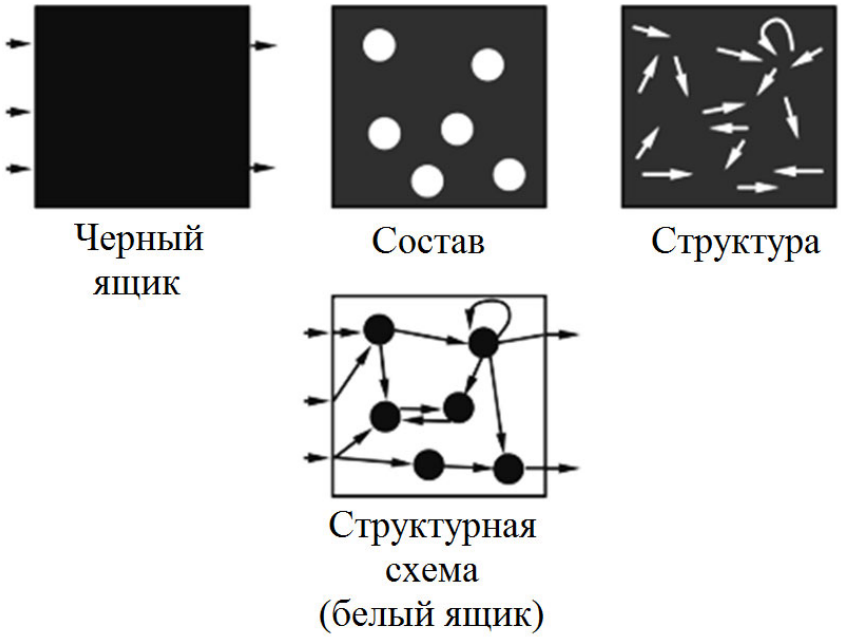


Рис. 9.2. Структурная схема системы, или модель «белого ящика»

Модель «белого ящика» используется тогда, когда интерес исследователя направлен на структуру системы, изучение внутреннего поведения системы и когда при этом можно в силу определенных условий пренебречь взаимодействием системы с внешней средой (рис. 9.3).

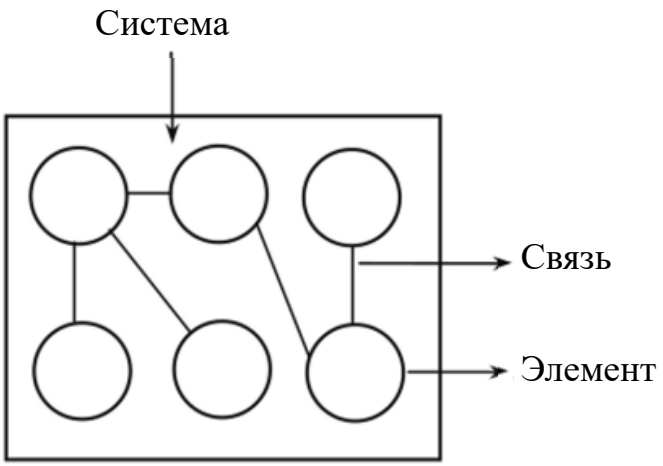


Рис. 9.3. Схема модели «белого ящика»

Различные воздействия на систему всегда изменяют ее состояние. Через «выходы» выражается реакция системы на эти воздействия, то есть выходные функции системы отображают функцию отклика.

В модели «белого ящика», в отличие от «черного ящика», можно определить, какой из факторов воздействия так или иначе повлиял на выходные данные системы. Поскольку управлять такой системой можно изнутри, т. е. вмешиваясь в ее функционирование, то устранить негативный фактор возможно путем вмешательства в функционирование элементов системы.

Деление систем на «белый» и «черный» ящики весьма условно. Например, система «компьютер» для простого пользователя является «черным ящиком», для продвинутого пользователя – «серым», а для специалиста по ремонту компьютеров – «белым».

Система «черный ящик» при необходимости всегда может быть преобразована в систему «серый» или «белый ящик».

Переход от «черного» к «белому ящику» происходит поэтапно (рис. 9.4) в зависимости от меры познания.

Рис. 9.4. Этапы перехода от «черного» к «белому ящику»

На рис. 9.4:

− блок 1 – система «черный ящик»;

− блок 2 – в системе известны «входы» и «выходы», частично известен состав системы и нет возможности управления системой;

− блок 3 – известны «входы», «выходы», состав, частично структура, но нет возможности управления процессами в системе;

− блок 4 – известны «входы», «выходы», состав и структура, есть возможность частичного управления процессами в системе;

− блок 5 – «белый ящик», известно все, есть возможность полного управления.

Пример: объективность знаний обучающегося оценивается по пятибалльной шкале. Таким образом, чтобы освоить какой-либо курс, обучающийся проходит пять этапов обучения.

Вывод. В системных исследованиях очень часто бывает полезно изобразить систему графически. Для этого обычно используются две модели системы: модель «черного ящика» и модель «белого ящика». Бывают случаи, когда приходится разрабатывать схему системы, совмещающую первую и вторую модели.

Модель «белого» ящика используется тогда, когда интерес исследователя направлен на структуру системы, на изучение внутреннего поведения системы.

Систему рассматривают как «серый ящик», когда внутреннее содержимое системы известно частично.

Систему уместно рассматривать как «черный ящик» при условии, что ее содержимое полностью неизвестно, плохо изучено или объективно сложно для изучения.

9.3. Методы тестирования моделей систем

Процесс оценки системы или ее компонентов с целью выяснения вопроса о том, удовлетворяет ли она указанным требованиям, называется *тестированием*. Иными словами, тестирование – это выявление ошибок или нарушений требований к системе.

Существуют следующие методы тестирования моделей систем.

Тестирование системы методом «черного ящика».

Техника тестирования модели системы методом «черного ящика» не предполагает каких-либо знаний о составе или структуре системы. Она оперирует только входными и выходными данными.

Ярким примером модели «черного ящика» является любая компьютерная программа для пользователя.

При выполнении тестирования методом «черного ящика» пользователь может оперировать только входными данными через интерфейс программы и получать на выходе результат. При этом он не знает, как получен этот результат, через какие алгоритмы, и какую математическую обработку проходят входные данные. Статистический анализ результатов дает знания о правильности и адекватности функционирования системы для достижения цели.

Главным преимуществом метода «черного ящика» является то, что не требуется знаний о системе. Это означает, что такой метод применим для изучения сложных систем, где эти знания о них попросту могут отсутствовать или быть не в полном объеме.

Недостатком этого метода является следующее:

1) статистический анализ предполагает большое количество экспериментов, что сопряжено с такими ограничениями, как временные ресурсы, материальные затраты и т. д.;

2) в процессе статистических испытаний необходимо спроектировать все возможные сценарии входных данных и выбрать из них только те, которые будут максимально эффективно выполнять оценку адекватности функционирования модели системы;

3) необходимо выполнять имитацию влияния внешних и внутренних факторов на модель системы для построения функции отклика. В противном случае оценка адекватности и эффективности системы невозможна;

4) необходимо планирование эксперимента для сокращения всех факторных экспериментов на модели.

Тестирование системы методом «белого ящика».

Детальное исследование внутренней логики и структуры системы предполагает техника тестирования модели системы методом «белого ящика». Тестирование «белого ящика» также называется тестированием

«прозрачного ящика». Чтобы выполнить тестирование приложения методом «белого ящика», необходимо знать не только внутреннее содержимое модели, но и функциональную взаимосвязь всех компонентов системы. Главным отличием от метода «черного ящика» является возможность исследования функционала каждого блока (подсистемы) или каждого элемента системы в отдельности.

Преимуществами техники тестирования методом «белого ящика» является возможность оптимизации внутреннего содержимого модели или структурной адаптации. Благодаря знаниям о системе достигается максимальный масштаб проверки всего содержимого системы.

Тестирование «серого ящика».

Тестирование «серого ящика» предполагает ограниченные знания исследователя о внутреннем содержимом и логике функционирования системы. При таком тестировании очень важную роль играет теория планирования экспериментов, поскольку пробелы в знаниях можно заменить гипотезами и на их основе определить множество (выборку) экспериментов из генеральной совокупности. Тестирование методом «серого ящика» предполагает не только знание входных данных, но и логику работы (функционирование) элементов системы. Управление «выходами» происходит как за счет входных данных, так и за счет управления логической последовательностью действий или частичного знания содержимого системы.

Вывод. В зависимости от знаний о системе существуют различные стратегии тестирования систем:

– стратегия «черного ящика»;

– стратегия «серого ящика»;

– стратегия «белого ящика».

При тестировании по стратегии «черного ящика» исследователь, пользуясь документацией, руководством, оперирует входными данными и получает результат, который может проанализировать статистическими методами, устанавливая таким образом корреляцию между входными и выходными данными.

При тестировании по стратегии «серого ящика» исследователь имеет доступ к функционалу (в случае компьютерной программы – к функцио-

нальным настройкам программы) и оперирует через «входы» и логику работы системы.

Тестирование по стратегии «белого ящика» подразумевает полные знания о системе и оперирование как входными данными, так и внутренним содержанием системы. В случае с компьютерной программой это знание программного кода и возможность вмешательства (исправления) этого кода.

9.4. Способы устранения расхождения между реальностью и результатами моделирования

Когда речь идет о познавательных моделях, то основной функцией таковых является получение информации о состоянии объекта. Для того чтобы получить достоверную информацию, модель должна как можно точнее отображать исследуемый объект [1, 3]. Совершенно ясно, что расхождения между моделью и объектом всегда будут иметь место по причине того, что модель не является точной копией объекта. В модели учитываются лишь те свойства объекта и отображаются те функции, которые нужны для достижения цели моделирования. Поэтому модель должна отображать реальный объект настолько точно, насколько диктует цель моделирования.

Для оценки правильности модели должна быть известна целевая область, границы которой определены некоторыми интервальными значениями качественных или количественных показателей, хотя целевой областью может быть и одна точка, имеющая определенные координаты в фазовом пространстве.

Достижение цели моделирования определяется целевой функцией. Целевой называется функция одной или нескольких переменных, определяемая для решения какой-либо задачи.

Таким образом, для того чтобы определить, достигнута ли цель моделирования с нужной точностью и правильно ли модель отображает состояние объекта, необходимо определить, пересекает ли целевая функция целевую область модели или нет (рис. 9.5).

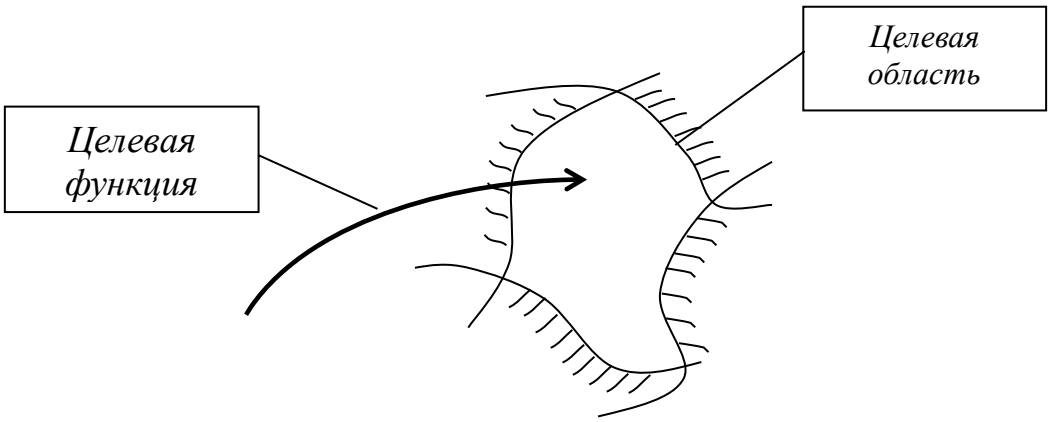


Рис. 9.5. Пересечение целевой функцией целевой области модели

Если целевая функция пересекает целевую область, то в этом случае модель правильно отображает состояние объекта, а цель достигается с приемлемой точностью. В противном случае необходимо устранить расхождения между моделью и реальностью (реальным объектом).

Эту задачу возможно решить двумя способами.

Способ 1. Устранение расхождения между моделью и объектом по параметрам. Корректировка параметров модели является наиболее простым способом решения этой задачи. В данном случае уточняются существенные параметры, ограничения, пределы, показатели входных и выходных данных, значения промежуточных операций. После внесения изменений в модель вновь выполняется оценка модели. Если целевая функция не пересекает целевую область, то итерация повторяется. Определяются другие параметры модели, которые могут повлиять на результат.

Корректировка модели завершается фиксацией подобранных условий и параметров, допустимых предельных значений. Однако если изменение параметров модели не решает проблему расхождения между моделью и объектом, то применяют другой способ.

Способ 2. Структурная адаптация модели. Структурная адаптация модели заключается в изменении ее структуры, функциональных связей между элементами, подборе новых математических алгоритмов, выборе новых технологий и инструментов моделирования. Фактически это перестройка модели для изменения направления целевой функции.

В том случае, если ни структурная адаптация, ни адаптация по параметрам не устранила проблему расхождения между моделью и объектом, то производится корректировка самой цели и целевой области. Причиной расхождения может быть некорректно поставленная цель или неправильно обозначенная целевая область.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие «Моделирование систем» позволяет обучающимся получить теоретические базовые знания по основным разделам системного анализа. Ознакомиться с принципами моделирования сложных систем, реализующих новые информационные технологии, и изучить инструментальные средства моделирования процессов функционирования информационных систем. Изучить методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования для применения в профессиональной деятельности. Получить сведения об использовании методики имитационного моделирования с типовыми этапами моделирования информационной системы, образующими цепочку: построение концептуальной модели и ее формализация – алгоритмизация модели и ее компьютерная реализация – имитационный эксперимент и интерпретация результатов моделирования.

Изложенные в учебном пособии материалы являются теоретической основой для выполнения лабораторных и курсовых работ по дисциплине «Моделирование систем».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вовк И. Г., Бугакова Т. Ю. Основы системно-целевого подхода и принятие решений : учеб. пособие для вузов, рекомендовано СР УМЦ. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 151 с.

2. Бугакова Т. Ю., Вовк И. Г. Системный анализ, моделирование и принятие решений : учеб. справочник. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 72 с.

3. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Основы системного анализа : учеб. – 2-е изд., доп. – Томск : НТЛ, 1997. – 396с.: ил.

4. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем : учеб. для вузов. – 4-е изд. – М. : Высш. шк., 2005. – 343 с.

5. Кобелев Н. Б. Вопросы теории имитационного моделирования открытых систем // Вторая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – СПб : Технологии Судостроения, 2005. – С. 116–121.

6. Решмин Б. И. Имитационное моделирование и системы управления : Учеб.-практ. пособие. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. – 74 с.

7. Гуляев Ю. П., Хорошилов В. С. Математическое моделирование. Прогнозирование деформаций сооружений гидроузлов по геодезическим данным (динамическая модель) : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 78 с.

8. Компьютерное моделирование : учеб. / В. М. Градов, Г. В. Овечкин, П. В. Овечкин, И. В. Рудаков. – М. : ИНФРА-М, 2018. – 264 с.

9. Кориков А. М., Павлов С. Н. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие. – М. : ИНФРА-М, 2018. – 288 с.

10. Кобелев Н. Б. Качественная теория больших систем и их имитационное моделирование : пособие для разработчиков имитационных моделей и пользователей. – Москва : Принт Сервис, 2009. – 85 с.

11. Кузнецов В. А., Черепахин А. А. Системный анализ, оптимизация и принятие решений : учеб. для студентов высших учебных заведений. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 256 с.

12. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 317 с.

13. Чикуров Н. Г. Моделирование систем и процессов : учеб. пособие. – М. : ИЦ РИОР : НИЦ Инфра-М, 2013. – 398 с.

Учебное издание

Бугакова Татьяна Юрьевна

Бугаков Петр Юрьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Редактор *О. В. Георгиевская*

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 17.12.2020. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 4,76. Тираж 70 экз. Заказ 163.
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.