

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра управления воздушным движением

Р.А. Субботин

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

ЧАСТЬ 1

Учебно-методическое пособие
по изучению дисциплины

*для студентов IV курса
направления 25.03.03
очной формы обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2025

УДК 351.814.33
ББК 0580.3
С89

Рецензент:

Печенежский В.К. – канд. техн. наук, доцент

Субботин Р.А.

С89

Методы анализа и моделирования технологических процессов в системе управления воздушным движением. Часть 1 [Текст] : учебно-методическое пособие по изучению дисциплины / Р.А. Субботин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2025. – 40 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Методы анализа и моделирования технологических процессов в системе управления воздушным движением» по учебному плану для студентов IV курса направления 25.03.03 очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 24.09.2025 г. и методического совета 25.09.2025 г.

УДК 351.814.33
ББК 0580.3

В авторской редакции

Подписано в печать 07.11.2025 г.

Формат 60x84/16 Печ. л. 2,5 Усл. печ. л. 2,325

Заказ № 2023/0929-УМП06 Тираж 25 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского

125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А

Тел.: (499) 755-55-43

E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ	5
1.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ	5
1.2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ	7
1.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	13
1.4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ	16
1.5. КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ	17
1.6. СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ	26
1.7. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ	30
ЛИТЕРАТУРА	40

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина Методы анализа и моделирования технологических процессов в системе управления воздушным движением изучается со студентами 4-го курса факультета управления на воздушном транспорте по направлению подготовки 25.03.03 «Аэронавигация».

Вопросы, изучаемые по дисциплине Методы анализа и моделирования технологических процессов в системе управления воздушным движением, входят составной частью в перечень дисциплин профессионального модуля, изучаемых студентами по направлению подготовки 25.03.03 «Аэронавигация».

Целью издания предлагаемого пособия является восполнение имеющегося пробела в учебно-методическом обеспечении учебного процесса по изучению дисциплины Методы анализа и моделирования технологических процессов в системе управления воздушным движением.

В учебно-методическом пособии «Методы анализа и моделирования технологических процессов в системе управления воздушным движением» изложены основные понятия и задачи моделирования систем и процессов, рассматриваются потоки событий и математические схемы моделирования, излагаются вопросы аналитического моделирования и имитационного моделирования систем и процессов, моделирования организационно-технических систем с учетом особенностей структуры и функциональных задач (на основе современных методологий функционального и информационного моделирования), вопросы моделирования систем и процессов на основе методов математической статистики, теории массового обслуживания, современных средств математического и имитационного моделирования. Подробно рассматривается ряд прикладных задач моделирования систем и процессов в предметной области «Управление воздушным движением».

Освоение студентами данных вопросов необходимо для использования их в дальнейшей профессиональной деятельности.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

1.1. Моделирование как метод научного познания

В своей практической деятельности должностные лица оперативных органов Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (далее - Единой системы) значительную часть времени разрабатывают лично или принимают участие в подготовке предложений для руководящего органа Единой системы по совершенствованию работы предприятий. Так, например, в соответствии с п. 41 приказа Росавиации от 25.12.2019 N 1414-П "Об утверждении Положения об оперативных органах Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации и типовых структурных схем оперативных органов Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации" в должностные обязанности начальников аэроузлового диспетчерского центра Единой системы и аэродромного диспетчерского центра Единой системы входит подготовка предложений по совершенствованию применения автоматизированных систем организации воздушного движения и их модернизации, а также участие в подготовке предложений по совершенствованию воздушного законодательства в части вопросов организации использования воздушного пространства и обеспечения функционирования оперативных органов Единой системы. В ходе выработки таких предложений проводятся исследования, которые могут включать периодическую оценку пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения (далее – органов ОВД); ведение учета фактической интенсивности воздушного движения; определение средней интенсивности воздушного движения применительно к конкретным диспетчерским пунктам (секторам) органа ОВД; проведение экспериментальной оценки значений норматива пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов ОВД на диспетчерском тренажере. Целью проведения исследований является научно-методическое обоснование предложений по повышению эффективности функционирования объектов Единой системы.

Под исследованием будем понимать вид деятельности человека, позволяющий вскрыть суть и содержание явлений, познать и оценить их, определить тенденции развития, найти возможность использования полученных знаний в практической деятельности.

Научное исследование можно определить, как процесс выработки новых знаний, один из видов познавательной деятельности, основанный на достижениях и методах многих самостоятельных наук.

Классическая схема процесса познания (рис. 1.1) включает в себя субъект, объект, методы и средства познания.

Субъект познания

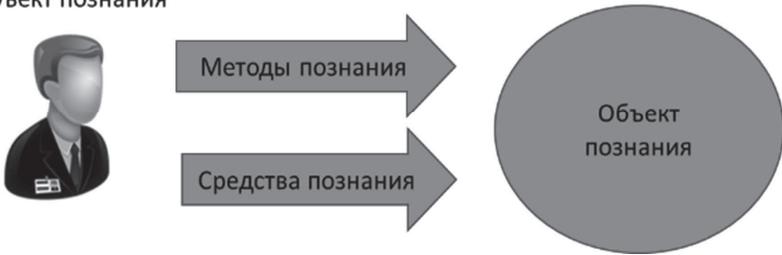


Рис. 1.1. Классическая схема процесса познания

В научном познании используются разнообразные методы. Метод (греч. *methods* — путь исследования, теория, учение) — это совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения (познания) действительности.

Исходя из логики движения знания и характера организации познавательной деятельности, можно выделить два основных уровня научного исследования: эмпирический и теоретический, а также соответствующие им методы эмпирического исследования и методы теоретического исследования.

На эмпирическом уровне исследования исследователь накапливает факты, информацию об исследуемых объектах и проводит: наблюдения; сравнения; измерения; эксперименты; первичную систематизацию знаний в виде таблиц, диаграмм и т.п.

Наблюдение — это целенаправленное восприятие объекта, обусловленное задачей деятельности.

Сравнение — это установление сходства и различия предметов и явлений действительности.

Измерение — это совокупность действий, выполняемых при помощи средств измерений с целью нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах измерения.

Экспериментом называется исследование каких-либо явлений путем активного воздействия на них при помощи создания новых условий, соответствующих целям исследования, или же через изменение течения процесса в нужном направлении. Различают пассивный эксперимент, когда исследователь лишь наблюдает и фиксирует протекающий процесс, и активный, когда наблюдатель вмешивается и организует протекание процесса. Активный эксперимент позволяет выявить критические ситуации, получить наиболее интересные закономерности, обеспечить возможность повторения эксперимента в различных точках и т.д.

На теоретическом уровне исследования происходит синтез накопленных знаний в форме научной теории. Методами теоретического исследования являются: абстрагирование; анализ и синтез; индукция и дедукция; аналогия.

Абстрагирование (лат. *abstractio* - отвлечение) - это особый прием мышления, который заключается в отвлечении от ряда несущественных, частных свойств и связей предмета, с целью выделить существенные его признаки. Например, постепенно

отвлекаясь от всё большего числа конкретных свойств определенной автоматизированной системы, можно получить подобный ряд абстракций: АС УВД «Синтез» → АС УВД → АС технологическим процессом → технический объект.

Анализ (греч. analysis - разложение) - это метод исследования, содержанием которого является совокупность приемов и закономерностей расчленения мысленного или реального предмета исследования на составляющие его части с целью их всестороннего изучения.

Синтез (греч. synthesis - соединение) представляет собой метод исследования, содержанием которого является совокупность приемов и закономерностей соединения отдельных частей предмета в единое целое.

Дедукция (лат. deductio - выведение) - это такой метод исследования, при котором на основе общих знаний (аксиом, постулатов или просто гипотез) осуществляется по правилам логики вывод частного характера.

Индукция (лат. inductio - наведение) - цепь умозаключений от частных, единичных фактов к некоторой гипотезе (общему утверждению).

Аналогия - это такой прием познания, при котором на основе сходства объектов в одних признаках заключают об их сходстве и в других признаках.

Эффективность познавательной деятельности человека может быть увеличена двумя основными путями: созданием приборов, увеличивающих возможности человека в познании; замещением объекта познания другим объектом (моделью), имеющим определенные преимущества.

Второй путь в определенных ситуациях является наиболее предпочтительным, так как позволяет: отражать такие объекты и такие их свойства, которые человеку непосредственно изучить не дано; ускорять процесс познания и осуществлять познание быстро изменяющихся объектов; экономно и эффективно расходовать физические, чувственные и мысленные возможности человека.

Моделирование — это исследование каких-либо объектов (явлений, систем, процессов) путем построения и изучения их моделей. Под моделью как средством познания понимается такой объект, который замещает объект исследования (оригинал) и служит источником информации о важнейших его свойствах. Модель выступает аналогом объекта-оригинала, т.е. она соответствует объекту-оригиналу в тех свойствах, которые подлежат изучению и, в то же время, может отличаться от него по ряду других свойств, которые представляются несущественными с точки зрения конкретной задачи изучения объекта-оригинала.

1.2. Системный подход в моделировании систем

Сущность системного подхода состоит в рассмотрении всех частных вопросов (как основных, так и второстепенных) с единых позиций целостности системы. Это позволяет рассматривать все внешние и внутренние связи между элементами системы, учитывать их влияние на те факторы, изменение которых приводит к нахождению наилучших способов достижения цели создания и функционирования системы.

Системный подход предполагает применение целого ряда понятий и определений. К ним относятся понятия системы, сложной системы, свойств системы, структуры, иерархии, процессов в системе, внешней среды, управления в системе и др. Применение этих понятий позволяет рассматривать сложный объект как совокупность более простых взаимосвязанных объектов, а также позволяет проводить «конструирование» сложного объекта (системы) из совокупности простых объектов (подсистем) с учетом единства решаемых ими задач.

Система есть подмножество взаимосвязанных элементов, выделенное из множества элементов любой природы в соответствии с требованиями решаемой задачи. При определении некоторого объекта как системы предполагается наличие:

- 1) множества элементов, которые могут рассматриваться как единое целое благодаря связям между ними и их свойствам;
- 2) исследователя, выполняющего любую целенаправленную деятельность (исследовательскую, проектную, организационную и др.);
- 3) задачи, с точки зрения решения которой исследователь определяет некоторый объект как систему;
- 4) языка, на котором исследователь описывает объект, свойства его элементов и связи.

Под элементом системы будем понимать неделимую часть системы, обладающую, с точки зрения задачи исследования, самостоятельностью по отношению к данной системе. Неделимость элемента обусловлена нецелесообразностью учета его внутренних свойств (состояния, конструкции и пр.) в пределах модели данной системы. Каждый элемент системы характеризуется конкретными свойствами (геометрические размеры, вес и т. д.), которые определяют его в данной системе однозначно. Свойства системы — это количественные и качественные характеристики системы, позволяющие описывать систему и выделять ее среди других систем.

Система может находиться в различных состояниях. Состояние любой системы в определенный момент времени t можно с определенной точностью охарактеризовать совокупностью значений некоторых величин z_1, z_2, \dots, z_n . При переходе от одного мгновенного состояния системы к другому значения z_1, z_2, \dots, z_n в общем случае меняются. Если рассматривать процесс функционирования системы как последовательную смену состояний, то $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ оказываются функциями времени t . Величины $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ в этом случае называют характеристиками состояний системы.

Характеристики состояний системы можно также интерпретировать как координаты точки в n -мерном фазовом пространстве. Каждому мгновенному состоянию системы соответствует определенная точка, а процессу функционирования системы — некоторая фазовая траектория. Фазовая траектория может быть описана вектор-функцией $Z(t)$ с составляющими по осям координат $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ (рис. 1.2).

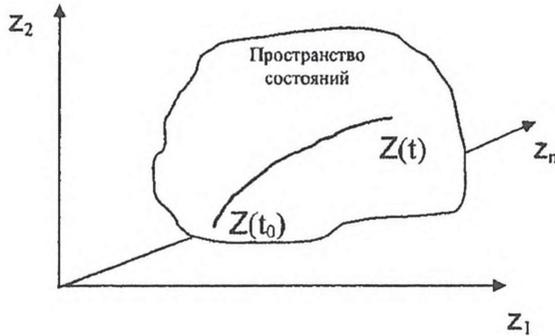


Рис. 1.2. Фазовая траектория системы

Моменту времени t_0 соответствует некоторое начальное состояние системы с характеристиками (начальными условиями) $z_1^0, z_2^0, \dots, z_n^0$.

На вход системы в общем случае могут поступать входные сигналы x_i , ($i=1, 2, \dots$), которые оказывают влияние на изменение состояний системы.

Функции $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ могут также зависеть от некоторого числа постоянных величин, называемых параметрами системы.

Наконец, система в общем случае может выдавать выходные сигналы y_j , ($j=1, 2, \dots$), полностью определяемые ее состояниями.

Совокупность всех возможных значений состояний системы называется пространством состояний.

Характеристики состояния системы часто называют показателями системы. Показатель, как правило, должен включать в себя набор содержательных признаков и количественное значение определенного свойства объекта.

Пример: «Система технического обслуживания (ТО) средств РТОП и авиационной электросвязи филиала ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». Элементы системы: средства РТОП и авиационной электросвязи, средства ТО (общий и специальный инструмент, стенды, контрольно-измерительные приборы, приспособления, материалы ит.д.), инженеры и техники службы ЭРТОС, связанные между собой материальными и информационными потоками. Показатели системы: количество исправных средств РТОП и авиационной электросвязи – 61 ед.; количество подготовленных специалистов службы ЭРТОС – 100 чел.; трудозатраты на выполнение текущего ремонта – 70 чел.-ч.

Внешняя среда системы – это набор существующих в пространстве и во времени объектов (систем), которые, как предполагается с точки зрения задачи исследования, действуют на рассматриваемую систему.

Связи системы с внешней средой реализуются через входы и выходы (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Связи системы с внешней средой

Входы системы — это различные точки приложения влияния (воздействия) внешней среды на систему. Входами системы могут быть информация, вещество, энергия, которые подлежат преобразованию.

Входные воздействия бывают, как правило, двух типов: входные управляющие воздействия и входные возмущающие воздействия.

Выходы системы - это различные точки приложения влияния (воздействия) системы на внешнюю среду. Выход системы представляет собой результат преобразования информации, вещества и энергии.

Система может иметь обратную связь как результат воздействия выходных параметров системы на ее вход.

Сложная система – это система, в которой в силу её свойств и исходя из характера задач, возникающих при ее исследовании, необходимо принимать во внимание наличие большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, обеспечивающих выполнение системой некоторой достаточно сложной функции. Функция системы – поведение системы, позволяющее получить результаты согласно ее назначению. Структура системы – совокупность элементов и связей между ними.

В сложной системе некоторая совокупность ее элементов может рассматриваться как подсистема. Правильное выделение подсистем в сложной системе упрощает их исследование. Обычно подсистемы являются некоторыми самостоятельно функционирующими частями системы. Сложные системы иерархичны, т.е. все их элементы соподчинены.

Реальные сложные системы функционируют в условиях действия большого числа случайных факторов. Источниками случайных факторов являются воздействия внешней среды, а также ошибки, шумы и отклонения различных величин, возникающие внутри системы.

Одним из свойств сложной системы является ее адаптивность, т.е. способность приспосабливаться к изменениям среды. В процессе адаптации могут изменяться как свойства системы, так и ее структура. Система, которая сохраняет способность к незначительному изменению в условиях воздействия среды, называется стабильной.

Таким образом, основными признаками сложной системы являются: наличие структуры, иерархичность (соподчиненность) элементов; необходимость учета связей между элементами и с внешней средой, проявляющихся в виде входа и выхода; участие вещественных элементов, людей и природной среды; возникновение новых свойств, отсутствующих у элементов, из которых состоит система.

Организационно-технические системы (ОТС) - это сложные системы с организационно-штатной структурой управленческого и технического персонала, оснащенные производственными фондами и запасами материально-технических ресурсов, включающие в себя сложные технические объекты, эксплуатация которых является целью функционирования системы.

Структура ОТС носит, как правило, иерархический характер, а ее элементы также могут являться организационно-техническими системами.

Примером организационно-технической системы является региональный центр Единой системы. Типовая структурная схема регионального центра включает в себя руководство, центр планирования и координирования использования воздушного пространства (ЦПИВП) в составе дежурных смен ЦПИВП, районный диспетчерский центр (РДЦ) в составе дежурных смен РДЦ, отдел организации использования воздушного пространства, тренажерный центр, группу организационно-методического обеспечения, объекты и технические средства ОВД. Примерами ОТС более низкого иерархического уровня являются аэроузловой диспетчерский центр Единой системы, аэродромный диспетчерский центр (АДЦ) Единой системы, дежурная смена диспетчерского пункта и т.д. Примером ОТС более высокого уровня является главный центр Единой системы.

Моделирование ОТС является весьма сложной и разносторонней задачей, предполагающей, в зависимости от целей и задач моделирования и точек зрения должностных лиц, применение и сочетание различных методов и средств моделирования.

Например, АДЦ ЕС ОрВД как сложная ОТС, с точки зрения моделирования процессов управления АДЦ, упрощенно может быть представлен в виде двух контуров управления, классификационным признаком которых является характер управляющих воздействий (рис. 1.4).

Контур технологического управления - включает экипажи ВС и органы ОВД пользователей воздушного пространства, как объект управления, исполнителей работ как орган управления, а также средства труда (средства связи, РТОП и АС УВД).



Рис. 1.4. Структура управление организационно-технической системой

Основными функциональными задачами этого контура являются: осуществление диспетчерского и полетно-информационного обслуживания воздушного движения, а также аварийного оповещения; взаимодействие со смежными диспетчерскими пунктами и органами ОВД (управления полетами) пользователей воздушного пространства при решении задач по предназначению; контроль за соблюдением федеральных правил в целях исключения случаев нарушений порядка ИВП.

При решении первых четырех задач осуществляются информационные и вещественно энергетические воздействия на экипажи ВС и органы ОВД пользователей воздушного пространства, смежные РДЦ и другие ДЦ ЕС ОрВД в виде: радиообмена с экипажами ВС; ввод информации в КСА УВД и ПВД; согласование условий ИВП и др.

Контроль за соблюдением федеральных правил в целях исключения случаев нарушений порядка ИВП выполняет роль информационной обратной связи.

Контур технологического управления функционирует эффективно лишь в том случае, если деятельность дежурных смен АДЦ и отдельных исполнителей будет согласована по месту, времени, целям и задачам.

Такое согласование осуществляется контуром организационного управления, в котором объектом управления являются дежурные смены и отдельные должностные лица АДЦ (орган управления контура технологического управления), а органом управления – руководящий состав АДЦ ЕС ОрВД.

Функциональные задачи, решаемые в контуре организационного управления, могут быть сведены в три основные группы: выполнение АДЦ ЕС ОрВД задач по предназначению; обеспечение функционирования АДЦ ЕС ОрВД в соответствии с ее

целевым предназначением; организация взаимодействия АДЦ ЕС ОрВД с другими службами и организациями.

Указанные выше функциональные задачи, решаемые в контурах технологического и организационного управления, могут быть, в свою очередь, декомпозированы до необходимого уровня детализации, что позволит получить функциональную модель системы. На основании функциональной модели разрабатывается комплекс мероприятий по совершенствованию (реформированию) существующих в системе процессов.

Следует отметить, что построение функциональной модели любой ОТС является обязательным этапом при построении систем автоматизированного управления ОТС.

Состояние системы — определяется в текущий момент времени совокупностью данных, характеризующих ее функционирование в соответствии с назначением.

Процесс в системе - это последовательность изменений состояний системы.

Процессы бывают управляемые и неуправляемые. Если процесс: 1) измеряем, т.е. контролируем; 2) направлен на достижение определенной цели, то он является управляемым. При этом качество управления напрямую зависит от наличия соответствующих технологий и умения персонала ими пользоваться.

Неуправляемые процессы - это, в первую очередь, связанные со случайными неконтролируемыми изменениями в системе, происходящими под воздействием различных отказов техники, непреднамеренных, естественных факторов непреодолимой силы и других внешних сил.

Управляемые изменения состояний системы происходит за счет преобразования материальных и/или информационных объектов, входящих в систему. Преобразование осуществляется с использованием ресурсов системы и также под воздействием соответствующего управления.

В организационно-технических системах управляемые процессы принято подразделять на следующие виды: деятельность, субдеятельность, процесс, подпроцесс, операция, действие.

1.3. Использование моделирования при исследовании и проектировании сложных систем

Моделирование можно рассматривать как один из методов проектирования и исследования систем.

Среди задач, возникающих в связи с исследованием и проектированием сложных систем, можно выделить три основных класса: задачи анализа, связанные с изучением свойств и поведения системы в зависимости от ее структуры и значений параметров; задачи синтеза, сводящиеся к выбору структуры и значений параметров системы, исходя из ее заданных (неизменяемых) свойств, цели функционирования и критерия эффективности; задачи управления системой в процессе ее функционирования, связанные с заблаговременным определением типовых алгоритмов (вариантов) поддержки управленческих решений в зависимости от состояния системы, ее ресурсов, а также предписанной стратегии и тактики поведения.

Под анализом понимается процесс исследования системы, основанный на ее декомпозиции с последующим определением статических и динамических характеристик составляющих элементов, рассматриваемых во взаимосвязи с другими элементами системы и окружающей средой.

Под статическими характеристиками понимаются входо-выходные отношения и связи переменных, характеризующие работу элементов в установившемся (стабильном) режиме. Они отражают, как правило, структурные ограничения по обработке входных данных и ресурсов, например, ограничения производительности систем обслуживания и ремонта, связанные с возможностями персонала, технических средств и технологического оборудования.

Аналогом статической характеристики при определении пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органа ОВД является коэффициент технического оснащения, исследуемого диспетчерского пункта (сектора), АС УВД с ассоциацией радиолокационной и плановой информации.

Под динамическими характеристиками понимают способность элементов системы изменять выходную производительность при изменении интенсивности входных потоков информации или материальных ресурсов за счет организации и использования резервов людских, технических и технологических ресурсов. Аналогом динамической характеристики в системе УВД является показатель времени, затрачиваемый диспетчером на осуществление ОВД, зависящий от интенсивности воздушного движения и ряда других факторов.

Цели анализа: детальное изучение системы для более эффективного использования и принятия решения по ее дальнейшему совершенствованию или замене; исследование альтернативных вариантов вновь создаваемой системы с целью выбора наилучшего варианта.

К задачам анализа относятся: определение объекта анализа; структурирование системы, т. е. установление связей и отношений между ее элементами; исследование информационных характеристик системы, отражающих состав и структуру информационных объектов и отношений между ними; определение количественных показателей, отражающих свойства элементов и системы в целом (например, показатель загрузки диспетчера УВД, интенсивность воздушного движения, пропускная способность диспетчерских пунктов (секторов) органов ОВД); оценка степени влияния характеристик, отражающих свойства системы, на критерий эффективности ее функционирования (оценка чувствительности критерия к характеристикам) — с целью выявления наиболее важных из них; оценка эффективности функционирования системы при различных вариантах (наборах) параметров модели, соответствующих определенным характеристикам системы.

Под синтезом понимается процесс создания новой системы путем определения ее рациональной (оптимальной) структуры и/или оптимальных параметров.

Цели синтеза: создание на основе достижений науки и совершенствования техники системы с новыми качествами, обеспечивающими максимальную эффектив-

ность функционирования; совершенствование существующей системы на основе выявленных недостатков, а также при появлении новых задач и требований, с использованием новых элементов и технологий, обеспечивающих повышение эффективности функционирования системы.

Синтез представляет собой, как правило, многошаговый итеративный процесс, осуществляемый с использованием моделей системы, включающий последовательное решение следующих основных задач: формирование цели и замысла создания системы; формирование вариантов новой системы; оценка эффективности вариантов и принятие решения о выборе варианта новой системы; реализация выбранного варианта новой системы.

Разработка современных сложных систем характеризуется специфическими техническими и организационными мероприятиями.

Основными этапами создания сложной системы обычно являются: формулирование требований к системе и обоснование технического задания на проектирование; разработка эскизного проекта; создание опытного образца в процессе рабочего проектирования; испытания; изготовление и ввод в эксплуатацию готового образца системы; опытная эксплуатация и доработка образца системы; организация выпуска, монтаж, наладка и ввод в эксплуатацию серийных образцов; модернизация системы.

Часто от исследователя требуется принятие решения по выбору оптимального варианта функционирования системы. Подобная задача обычно формулируется следующим образом: для исследуемого объекта требуется выбрать такие управления и их значения, при которых выходной показатель функционирования системы принимал бы экстремальное (максимальное или минимальное) значение. При этом цель задачи должна быть достигнута и удовлетворены условия по ограничениям (ресурсным, временным). В данном случае выходной показатель выполняет роль критерия оптимальности функционирования системы.

Под критерием оптимальности понимается численная характеристика, число, являющееся некоторой заданной функцией от существенных (основных) характеристик системы.

Критерий оптимальности отражает, как правило, качество или стоимость функционирования системы. В некоторых случаях стоимость может отходить на второй план. Это свойственно системам, обеспечивающим жизненно важные цели. Если задача имеет временную протяженность, то критерий оптимальности должен обеспечивать оценку качества принимаемых решений с учетом их последствий на выбранном интервале времени.

В зависимости от цели решаемой задачи, в качестве критерия оптимальности могут быть выбраны различные выходные показатели функционирования системы, например, качество, время, стоимость и пр. На некоторые показатели могут быть наложены ограничения. Например, если требуется организовать мероприятие так, чтобы в заданное время $T_{зад}$ выполнить задачу с максимально возможным эффектом W и при этом расход ресурсов C не должен превышать их выделенный объем $C_{выд}$, то

формулировка задачи будет иметь вид: выбрать такие варианты распределения ресурсов между элементами системы (или их распределение по времени), чтобы

$$W \rightarrow \max \quad \text{при} \quad C \leq C_{\text{выд}}, \quad T \leq T_{\text{зад}}.$$

В случае, когда требуется достичь уровня эффекта не ниже $W_{\text{треб}}$ при минимальном расходе ресурсов, задача формулируется в виде: выбрать такие варианты распределения ресурсов между элементами системы (или их распределение по времени), чтобы

$$C \rightarrow \min \quad \text{при} \quad W \geq W_{\text{треб}}, \quad T \leq T_{\text{зад}}.$$

Если задан уровень выполнения задачи $W_{\text{треб}}$ и известно ограничение по ресурсам $C_{\text{выд}}$, а требуется минимизировать время достижения цели, то: выбрать такие варианты распределения ресурсов между элементами системы (или их распределение по времени), чтобы

$$T \rightarrow \min \quad \text{при} \quad W \geq W_{\text{треб}}, \quad C \leq C_{\text{выд}}.$$

Критерий, по возможности, должен быть максимально простым, иметь ясный физический и/или экономический смысл и быть единственным. Усложнение критерия может затруднить анализ, не приведя к существенному повышению обоснованности решения. Единственность критерия также упрощает решение задачи, однако в ряде случаев практика вынуждает иметь дело с двумя и более критериями, иногда противоречивыми по своему смыслу. Для решения практических задач при наличии нескольких критериев существуют различные методические приемы и способы.

Показатели функционирования системы могут быть определены одним из двух способов: обработки данных натурального эксперимента и моделирования процессов функционирования системы. Последний способ является весьма эффективным, особенно на стадии проектирования системы.

1.4. Общая характеристика проблемы моделирования систем и процессов

Существует ряд проблем, возникающих в процессе моделирования систем. Исследователь должен акцентировать на них внимание и попытаться их разрешить, чтобы избежать получения недостоверных сведений об изучаемой системе.

Одна из основных проблем при моделировании – это проблема его целевого назначения. Подобие процесса, протекающего в модели, реальному процессу является не целью, а условием правильного функционирования модели, и поэтому в качестве цели моделирования должна быть поставлена задача изучения какой-либо стороны функционирования реального объекта. Правильно построенная модель позволяет выявлять лишь те свойства реального объекта, которые нужны исследователю в данном конкретном исследовании, и не рассматривает другие свойства объекта, несущественные для данного исследования. Такой подход позволяет пренебречь несущественными деталями в реальном объекте при его моделировании.

Моделирование базируется на некоторой аналогии реального объекта и его модели. В связи с этим можно указать проблеме нахождения «золотой середины» между упрощением и сложностью модели системы. Искусство моделирования в основном состоит в умении находить и отбрасывать факторы, не влияющие или незначительно влияющие на исследуемые характеристики системы. Нахождение этого компромисса

во многом зависит от опыта, квалификации и интуиции исследователя. Если модель слишком упрощена и в ней не учтены некоторые существенные факторы, то высока вероятность получить в результате применения этой модели ошибочные данные, с другой стороны, если модель сложная и в нее включены факторы, имеющие незначительное влияние на изучаемую систему, то повышаются затраты на создание такой модели и возрастает риск ошибки в логической структуре модели.

Следующая проблема заключается в моделировании взаимодействий с окружающей средой. Большинство динамических организационно-технических систем являются стохастическими, и при их моделировании необходимо, как минимум, учитывать влияние этих взаимодействий таким образом, чтобы обеспечить несмещенность вероятностных оценок, получаемых с помощью модели. В противном случае результаты моделирования могут не вполне соответствовать действительности.

Другой проблемой является также оценка качества модели и полученных с ее помощью результатов. Адекватность моделей может быть оценена методом экспертных оценок, сравнением с другими моделями (уже подтвердившими свою достоверность), по полученным результатам. В свою очередь, для проверки полученных результатов часть из них сравнивается с уже имеющимися данными.

Если модель построена, то следующей задачей следует считать реализацию модели, обеспечивающую минимальное время получения конечных результатов и их достоверность.

Таким образом, характеризуя проблему моделирования в целом, необходимо учитывать, что от постановки задачи моделирования до интерпретации полученных результатов потребуется пройти большой путь решения сложных научно-технических проблем, к основным из которых можно отнести следующие: идентификация реальных объектов; выбор типа моделей; построение моделей и их машинная реализация; взаимодействие исследователя с моделью в ходе машинного эксперимента; проверка правильности полученных в ходе моделирования результатов; выявление основных закономерностей, исследованных в процессе моделирования.

1.5. Классификация моделей систем и процессов

Классификация моделей по степени полноты

В качестве одного из первых признаков классификации моделей можно выбрать степень полноты модели и разделить модели в соответствии с этим признаком на полные и неполные (приближенные) модели.

При моделировании абсолютное подобие не имеет места, и стремятся к тому, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функционирования объекта.

Неполные (приближенные) модели классифицируются по признаку материальности модели. В соответствии с этим признаком все модели можно разделить на абстрактные (мысленные) и реальные.

Реальные модели позволяют исследовать различные характеристики либо на реальном объекте целиком или его части, либо исследование проводится на специ-

альных установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. В соответствии с этим реальные модели разделяются на натурные и физические.

Натурные модели представляют собой материальный объект, или макет, отражающий основные свойства исследуемого объекта (системы) и построенный точно в соответствии со структурой исследуемого объекта (системы).

При натурном моделировании исследование проводится в виде натурального эксперимента. Отличие эксперимента от реального протекания процесса заключается в том, что в нем можно смоделировать отдельные критические ситуации и благодаря этому определить границы устойчивости процесса. С этой целью в ходе эксперимента искусственно вводятся новые факторы и возмущающие воздействия в процесс функционирования объекта.

Такие разновидности натурального эксперимента, как производственный эксперимент и комплексные испытания, при соответствующей обработке результатов эксперимента обладают высокой степенью достоверности.

С развитием техники появилось понятие научного эксперимента. Научный эксперимент характеризуется широким использованием средств автоматизации, применением средств обработки информации и возможностью вмешательства человека в процесс проведения эксперимента.

Физические модели отражают в основном физические свойства исследуемого объекта (системы). При физическом моделировании задаются некоторые характеристики поведения исследуемого объекта (системы) с помощью физических установок. С помощью физических установок может моделироваться также воздействие внешней среды на реальный объект. Физическое моделирование может протекать в реальном и нереальном масштабах времени, а также может рассматриваться без учета времени.

Абстрактные модели отражают предварительные, приближенные представления об исследуемом объекте (системе). Абстрактное моделирование часто является единственным способом моделирования объектов, которые либо практически нереализуемы в заданном интервале времени, либо существуют вне условий, возможных для их физического создания. Абстрактные модели реализуются в виде наглядных, символических и математических моделей.

Наглядные модели создаются на базе мысленных представлений человека о реальных объектах. Данные модели реализуются в виде: гипотетических моделей, аналоговых моделей и мысленных макетов.

В основу гипотетического моделирования исследователем закладывается некоторая гипотеза о закономерностях протекания процесса в реальном объекте, которая отражает уровень знаний исследователя об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта. Гипотетическое моделирование используется, когда знаний об объекте недостаточно для построения формальных моделей.

Аналоговое моделирование основывается на применении аналогий различных уровней. Наивысшим уровнем является полная аналогия, имеющая место только для достаточно простых объектов. С усложнением объекта используют аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько либо только одну сторону функционирования объекта.

Мысленный макет может применяться в случаях, когда протекающие в реальном объекте процессы не поддаются реальному моделированию, либо может предшествовать проведению других видов моделирования. В основе построения мысленных макетов также лежат аналогии, однако обычно базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в объекте.

Символические модели основаны на искусственном процессе создания логического объекта, который замещает реальный и выражает основные свойства его отношений с помощью определенной системы знаков или символов. Данные модели реализуются в виде языковых и знаковых моделей.

Языковые модели - это словесные модели, в основе которых лежит набор слов (словарь), очищенных от неоднозначности. Этот словарь называется "тезаурус". В нем каждому слову может соответствовать лишь единственное понятие, в то время как в обычном словаре одному слову могут соответствовать несколько понятий.

Если ввести условное обозначение отдельных понятий, т.е. знаки, а также определенные операции между этими знаками, то можно реализовать знаковое моделирование и с помощью знаков отображать набор понятий - составлять отдельные цепочки из слов и предложений. Используя операции объединения, пересечения и дополнения теории множеств, можно в отдельных символах дать описание какого-то реального объекта.

Математические модели являются теми абстрактными формально описанными объектами, изучение которых возможно различными математическими методами. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта и требуемой достоверности и точности решения этой задачи. Математические модели для исследования характеристик процесса функционирования систем можно разделить на: аналитические, имитационные и комбинированные.

Для аналитического моделирования характерно установление формульных, аналитических зависимостей между параметрами процесса функционирования элементов системы, записанных в любом виде:

алгебраические уравнения, обыкновенные дифференциальные уравнения, уравнения с частными производными и т. д. Чтобы такое аналитическое описание процесса функционирования системы было возможно, как правило, нужно принять те или иные допущения или упрощения.

С помощью аналитических моделей удастся с удовлетворительной точностью описать только сравнительно простые процессы функционирования системы, где число взаимодействующих элементов невелико. Аналитические модели наиболее приемлемы в задачах поиска оптимальных управленческих решений в условиях воз-

действия случайных факторов. В процессах большого масштаба, в которых наблюдается действие огромного количества факторов, в том числе и случайных, на первый план выходит метод имитационного моделирования, который получил наибольшее развитие с появлением ЭВМ.

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования исследуемой системы во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики исследуемой системы.

Когда результаты, полученные при воспроизведении на имитационной модели процесса функционирования исследуемой системы, являются реализациями случайных величин и функций, тогда для нахождения характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой информации.

Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи анализа больших систем, включая задачи оценки: вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменения различных параметров системы. Имитационное моделирование может быть положено также в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза больших систем, когда требуется создать систему с заданными характеристиками при определенных ограничениях, которая является оптимальной по некоторым критериям оценки эффективности.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой комбинированный подход позволяет охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием только аналитического и имитационного моделирования в отдельности.

Классификация моделей по характеру моделируемых процессов

Другим исходным признаком классификации моделей может служить характер моделируемых процессов в системе. В зависимости от этого признака все модели могут быть разделены на детерминированные и стохастические, статические и динамические, дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные.

Детерминированное моделирование отображает детерминированные процессы, т. е. процессы, в которых предполагается отсутствие всяких случайных воздействий.

Стохастическое моделирование отображает случайные процессы и события. В этом случае анализируется совокупность реализаций случайного процесса и оцениваются средние характеристики.

Статическое моделирование служит для определения неизменных во времени входо-выходных связей в системе (статических характеристик), а динамическое моделирование отражает поведение объекта во времени на основе учета динамических характеристик, отражающих изменчивость структуры и/или параметров системы, в том числе вероятностных характеристик процессов.

Дискретное моделирование служит для описания процессов, которые являются дискретными, соответственно непрерывное моделирование позволяет отразить непрерывные процессы в системах, а дискретно-непрерывное моделирование используется для случаев, когда в модели хотят учесть наличие в системе как дискретных, так и непрерывных процессов.

Классификация моделей по способу представления объекта моделирования

По способу представления объекта моделирования различают: структурные модели; функциональные модели; структурно-функциональные модели.

Структурные модели представляют объект как систему со своим устройством и механизмом функционирования, в случае ОТС как организационную или организационно-штатную структуру.

Структурное моделирование проводится с целью исследования характеристик системы путем выделения в ней подсистем и элементов различного уровня и связей между ними. Структурированию могут подвергаться различные составляющие системы: элементы системы; функции, выполняемые элементами системы; информация, циркулирующая в системе.

Под структурной моделью будем понимать множество компонентов (элементов) системы или процесса, связанных отношениями входимости. При этом говорят, что объект A входит в состав объекта B при выполнении условия C .

Структурная модель технической системы, например, отражает состав системы в терминах естественной иерархии: система - подсистема - блок - узел — деталь. Это означает, что система состоит из подсистем, подсистемы - из блоков, блоки - из узлов, узлы - из деталей. При этом не исключается прямая входимость элементов низших уровней непосредственно в состав элементов высших уровней. Например, некоторые детали могут входить непосредственно в систему или блок.

Иерархия процессов, протекающих в системе, имеет следующий вид: процесс — подпроцесс — операция — действие. При этом рассматриваются только состав протекающих в системе процессов, входимость их друг в друга, и не рассматривается преобразование входных материальных и информационных потоков (сигналов) в выходные потоки (сигналы).

Аналогично для организационно-технических систем состав системы в терминах естественной иерархии может определиться как: организация – департамент (управление) - отдел - специалист.

Любая структурная модель может быть представлена графом (схемой), вершины которого соответствуют элементам, а ребра – отношениям входимости. Фрагмент структурной схемы на примере технической системы представлен на рис. 1.5.

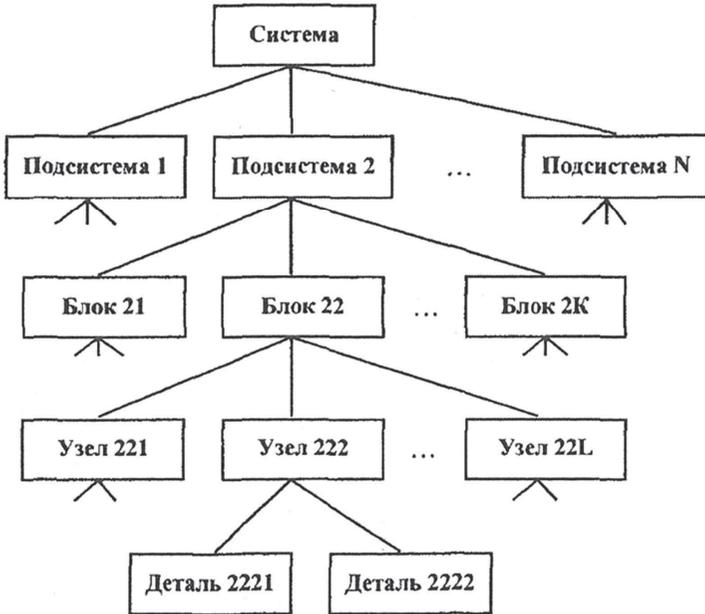


Рис. 1.5. Фрагмент структурной схемы технической системы

При структурном моделировании объектами исследования являются различные варианты структур системы. Варианты структур могут быть получены как в результате декомпозиции (с целью решения задачи анализа системы), так и в результате композиции (с целью решения задачи синтеза системы).

В качестве характеристик исследуемой структуры, используются как характеристики элементов системы и связей между элементами, так и обобщенные показатели структур.

К основным обобщенным показателям исследуемых структур относятся: число элементов системы; степень резервирования основных элементов системы; вероятность выполнения системой заданной функции при данной структуре и др.

Функциональные модели не содержат в себе представлений о структуре моделируемой системы и отражают только внешне воспринимаемое поведение (функционирование) объекта. В их предельном выражении они называются также моделями «чёрного ящика».

В основе функционального моделирования лежит идея отображения функциональных процессов, протекающих в исследуемой системе. Объектом функционального моделирования является общий процесс функционирования системы, состоящий из частных функций (задач, операций), выполняемых элементами системы.

Основной концептуальный принцип функционального моделирования – представление любой изучаемой системы в виде набора взаимодействующих и взаимосвязанных функциональных блоков, отображающих функции (процессы, операции, дей-

ствия), происходящие в изучаемой системе. Каждая функция может быть декомпозирована на более мелкие функции, например, процесс может быть декомпозирован на операции.

Функциональная модель принципиально не может ответить на вопросы о том, как протекают процессы в системе во времени и в пространстве, каковы их характеристики и в какой мере удовлетворяются (или не удовлетворяются) требования, предъявляемые к системе. Все эти вопросы с неизбежностью возникают после того, как в процессе моделирования достигнут нижний уровень декомпозиции функций, т.е. обозначены функции нижнего уровня, с помощью которых и работает система. В этом случае рекомендуется переходить к другим моделям - аналитическим, имитационным и другим моделям, позволяющим получить ответ на указанные вопросы.

Возможны также комбинированные типы моделей (структурно-функциональные), которые иногда называют моделями «серого ящика».

Моделирование технических систем неизбежно связано с отображением большого числа образующих их реальных элементов и их функций. Моделирование функциональных преобразований, осуществляемых реальными элементами системы, является важнейшей предпосылкой и составной частью моделирования самой системы.

В математическом смысле целью моделирования технических систем является определение функциональной зависимости f выходного процесса системы от параметров входного процесса, если известны состав, структура и физические свойства элементов системы.

В силу того, что общая модель системы разбивается на функциональные элементы, имеющие физические аналоги в реальной системе, и обеспечивается подобие для каждого из них, можно проследить за характером преобразований осуществляемых каждым элементом системы. Поэтому моделирование технических систем носит, как правило, характер структурно-функционального моделирования.

Рассмотрим в качестве примера техническую систему, а именно – замкнутую систему автоматического регулирования, схема которой представлена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Структурно-функциональная схема замкнутой системы автоматического регулирования

Процесс функционирования системы описывается следующим образом. Входной сигнал x поступает на входное устройство. Сюда же подается выходной сигнал y с обратным знаком (отрицательная обратная связь). Разность $x - y$, образованная вход-

ным устройством, поступает на усилитель, имеющий коэффициент усиления k_1 и питающийся от источника питания. Исполнительный орган вырабатывает выходной сигнал y , скорость изменения которого пропорциональна (с коэффициентом пропорциональности k_2) сигналу на его входе (на выходе усилителя).

Если исполнительное устройство описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка, то описанную здесь зависимость можно представить в виде:

$$\frac{dy}{dx} = k_1 k_2 (x - y) \quad (1.1)$$

или

$$\frac{dy}{dx} + k_1 k_2 y = k_1 k_2 x \quad (1.2)$$

В данном случае характеристиками состояния системы будут переменные:

$$z_1(t) = x, \quad z_2(t) = y, \quad z_3(t) = \frac{dy}{dt},$$

параметрами будут постоянные k_1 и k_2 .

Отношение (1.2) связывает характеристики состояния системы с ее параметрами. Эта связь основывается на учете природы элементов системы и взаимодействия между ними. Она охватывает не только количественные показатели между величинами, фигурирующими в системе, но и ее структуру. В самом деле, замена мест элементов системы (например, входного устройства и усилителя), ликвидация обратной связи или изменение её контура (например, подача величины y на усилитель) приведут кардинальному изменению вида уравнения (1.2).

В качестве примера структурно-функциональной модели ОТС может быть рассмотрена обобщенная схема работы специалистов группы руководства полётами (ГРП) государственной авиации в режиме контроля динамической воздушной обстановки (ВО) [4], представленная на рис.1.7.

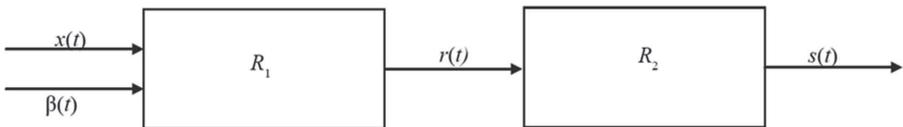


Рис. 1.7. Структура функционирования специалиста ГРП в режиме контроля динамической воздушной обстановки

Структура функционирования специалиста ГРП в режиме контроля динамической ВО показана с использованием блоков, преобразующих сигнал и шум: $r(t)$ - сенсорное восприятие специалиста группы руководства полётами; $x(t)$ - физический сигнал (отметки от воздушных судов (ВС), выполняющих полет под управлением специалиста ГРП); $s(t)$ - сигнал в виде случайной функции суждений (действий); $\beta(t)$ - обозначение шума в модели (отметки от посторонних ВС, стай птиц, местных предметов и др.); R_1 - функциональный оператор отображения физического сигнала $x(t)$ в сен-

сорное восприятие специалиста группы руководства полетами - $r(t)$. R_2 - функциональный оператор принятия решений, преобразующий воспринятый сигнал в определенное суждение (действие).

Примером обобщенной структурно-функциональной модели может быть схема процесса регулирования потока воздушного движения [8], представленная на рис.1.8.

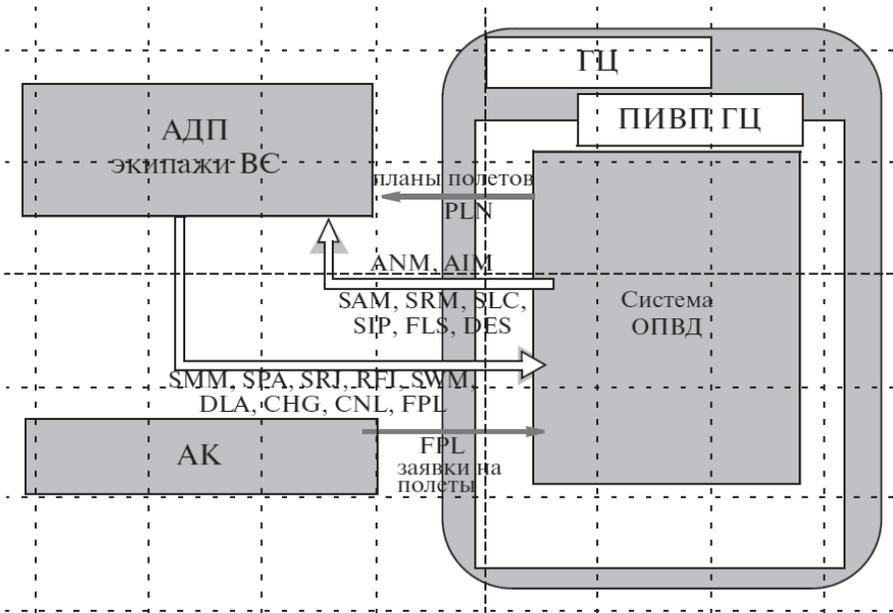


Рис. 1.8. Схема процесса регулирования потока воздушного движения

Данная модель была разработана для исследования эффективности различных вариантов регулирования потоков воздушного движения (ВД) путем назначения слотов вылета, а также влияния на эффективность различных стратегий как централизованной системы планирования, так и пользователей, влияния различных параметров регулирования. Актуальность таких исследований определяется необходимостью внедрения в аэронавигационную систему России средств регулирования потоков ВД на этапе тактического (текущего) планирования и, соответственно, тактической организации потоков воздушного движения (ОПВД).

В процессе регулирования участвуют главный центр (ГЦ) Единой системы, аэродромные диспетчерские пункты (АДП), авиакомпании (АК) или экипажи ВС. Из АК в систему ОПВД поступают заявки на полеты, система ОПВД решает задачу выбора перегруженных элементов ВП, расчета задержек рейсов, которые могли бы привести к устранению перегрузок ВП, и рассылки соответствующих сообщений заинтересованным органам – АК и АДП.

Основными показателями, по которым производится оценка эффективности регулирования потоков ВД, являются: суммарная задержка рейсов, фактически реализовавшаяся по причине регулирования, на интервале 24 ч с начала регулирования;

оставшаяся после регулирования перегрузка (если регулирование не справляется полностью со своей задачей), фактически реализовавшаяся при применении регулирования, суммарная за 24 ч; количество регулируемых полетов, средняя задержка на полет.

Моделирование позволило получить: зависимость суммарной фактической задержки рейсов из-за регулирования от параметров диапазона регулирования D и максимальной задержки $\max\text{delay}$; выявить область, в которой регулированием можно обеспечить отсутствие перегрузок; в этой области на плоскости параметров найти минимум функции суммарной фактической задержки, который достигается при $D = 7-8$ ч, $\max\text{delay} = 6-7$ ч при текущих значениях средней интенсивности потока ВД и пропускных способностей секторов УВД в России.

Таким образом благодаря моделированию процесса регулирования потоков ВД (с обратной связью – стратегией пользователя ВП) могут быть выбраны параметры регулирования, позволяющие достичь решения проблемы перегрузок с минимальной суммарной задержкой регулирования.

1.6. Средства моделирования систем и процессов

Современные ЭВМ можно разделить на две группы: универсальные, предназначенные прежде всего для выполнения научно-технических расчетных задач, и управляющие, позволяющие выполнять не только расчетные задачи, но, прежде всего, приспособленные для управления объектами в реальном масштабе времени. Управляющие ЭВМ могут быть использованы как для управления технологическим процессом, экспериментом, так и для реализации различных имитационных моделей.

Таким образом, в зависимости от того, удастся ли построить достаточно точную математическую модель реального процесса или вследствие сложности объекта не удастся описать реальный процесс какими-то аналитическими соотношениями, можно рассматривать два основных пути использования ЭВМ при моделировании: как средство расчета по полученным аналитическим моделям и как средство имитационного моделирования.

Имитационная модель в данном случае может рассматриваться как машинный аналог сложного реального процесса и позволяет заменить эксперимент с реальным процессом функционирования системы экспериментом с математической моделью этого процесса в ЭВМ.

Сущность машинного моделирования систем и процессов состоит в проведении на вычислительной машине эксперимента с моделью, которая представляет собой некоторый программный комплекс, описывающий формально и (или) алгоритмически поведение элементов системы в процессе ее функционирования.

Моделирование с использованием средств вычислительной техники позволяет исследовать механизм явлений, протекающих в реальном объекте с большими или малыми скоростями, когда в натуральных экспериментах с объектом трудно (или невозможно) проследить за изменениями, происходящими в течение короткого времени, или когда получение достоверных результатов сопряжено с длительным экспериментом.

Машинное моделирование с успехом применяется также в тех случаях, когда трудно четко сформулировать критерий оценки качества функционирования системы и цель ее не поддается полной формализации, поскольку позволяет сочетать программно-технические возможности ЭВМ со способностями человека мыслить неформальными категориями.

Моделирование систем и процессов с помощью ЭВМ можно использовать в следующих случаях: для исследования вариантов системы (до того, как она спроектирована), с целью определения чувствительности критерия эффективности к различным изменениям структуры и параметров объекта моделирования и внешней среды; на этапе проектирования системы для анализа и синтеза различных вариантов системы и выбора такого варианта, который удовлетворял бы требуемым значениям критерия эффективности системы при принятых ограничениях; после завершения проектирования и внедрения системы, т. е. при ее эксплуатации, для калибровки моделей по результатам натурных испытаний (эксплуатации) реальной системы, и для получения прогнозов эволюции (развития) системы во времени. Калибровка модели необходима с целью создания задела, связанного с будущей модернизацией или проектированием системы нового поколения.

Сама постановка вопроса о моделировании какой-либо системы или процесса на ЭВМ порождает четкий план действий, который впервые был сформулирован академиком А. А. Самарским в виде триады этапов моделирования "модель - алгоритм - программа".

На первом этапе выбирается (или строится) «эквивалент» системы или процесса, отражающий в математической форме важнейшие их свойства - законы, которым они подчиняются, связи между элементами системы и т. д. Математическая модель исследуется теоретическими методами, что позволяет получить важные предварительные знания о системе и процессах в ней.

Второй этап - выбор (или разработка) алгоритма для реализации модели на компьютере. Модель представляется в форме, удобной для применения численных методов, определяется последовательность вычислительных и логических операций, которые нужно произвести, чтобы найти искомые величины с заданной точностью. Вычислительные алгоритмы должны не исказить основные свойства модели и, следовательно, исходного объекта, быть экономичными и адаптирующимися к особенностям решаемых задач и используемых компьютеров.

На третьем этапе создаются программы, «переводящие» модель и алгоритм на доступный компьютеру язык. Их можно назвать «электронным» эквивалентом изучаемого объекта, уже пригодным для непосредственного испытания на ЭВМ.

Создав триаду «модель — алгоритм - программа», исследователь получает в руки универсальный, гибкий и недорогой инструмент, который вначале отлаживается, тестируется в пробных вычислительных экспериментах.

После того, как адекватность (достаточное соответствие) триады исходному объекту удостоверена, с моделью проводятся разнообразные и подробные «опыты»,

дающие все требуемые качественные и количественные свойства и характеристики систем и процессов.

Процесс моделирования, по мере необходимости, сопровождается улучшением и уточнением всех звеньев триады.

Эффективность применения ЭВМ для моделирования систем и процессов

При моделировании на ЭВМ весьма существенен вопрос его эффективности. Эффективность моделирования на ЭВМ может оцениваться рядом частных и общих критериев, в том числе точностью и достоверностью результатов моделирования, временными затратами на создание и использование модели, затратами машинных ресурсов (времени и памяти), стоимостью разработки и эксплуатации модели и др.

Как следует ожидать, наилучшей оценкой эффективности моделирования на ЭВМ, является сравнение получаемых результатов с результатами натурного эксперимента. Однако на самом деле это вопрос не такой простой. Если при создании новой системы предсказанный результат не удалось повторить в натурной модели, то в этом не всегда - вина математической модели. Проблема может заключаться в отсталости технологий, на базе которых создается система.

В настоящее время велика роль также вероятностных моделей систем, позволяющих во многом заменить статистические подходы и оперативно оценивать вероятностные характеристики процессов на основе использования высокоточных аппроксимаций реальных законов распределения переменных, результатов мониторинга и статистической обработки данных, характеризующих случайные параметры элементов системы. При этом возможны не только оценки трендов (математических ожиданий процессов), но и рисков, сопутствующих тем или иным выбранным управленческим решениям.

Оперативность (высокое быстродействие) и достаточная информационная полнота (характеризующаяся возможностью учета широкого спектра модельных данных) современных вероятностных моделей позволяет ставить и решать эффективные оптимизационные задачи по выбору параметров элементов систем, вплоть до оптимального функционального управления ими.

Важным показателем эффективности являются затраты машинного времени. В связи с использованием ЭВМ различного типа суммарные затраты складываются из времени по вводу и выводу данных по каждому алгоритму моделирования, времени на проведение вычислительных операций с учетом обращения к оперативной памяти и внешним устройствам, а также сложности каждого моделирующего алгоритма. Расчеты затрат машинного времени являются приближенными и могут уточняться по мере отладки программ и накопления опыта у исследователя при работе с моделями.

Программно-аппаратные средства моделирования систем и процессов

В последние годы в развитии программного обеспечения для моделирования на ЭВМ имеется тенденция применения интегрированных пакетов прикладных программ, включающих наряду со специализированными программами и программы подготовки отчетов и др.

Microsoft Excel — программа для работы с электронными таблицами. Она предоставляет возможности экономико-статистических расчетов, графические инструменты, язык макропрограммирования потоков данных Power Query и язык макропрограммирования VBA (Visual Basic for Application). Microsoft Excel входит в состав Microsoft Office.

Ценной возможностью Excel является возможность писать код на основе Visual Basic для приложений (VBA). Этот код пишется с использованием отдельного от таблиц редактора. Управление электронной таблицей осуществляется посредством объектно-ориентированной модели кода и данных. С помощью этого кода данные входных таблиц будут мгновенно обрабатываться и отображаться в таблицах и диаграммах (графиках). Таблица становится интерфейсом кода, позволяя легко работать, изменять его.

SimInTech – программная платформа для разработки математических моделей, алгоритмов управления, мнемосхем и видеок кадров, обладающая возможностью автоматической генерации кода для программируемых контроллеров.

SimInTech является модульным программным обеспечением, в составе которого есть несколько математических ядер, база данных, графическая среда разработки, кодогенераторы и другие модули.

SimInTech обладает широкими возможностями для организации вычислений, связанных с решением алгебраических и дифференциальных уравнений.

Математические модели в SimInTech создаются в визуальном виде с использованием функционально-блочного программирования при помощи блоков, которые содержатся в различных библиотеках.

Для создания математических моделей SimInTech содержит библиотеки: теплогидравлики, электротехники, электрических приводов, силовых гидравлических/пневматических машин, механических взаимодействий, баллистики космических аппаратов, динамики полета летательных аппаратов в атмосфере, и т. д.

В SimInTech возможна разработка как простых моделей, подробно описывающих поведение какой-либо системы (например, RLC-контур с источником питания), так и сложных моделей, которые подробно описывают не только саму систему, но и алгоритмы управления, защиты, интерфейс управления и пр.

Для создания моделей применяются шаблоны проектов, которые оптимально подходят для решения определенного круга задач.

Для организации обмена данными между расчетными схемами, созданными в разных шаблонах, используется база данных сигналов – структурированное хранилище переменных, используемых в одном или нескольких проектах, входящих в состав сложной модели.

AnyLogic — программное обеспечение для имитационного моделирования. Инструмент обладает современным графическим интерфейсом и позволяет использовать язык Java для разработки моделей. Графическая среда моделирования AnyLogic включает в себя следующие элементы: Stock & Flow Diagrams (диаграмма потоков и

накопителей) применяется при разработке моделей, используя метод системной динамики; Statecharts (карты состояний) в основном используются в агентных моделях для определения поведения агентов, а также в дискретно-событийном моделировании, например, для симуляции машинных сбоев; Action charts (блок-схемы) используются для построения алгоритмов, которые применяются в дискретно-событийном моделировании (маршрутизация звонков) и агентном моделировании (для логики решений агента); Process flowcharts (процессные диаграммы) — основная конструкция, используемая для определения процессов в дискретно-событийном моделировании.

Среда моделирования также включает в себя: низкоуровневые конструкции моделирования (переменные, уравнения, параметры, события и т.п.), формы представления (линии, квадраты, овалы и т.п.), элементы анализа (базы данных, гистограммы, графики), стандартные картинки и формы экспериментов.

Среда моделирования AnyLogic поддерживает проектирование, разработку, документирование модели, выполнение компьютерных экспериментов с моделью, включая различные виды анализа — от анализа чувствительности до оптимизации параметров модели относительно некоторого критерия.

Система Business Studio является инструментом для проектирования организации, или, другими словами, создания «чертежа» ее бизнес-архитектуры. Business Studio позволяет создать комплексную модель бизнес-архитектуры, включающую: требования к бизнесу со стороны собственников и стратегию их выполнения; концептуальную модель деятельности, которая используется для выработки принципиальных решений о его устройстве; подробные операционные описания бизнес-процессов, дающие конкретные представления о том, что и как должно делаться в компании; организационную структуру; структуру информационных систем и данных; ресурсы и средства производства, участвующие в выполнении операций.

Business Studio позволяет разработать как концептуальные модели функций компании, так и подробные модели бизнес-процессов. Для этого в распоряжение бизнес-аналитика предоставляются наиболее популярные и удобные нотации моделирования: IDEF0; процедура (Cross-Functional Flowchart); BPMN 2.0; процесс (Basic Flowchart); EPC (Event-Driven Process Chain); VAD; FAD.

1.7. Разработка и реализация моделей систем и процессов

Процесс моделирования представляет собой последовательную трансформацию моделей различных уровней представления (отображения) друг в друга и включает в себя ряд этапов (рис. 1.9).

Основными этапами моделирования систем и процессов являются: 1. Построение содержательного описания объекта моделирования. 2. Разработка формальной модели системы и протекающих в ней процессов в виде некоторой математической схемы. 3. Разработка на основе формальной модели математической модели системы и протекающих в ней процессов. 4. Разработка на основе математической модели логической схемы моделирующего алгоритма. 5. Разработка программного приложения, реализующего моделирующий алгоритм, для моделирования на ЭВМ. 6. Получение и интерпретация результатов моделирования.

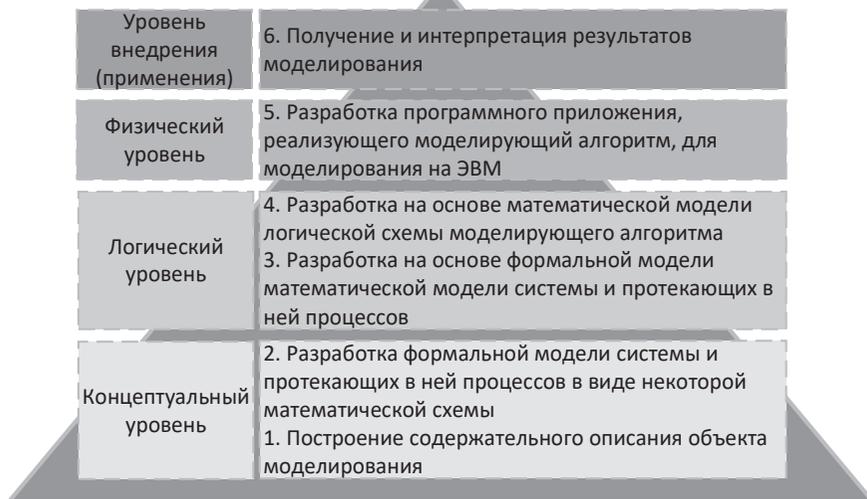


Рис. 1.9. Этапы моделирования систем и процессов

Первые два этапа соответствуют концептуальному уровню представления модели и позволяют получить концептуальную модель системы и процессов в ней. Концептуальная модель включает в себя содержательное описание и формализованную схему объекта моделирования.

Содержательное описание объекта моделирования представляется в виде некоторого отображения состава и структуры системы и ее элементов, и протекающих в системе процессов. Содержательное описание также должно включать в себя данные о назначении и условиях работы, исследуемой (проектируемой) системы, цель моделирования, требования к модели, уровень абстрагирования и другую полезную для моделирования информацию.

Формализованная схема является промежуточным звеном между содержательным описанием и математической моделью. Для построения формализованной схемы необходимо выбрать характеристики процесса, установить параметры, определяющие процесс, определить зависимости между характеристиками и параметрами процесса с учетом тех факторов, которые принимаются во внимание при формализации. На этапе построения формализованной схемы должна быть дана точная математическая формулировка задачи исследования.

Концептуальная модель должна быть понятна должностным лицам - специалистам по предметной области, при этом необязательно являющимися профессиональными специалистами в области моделирования.

Третий и четвертый этапы соответствуют логическому уровню представления модели и позволяют получить логическую модель системы и протекающих в ней процессов. Логическая модель включает в себя математическую модель и логическую схему моделирующего алгоритма. Следует отметить, что логическая модель строится

независимо от будущей ее физической реализации, т.е. независимо от того, в каких инструментальных компьютерных средствах будет реализована модель. Создание логических моделей могут выполнять, как правило, специалисты в области моделирования систем и процессов.

Разработка физической модели (пятый этап) выполняется с использованием конкретных инструментальных компьютерных средств (физический уровень). Физическая модель разрабатывается, как правило, специалистами, имеющими опыт программирования.

Получение и интерпретация результатов моделирования (шестой этап) осуществляются, как правило, специалистами в предметной области при решении тех задач, для которых и создавалась данная модель. Этот этап соответствует уровню внедрения (применения) разработанной модели.

Разработка концептуальных моделей систем и процессов, и их формализация

Основным содержанием этапа разработки концептуальных моделей систем и процессов является получение содержательного описания и формализованной схемы объекта моделирования.

Содержательное описание представляет собой первую попытку четко изложить состав системы и протекающих в ней процессов, закономерности, характерные для исследуемых процессов, а также поставить задачу на моделирование. Постановка задачи должна содержать четкое изложение идеи предполагаемого исследования, перечень зависимостей, подлежащих оценке по результатам моделирования и установить те факторы, которые должны быть учтены при построении модели. Эта часть формализации может быть выполнена без участия математиков или соответствующих специалистов по моделированию.

При формировании содержательного описания устанавливается структура модели. При этом устанавливается: какие элементы системы или процесса будут включены в модель; какие элементы будут исключены или будут считаться частью окружающей среды; какие структурные взаимосвязи будут установлены между ними.

Результатом этого этапа является, как правило, графическое представление системы или процесса в виде структурной или функциональной схемы. Сюда же включаются данные, необходимые для исследования: численные значения известных характеристик и параметров протекающих в системе процессов (в виде таблиц, графиков), а также значения начальных условий.

Содержательное описание является исходным материалом для последующего этапа формализации — построения формализованной схемы протекающих в системе процессов. Формализованная схема разрабатывается в том случае, когда из-за сложности процесса или трудностей формализации некоторых его элементов непосредственный переход от содержательного описания к математической модели невозможен или нецелесообразен. Формализованная схема разрабатывается совместно со специалистами прикладной области техники и моделирования (или

математиков). Хотя форма описания может остаться словесной, однако она должна являться строго формальным описанием процесса.

При разработке формализованной схемы для конкретного объекта моделирования разработчику модели должны помочь конкретные, уже прошедшие апробацию для данного класса систем математические схемы, показавшие свою эффективность в прикладных исследованиях на ЭВМ и получившие название типовых математических схем. В состав типовых математических схем входят: дифференциальные уравнения, конечные и вероятностные автоматы, системы массового обслуживания, сетевые модели и т. д.

Типовые математические схемы моделирования следует использовать в первую очередь, а создавать оригинальные математические схемы следует лишь при необходимости. При этом исследователя в первую очередь должен интересовать вопрос адекватности отображения реальных процессов в исследуемой системе конкретными математическими схемами, а не возможность получения ответа на конкретный вопрос исследования.

При разработке формализованной схемы необходимо: выявить факторы, оказывающие влияние на ход исследуемого процесса или его результаты; выбрать те из них, которые поддаются формализованному представлению (т.е. могут быть выражены количественно); объединить по возможности выявленные факторы по общим признакам, сократив их перечень; установить количественные соотношения между ними.

После того как выявлены существенные факторы, следующий шаг состоит в переводе их на язык математических понятий и определении соотношений между этими величинами, т. е. построении математической модели. Как правило, это наиболее трудная стадия процесса моделирования.

Обобщенные математические модели процессов и систем

Математическую модель объекта моделирования можно представить в виде множества величин, описывающих процесс функционирования реальной системы (рис. 1.10) и образующих в общем случае следующие подмножества:

- совокупность входных воздействий на систему

$$x_i \in X, \quad i = \overline{1, n_X};$$

- совокупность воздействий внешней среды

$$v_l \in V, \quad l = \overline{1, n_V};$$

- совокупность внутренних (собственных) параметров системы

$$h_k \in H, \quad k = \overline{1, n_H};$$

- совокупность выходных характеристик системы

$$y_j \in Y, \quad j = \overline{1, n_Y};$$

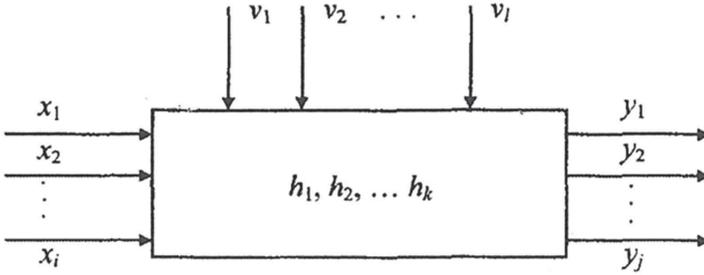


Рис. 1.10. Графическое представление математической модели системы

В перечисленных подмножествах можно выделить управляемые и неуправляемые переменные. В общем случае x_i, v_i, h_k, y_j являются элементами непересекающихся подмножеств и содержат как детерминированные, так и стохастические составляющие.

При моделировании системы входные воздействия, воздействия внешней среды и внутренние параметры системы являются независимыми переменными, которые в векторной форме имеют соответственно вид:

$$\begin{aligned}\vec{x}(t) &= (x_1(t), x_2(t), \dots, x_{nX}(t)); \\ \vec{v}(t) &= (v_1(t), v_2(t), \dots, v_{nV}(t)); \\ \vec{h}(t) &= (h_1(t), h_2(t), \dots, h_{nH}(t)).\end{aligned}\quad (1.3)$$

Выходные характеристики системы являются зависимыми переменными и в векторной форме имеют вид:

$$\vec{y}(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_{nY}(t)). \quad (1.4)$$

Процесс функционирования системы описывается во времени оператором F , который преобразует независимые переменные в зависимые в соответствии с соотношениями вида

$$\vec{y}(t) = F_S(\vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t). \quad (1.5)$$

Соотношение (1.5) является математическим описанием поведения объекта (системы) моделирования во времени t , т. е. отражает его динамические свойства. Поэтому математические модели такого вида принято называть динамическими моделями.

Для статических моделей математическая модель (1.5) представляет собой отражение между двумя подмножествами свойств моделируемого объекта Y и $\{X, V, H\}$, что в векторной форме может быть записано как

$$\vec{y}(t) = f(\vec{x}, \vec{v}, \vec{h}). \quad (1.6)$$

Соотношения (1.5) и (1.6) в ряде случаев могут быть получены через свойства системы в конкретные моменты времени, называемые состояниями. Состояние системы в определенный момент времени характеризуется вектором

$$\vec{z}(t) = (z_1, z_2, \dots, z_k).$$

Очевидно, что моменту времени t_0 соответствует некоторое начальное состояние системы с характеристиками (начальными условиями) $z_1^0, z_2^0, \dots, z_k^0$.

Если рассматривать процесс функционирования системы как последовательную смену состояний, то состояния системы в момент времени $t_0 < t \leq T$ полностью определяются начальными условиями, входными воздействиями, внутренними параметрами и воздействиями внешней среды, которые имели место за промежутки времени $t - t_0$ с помощью векторного уравнения

$$\vec{z}(t) = \Phi(\vec{z}^0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t). \quad (1.7)$$

Уравнение (1.6), выраженное через свойства системы в конкретные моменты времени, имеет в этом случае вид

$$\vec{y}(t) = F(\vec{z}, t) = F[\Phi(\vec{z}^0, \vec{x}, \vec{v}, \vec{h}, t)]. \quad (1.8)$$

Таким образом, под математической моделью системы понимают зависимость выходных характеристик системы от входных воздействий на систему, воздействий внешней среды, внутренних параметров системы, начального состояния системы в момент времени t_0 и времени моделирования t .

Разработка моделирующего алгоритма

Для моделирования систем и процессов на ЭВМ необходимо на основании полученной ранее математической модели разработать соответствующий моделирующий алгоритм.

Алгоритм - одно из основных понятий логики, математики и кибернетики, означающее точное предписание, правило, в соответствии с которым должна выполняться вся последовательность элементарных операций, переводящих исходные данные в искомый результат.

Каждый алгоритм должен обладать следующими свойствами: определенность, т. е. точность, общепонятность, не оставляющая места для произвольного толкования; массовость, т. е. возможность применения алгоритма для решения ряда задач одного класса, но с разными исходными данными; результативность, т. е. возможность решения задачи за конечное число операций (шагов).

Существенными чертами алгоритма являются структурность и дискретность. Это значит, что алгоритм как процесс распадается на некоторое конечное множество выполняемых отдельно операций, связанных между собой определенным образом.

Удобной формой представления логической структуры моделей процессов функционирования систем является схема моделирующего алгоритма. Логическая схема указывает упорядоченную во времени последовательность логических операций, связанных с решением задачи моделирования.

Логическая схема моделирующего алгоритма преобразовывается в дальнейшем в схему программы, которая отображает порядок программной реализации моделирующего алгоритма на базе 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-технических средств моделирования.

Логическая схема алгоритма и схема программы могут быть выполнены как в укрупненной, так и в детальной форме. Для начертания этих схем используется набор символов, определяемых ГОСТ 19.701 — 90 (ИСО 5807 — 85) «Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения». Некоторые наиболее употребительные в практике моделирования на ЭВМ символы показаны на рис. 1.11, где изображены основные, специфические и специальные символы процесса.

1) Основной символ:

а) процесс - символ отображает функцию обработки данных любого вида (выполнение определенной операции или группы операций, приводящее к изменению значения, формы или размещения, или к определению, по которому из нескольких направлений потока следует двигаться).

2) Специфические символы процесса:

б) решение - символ отображает решение или функцию переключательного типа, имеющую один вход и ряд альтернативных выходов, один и только один из которых может быть активизирован после вычисления условий, определенных внутри

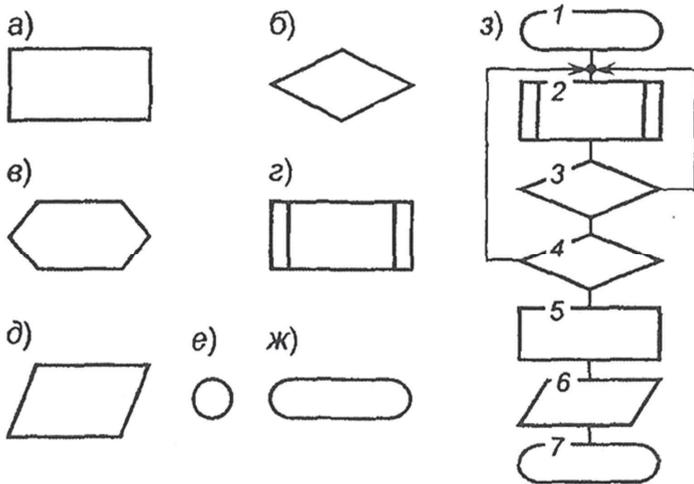


Рис. 1.11. Символы и схема моделирующего алгоритма

этого символа (соответствующие результаты вычисления могут быть записаны по соседству с линиями, отображающими эти пути;

в) подготовка — символ отображает модификацию команды или группы команд с целью воздействия на некоторую последующую функцию (установка переключателя, модификация индексного регистра или инициализация программы);

г) predetermined процесс - символ отображает predetermined процесс, состоящий из одной или нескольких операций или шагов программы, которые определены в другом месте (в подпрограмме, модуле);

д) ручная операция - символ отображает любой процесс, выполняемый человеком.

3) Специальные символы:

е) соединитель — символ отображает выход в часть схемы и вход из другой части этой схему и используется для обрыва линии и продолжения ее в другом месте (соответствующие символы-соединители должны содержать одно и то же уникальное обозначение);

ж) терминатор - символ отображает выход во внешнюю среду и вход из внешней среды (начало или конец схемы алгоритма, внешнее использование или пункт назначения данных).

Пример изображения схемы моделирующего алгоритма показан на рис 1.11, 3.

Проверка адекватности моделей

Так как модель представляет собой приближенное описание процесса функционирования реальной системы, то до тех пор, пока не доказана достоверность модели, нельзя утверждать, что с ее помощью будут получены результаты, совпадающие с теми, которые могли бы быть получены при проведении натурального эксперимента с реальной системой. Поэтому проверку адекватности модели можно считать наиболее важной проблемой при моделировании систем. От решения этой проблемы зависит степень доверия к результатам, полученным методом моделирования.

Проверка модели на рассматриваемом подэтапе должна дать ответ на вопрос: насколько логическая схема модели системы и используемые математические соотношения отражают замысел модели. При этом проверяются: возможность решения поставленной задачи; точность отражения замысла в логической схеме; полнота логической схемы модели; правильность используемых математических соотношений.

Только после того, как разработчик убеждается путем соответствующей проверки в правильности этих положений, можно считать, что имеется логическая схема модели системы, пригодная для дальнейшей работы по реализации модели на ЭВМ.

Машинная реализация моделей

При обеспечении машинной реализации модели необходимо решить вопрос о том, какую вычислительную машину и какое программное обеспечение целесообразно использовать для реализации модели системы.

Вопрос о выборе ЭВМ сводится к обеспечению следующих требований: наличие необходимых программных и технических средств; наличие необходимого объема оперативной и внешней памяти; соответствующее быстродействие процессора ЭВМ.

Построение схемы программы представляет собой одну из основных задач на этапе машинной реализации модели. При этом особое внимание должно быть уделено особенностям выбранного для реализации модели языка: алгоритмического языка общего назначения или языка моделирования. При достаточно подробной схеме программы, которая отражает все операции логической схемы модели, можно приступить к программированию модели.

Если имеется адекватная схема программы, то программирование представляет собой работу только для программиста без участия и помощи со стороны разработчика модели. При использовании пакетов прикладных программ моделирования проводится непосредственная генерация рабочих программ для моделирования конкретного объекта, т. е. программирование модели реализуется в автоматизированном режиме.

Интерпретация результатов моделирования систем и процессов

Смысловое содержание термина «интерпретация» — истолкование, разъяснение, трактовка.

На этапе получения и интерпретации результатов моделирования ЭВМ используется для проведения рабочих расчетов по составленной и отлаженной программе. Результаты этих расчетов позволяют проанализировать и сформулировать выводы о характеристиках процесса функционирования моделируемой системы.

Рассмотрим особенности получения результатов моделирования. При реализации моделирующих алгоритмов на ЭВМ вырабатывается информация о состояниях процесса функционирования исследуемых систем $z(t) \in Z$. Эта информация является исходным материалом для определения приближенных оценок искомых характеристик, получаемых в результате машинного эксперимента, т.е. критериев оценки.

Критерием оценки будем называть любой количественный показатель, по которому можно судить о результатах моделирования системы. Критериями оценки могут служить показатели, получаемые на основе процессов, действительно протекающих в системе, или получаемых на основе специально сформированных функций этих процессов.

В ходе машинного эксперимента изучается поведение исследуемой модели процесса функционирования системы на заданном интервале времени $[0, T]$. Поэтому критерий оценки является в общем случае векторной случайной функцией, заданной на этом же интервале:

$$\vec{q}(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)).$$

Часто используют более простые критерии оценки, например, вероятность определенного состояния системы в заданный момент времени $t^* \in [0, T]$, отсутствие отказов и сбоев в системе на интервале $[0, T]$ и т.д. При интерпретации результатов моделирования вычисляются различные статистические характеристики закона распределения критерия оценки.

В общем случае критерием интерпретации результатов моделирования является нестационарный случайный n -мерный процесс $\vec{q}(t)$, $0 < t < T$. Полагаем для определенности, что состояние моделируемой системы проверяется каждые Δt временных единиц, т.е. используется «принцип Δt ». При этом вычисляют значения $\vec{q}(j\Delta t)$, $j = \overline{0, k}$, критерия $\vec{q}(t)$. Таким образом, о свойствах случайного процесса $\vec{q}(t)$ судят по свойствам случайной последовательности $\vec{q}(j\Delta t)$, $j = \overline{0, k}$, или, иначе говоря, по свойствам m -мерного вектора вида

$$\vec{q} = (\vec{q}(0), \vec{q}(\Delta t), \dots, \vec{q}[(k-1)\Delta t], \vec{q}(T)), m = n(k+1), T = k\Delta t.$$

Процесс функционирования системы на интервале $[0, T]$ моделируется N -кратно с получением независимых реализаций $\vec{q}_i, i = \overline{1, N}$ вектора \vec{q} . Работа модели на интервале $[0, T]$ называется прогнозом модели.

Если свойства моделируемой системы определяются значением критерия $\vec{q}(t)$ в некоторый заданный момент времени, например, в конце периода функционирования модели $t=k\Delta t=T$, то обработка сводится к оценке распределения n -мерного вектора $\vec{q}(t)$ по независимым реализациям $\vec{q}_i, i = \overline{1, N}$, полученным в результате N прогонов модели.

Если в моделируемой системе по истечении некоторого времени с начала работы $t_0=k_0\Delta t$ установится стационарный режим, то о нем можно судить по одной, достаточно длинной реализации $\vec{q}_1(t)$ критерия $\vec{q}(t)$ стационарного и эргодического на интервале $[t_0, T]$. Для рассмотренной схемы это означает, что исключается средний цикл ($n=1$) и добавляется оператор, позволяющий начать обработку значений $q_1(j\Delta t)$ при $j \geq k_0$.

Получив и проанализировав результаты моделирования, их нужно интерпретировать по отношению к моделируемой системе. Основное содержание этого этапа - переход от информации, полученной в результате машинного эксперимента с моделью, к информации применительно к объекту моделирования, на основании которой и будут делаться выводы о характеристиках процесса функционирования исследуемой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головин, В.Я. Моделирование систем и процессов: учебник для слушателей и курсантов инженерных вузов ВВС. / Головин В.Я., Шаламов А.С., Кирсанов А.П., Миронычев В.Н., Митрофанов Ю.В., Гриценко А.Е., Ямпольский С.М. / Под ред. Головина В.Я. – М.: Изд. ВУНЦ ВВС «ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2010. – 432 с.
2. Петренко, С. В. Процедурная модель принятия решения при управлении динамическими объектами в структуре эргатической информационной системы / С. В. Петренко // Наука и бизнес: пути развития. – 2012. – № 12(18). – С. 033-037. – EDN QGMVBD.
3. Петренко, С. В. Модель информационного взаимодействия эргатических элементов в эргатической информационной системе / С. В. Петренко // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – № 1(19). – С. 035-039. – EDN QGMWIF.
4. Петренко, С. В. Методы и модели организации информационной поддержки для эффективного формирования бесконфликтного потока воздушных судов: дис. доктор технических наук: 05.25.05 - Информационные системы и процессы, правовые аспекты информатики. Тамбов. 2013. 393 с.
5. Воробьев, В. В. Алгоритм предтактического планирования использования воздушного пространства / В. В. Воробьев, А. С. Харламов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 218(8). – С. 135-141. – EDN UHPYQH.
6. Борсоев В.А., Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е., Никулин А.О., Тин Пхон Чжо. Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы. / Под ред. Е.Е. Нечаева. – М.: Радиотехника, 2018.
7. Спрысков, В. Б. Оценка риска катастроф в воздушном пространстве зоны ответственности диспетчера управления воздушным движением при обслуживании воздушных судов по информации системы наблюдения / В. Б. Спрысков, К. Л. Исаакян, С. В. Кузнецов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2015. – № 10(321). – С. 78-99. – EDN VLQZBP.
8. Дегтярев, О. В. Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения / О. В. Дегтярев, И. Ф. Зубкова // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 62. – EDN OZCKCB.
9. Плясовских, А. П. Разработка методов и средств процедурного контроля воздушного движения : специальность 05.22.13 "Навигация и управление воздушным движением" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Плясовских Александр Петрович. – Санкт-Петербург, 2005. – 335 с. – EDN NNZKAD.
10. Приказ Росавиации от 25.12.2019 N 1414-П "Об утверждении Положения об оперативных органах Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации и типовых структурных схем оперативных органов Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте России 31.01.2020 N 57373).