

Ю. Г. Древис, В. В. Золотарёв

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ

2-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по естественнонаучным, математическим направлениям*

**Книга доступна в электронной библиотеке biblio-online.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 51-7(075.8)
ББК 32.966я73
Д73

Авторы:

Древс Юрий Георгиевич — доктор технических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»;

Золотарёв Всеволод Васильевич — кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Древс, Ю. Г.

Д73 Имитационное моделирование : учебное пособие вузов / Ю. Г. Древс, В. В. Золотарёв. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 142 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-11385-3

Изложены основные принципы имитационного моделирования сложных технических систем. Основное внимание уделено рассмотрению методики формализации процесса их функционирования, структуры имитационных алгоритмов и особенностей их программирования. Приводятся рекомендации по формированию случайных воздействий и основные сведения по обработке статистических результатов имитационных экспериментов.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов бакалавриата, обучающихся по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления»; может быть использовано студентами специальности «Прикладная математика», а также аспирантами, работа которых связана с проектированием систем, требующих для анализа и выбора рациональных решений применения методов имитационного моделирования.

УДК 51-7(075.8)
ББК 32.966я73

Розыскиваем правообладателей и наследников Золотарёва В. В.: <https://www.biblio-online.ru/inform@> Пожалуйста, обратитесь в Отдел договорной работы: +7 (495) 744-00-12; e-mail: expert@urait.ru



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Древс Ю. Г., Золотарёв В. В., 2002
© Древс Ю. Г., Золотарёв В. В., 2019,
с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

ISBN 978-5-534-11385-3

Оглавление

Предисловие	5
Введение.....	7
Глава 1. Основные этапы и принципы построения моделей	12
1.1. Основные этапы формализации при построении математической модели	12
1.2. Структурная схема имитационного алгоритма	15
1.3. Декомпозиция системы и принципы перехода от содержательного описания к математической модели	18
1.4. Иерархическая структура системы моделей	25
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	30
Глава 2. Принципы построения моделирующих алгоритмов.....	32
2.1. Основные математические схемы алгоритма	32
2.1.1. Дискретные автоматы	33
2.1.2. Сети Петри	34
2.1.3. Марковские случайные процессы	47
2.1.4. Системы массового обслуживания	50
2.1.5. Агрегат как универсальная математическая схема для описания систем.....	54
2.2. Структура имитационного алгоритма моделирования агрегата.....	57
2.3. Функции и структура монитора моделирования	64
2.4. Проверка достоверности модели при разработке логической блок-схемы	73
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	75
Глава 3. Создание имитационных моделей	76
3.1. Особенности систем моделирования	77
3.2. Некоторые пути сокращения требуемых объемов памяти и времени при реализации имитационных алгоритмов.....	81
3.3. Датчики случайных событий, величин и состояний.....	85

3.4. Проверка и отладка программ имитационных моделей	94
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	101
Глава 4. Обработка результатов моделирования	102
4.1. Точечное оценивание параметров распределения	102
4.2. Интервальное оценивание параметров распределения	110
4.3. Нахождение функциональных зависимостей	114
4.4. Проверка статистических гипотез.....	115
4.4.1. Общие понятия о статистических гипотезах и их проверке	115
4.4.2. Определение функций распределения по опытным данным (проверка гипотезы о законе распределения)	117
4.4.3. Проверка гипотезы однородности	119
4.4.4. Проверка гипотезы о равенстве центров распределения двух нормальных генеральных совокупностей	121
4.5. Регрессионный анализ	122
4.6. Дисперсионный анализ.....	129
4.7. Методы экспериментальной оптимизации	133
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	135
Заключение.....	136
Список литературы	138
Новые издания по дисциплине «Имитационное моделирование» и смежным дисциплинам	140

Предисловие

К настоящему времени издано множество книг по имитационному моделированию. Почти все они, за небольшим исключением, содержат результаты теоретических исследований или руководства по применению конкретных систем моделирования. Теория имитационного моделирования, несомненно, представляет интерес для подготовленного читателя, однако ее детальное изложение с соответствующими практическими примерами за ограниченное количество часов, отведенных учебными планами, невозможно. К тому же для будущего инженера теоретические аспекты не очень важны, ему уместнее получить общие представления о методе и примеры решения практических задач.

Эта концепция реализуется в данном учебном пособии. Предполагается, что в результате обучения с его использованием студент будет:

знать

— содержание отдельных этапов построения имитационных моделей;

— принципы построения имитационного алгоритма в целом и структуру его отдельных блоков в частности;

— вопросы оценки и обеспечения достоверности моделей и правильности моделирующих программ;

— основные методы формирования случайностей и обработки результатов моделирования (в том числе необходимые для этого методы теории вероятностей и математической статистики);

уметь

— создавать и применять имитационные модели объектов и процессов;

— выбирать методы исследования имитационных моделей;

— разрабатывать алгоритмы реализаций имитационных моделей;

— применять методики построения адекватных моделей и статистические методы оценки точности результатов их работы;

владеть

— навыками разработки имитационных моделей для систем различного функционального назначения и сложности;

— навыками планирования модельного эксперимента и его реализации с учетом целей и требований, предъявляемых результатам моделирования.

Подчеркнем, что в пособии описания лишь основные принципы и наиболее простые методы, применяемые при проектировании технических систем. Более сложные решения можно найти в цитируемой литературе.

Авторы считают своим долгом выразить признательность нескольким поколениям студентов, итоги обучения которых помогли «отшлифовать» содержание этого пособия.

Введение

Свойства любой системы проявляются в процессе ее функционирования, поэтому для определения этих свойств надо подать на входы некоторые возмущающие воздействия и проанализировать выходы системы. Однако почти всегда такие эксперименты с реальной системой экономически невыгодны, а с проектируемой системой — невозможны, поэтому их проводят не с реальной системой (*оригиналом*), а с моделью системы.

Под *моделью* системы подразумевается некоторая другая система, сохраняющая существенные черты оригинала и допускающая исследование физическими или математическими методами. Если бы модель полностью отражала все факторы, имеющие место в системе-оригинале, ее сложность была бы сравнимой со сложностью оригинала и, следовательно, трудоемкость ее разработки была бы не меньше, чем создание системы-оригинала. Поэтому главное при создании модели — выделить частные, но наиболее важные для конкретного исследования факторы в реальной системе. Эти факторы должны быть отражены в модели с большей точностью и детализацией. Остальные (несущественные) факторы могут быть отражены с меньшей точностью или вовсе отсутствовать.

Отсюда следует, что для правильного выделения в реальной системе главных факторов (которые должны быть отображены в модели) необходимо четко определять цели моделирования и методику использования его результатов. Это, в свою очередь, приводит к тому, что для исследования сложной многофункциональной системы часто требуется создавать несколько моделей. Тогда приходится анализировать взаимосвязи получаемых с их помощью результатов.

Все модели можно разделить на физические и математические. *Физическая модель* представляет собой физический объект — выполненный в некотором масштабе аналог реальной системы, физическая природа которого по факторам, существен-

ным для данного исследования, должна быть одинакова с оригиналом. Это обеспечивает возможность «переноса» результатов исследования модели на реальную систему. Заметим, что этот перенос требует учета масштаба, в котором соотносятся элементы оригинала и модели, причем это касается не только геометрических размеров, но и хода времени. Он может быть разным в модели и в моделируемой системе. Возможность «сжимать» временной масштаб при физическом моделировании позволяет ускорять исследование физических процессов.

Математическая модель является абстрактным, формально описанным объектом, который можно исследовать математическими методами. Среди этих методов выделяют:

— аналитическое исследование, в результате которого получают в общем виде явные зависимости для искомых величин;

— численные исследования, когда, не умея решать уравнения в общем виде, получают численные результаты при конкретных начальных данных с использованием методов вычислительной математики и с применением вычислительной техники;

— исследование на аналогах, при котором оригинал, представленный математической моделью, исследуется с помощью системы другой физической природы, но имеющей то же математическое описание;

— исследование алгоритма, имитирующего процесс функционирования системы, когда математическая модель имеет вид алгоритмического описания работы моделируемой системы. Математические модели такого вида часто называют *имитационными*, а исследование систем с помощью таких моделей — *имитационным моделированием*. Этот тип моделирования близок к натурному эксперименту, так как моделирующий алгоритм воспроизводит процесс-оригинал с сохранением логической структуры его элементарных явлений и их последовательности во времени.

Обратим внимание на различие в алгоритмах численного и имитационного методов исследования: если в первом случае алгоритм реализует тот или иной метод вычислительной математики, то во втором алгоритм является собственно моделью системы, отражая временные и причинно-следственные связи между ее элементами.

Физические модели элементов систем имеют ограниченное применение, в основном при исследовании объектов управле-

ния, физическая природа и сложность которых допускают подобное исследование. Чаще используются физические модели внешней среды или условий эксплуатации системы; их называют *стендами*. Примеры стендов: центрифуга, термокамера, вибростенд, реактор и т. п.

Полное аналитическое исследование математических моделей возможно для сравнительно простых систем. Математическая модель сложной системы чаще всего не поддается аналитическому исследованию, так как ее упрощение с целью применения аналитического моделирования приводит к «огрублению» модели, к ухудшению ее адекватности моделируемой системе.

Численные методы применимы к более широкому классу математических моделей. Однако полученные решения носят частный характер, и не всегда есть возможность извлечь из них выводы общего характера.

Аналоговое моделирование используется при анализе отдельных элементов АСУ технологическими процессами. Оно не применяется, если модель представлена совокупностью логических отношений, а также если требуется высокая точность результатов или процесс функционирования имеет вероятностный характер.

Имитационное моделирование — наиболее широко используемый метод исследования систем управления. Он особенно эффективен при анализе вероятностных систем, т. е. систем, состояния которых описываются случайными функциями. Тогда имитирующий алгоритм повторяется многократно при разных значениях случайных величин, входящих в описание процесса функционирования объекта, с последующей статистической обработкой полученных данных. Именно поэтому исследование сложных систем с помощью имитационных моделей принято называть *статистическим моделированием*, хотя, разумеется, имитационные модели применимы и там, где системы детерминированные и нет никаких статистических задач.

При построении систем управления решаются две взаимосвязанные задачи: выбор оптимального управления и выбор оптимальной системы, реализующей это управление.

Для выбора оптимального управления необходимо иметь модель объекта управления. Если модель допускает аналитическое исследование, то для отыскания составляющих вектора

управления можно использовать аналитические методы поиска экстремума функции. При отсутствии аналитически заданной зависимости вектор управления определяется экспериментированием с моделью. То же можно сказать и о моделировании систем управления в целом с целью выбора оптимальной системы, реализующей выбранный алгоритм.

Обычно исследованию при моделировании систем управления подлежат следующие важнейшие факторы:

- быстродействие основных технических средств и его влияние на выполнение требований к моментам выдачи управляющих воздействий и к надежности управляющей системы;

- параметры, определяющие точность работы технических средств и, следовательно, влияющие на качество управления;

- степень централизации управления с точки зрения живучести системы и затрат на ее создание;

- структура комплекса технических средств и ее связь с надежностными и стоимостными характеристиками системы;

- структура вычислительных сетей, определение требуемых количественных и технических характеристик сетевых объектов;

- рациональность предлагаемых вариантов размещения информационного и программного обеспечения по сетевым объектам (файл-серверам, клиент-серверам, серверам приложений);

- правильность работы программных реализаций алгоритмов (отладка, оценка сходимости, точности, временных затрат);

- оценка реактивности системы, скорости ее работы и их соответствие требованиям динамики управляемого объекта;

- эффективность использования ресурсов системы.

Моделирование применяется на различных этапах разработки, сопровождения и модернизации объектов. Так как цели этих этапов различны, то различны и цели создаваемых моделей и требования, предъявляемые к ним.

Отметим основные достоинства моделирования как метода исследования сложных систем:

- 1) ответы на многие вопросы, возникающие на этапах замысла и предварительного проектирования будущей системы, можно получить без применения дорогостоящего метода проб и ошибок;

2) моделирование позволяет исследовать и имитировать особенности функционирования системы в любых возможных условиях. При этом параметры системы и окружающих условий можно варьировать для получения любой обстановки, в том числе и нереализуемой в натуральных экспериментах. Благодаря этому уменьшается потребность в сложном лабораторном оборудовании и в эксплуатационных испытаниях систем;

3) применение вычислительной техники сокращает продолжительность испытаний, занимающих в реальных условиях дни или месяцы, до долей минут и секунд;

4) моделирование позволяет при отсутствии реального объекта на его модели — на эмуляторе, имитирующем систему команд, или на «виртуальном» объекте («точной» имитационной модели объекта) — производить отладку и отработку программного обеспечения (ПО) объекта с получением численных результатов работы отлаживаемых программ.

В данном пособии основное внимание уделено применению имитационного моделирования для прогнозирования технических показателей функционирования объекта: быстродействия, загрузки устройств, задержек при обработке, надежности и других характеристик. Проблемы использования моделей для разработки и отладки ПО с получением численных результатов по функционированию разрабатываемых программ в данном пособии не рассматриваются.

Итак, преимущество моделирования перед натурным экспериментом заключается в следующем: если модель достаточно достоверно представляет данную систему с точки зрения решаемых ею задач и получаемых результатов, то моделирование является сравнительно недорогим, эффективным и оперативным методом анализа системы и оценки ее функционирования.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ

Создание модели сложной системы — длительный и трудоемкий процесс. Его эффективность и качество конечного результата во многом определяются тем, насколько методически правильно выполнены построение модели и ее исследование.

Теория моделирования и практика его применения позволяют сформулировать основные принципы, которыми должен руководствоваться создатель модели, и рекомендовать рациональную последовательность ее построения.

1.1. Основные этапы формализации при построении математической модели

Под термином «формализация» понимают процесс перехода от системы к модели, т. е. от существующего или проектируемого материального объекта к объекту абстрактному. Корректность формализации сказывается на степени достоверности модели и, следовательно, на качестве исследования. Трудности формализации заключаются в выборе наиболее рациональных и эффективных математических схем и в процессе перехода от инженерного языка описания объекта к формальному языку описания модели.

Практически сложились три этапа формализации [4]:

1) составление содержательного описания, в которое входят основные сведения об изучаемом объекте или процессе, постановка задачи исследования, определение цели моделирования и перечень исходных данных;

2) составление формализованной схемы системы. Это промежуточный этап согласования двух языков описания системы: инженерного и математического. Он необходим в сложных

случаях, когда не представляется возможным перейти к получению математической модели непосредственно по содержанию описанию;

3) разработка математической модели, т. е. запись в аналитической форме всех соотношений формализованной схемы с использованием определенных математических схем.

Содержательное описание в словесной форме концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках исследуемого объекта или процесса. Его автор — инженер, представитель коллектива, разрабатывающего объект или процесс. Содержательное описание составляется по результатам наблюдения за системой (если она существует) или по опыту эксплуатации похожих систем (если система проектируется). Помимо сведений, непосредственно характеризующих процесс, в описание включается постановка задачи, определяющей цели моделирования. Она может не иметь строгой математической формулировки, однако должна содержать четкое изложение идеи исследования, перечень зависимостей, подлежащих оценке, и факторы, которые необходимо учитывать при построении модели.

Содержательное описание часто называют *концептуальной моделью* системы.

Формируя содержательное описание, следует помнить, что процесс функционирования системы понимается как последовательная смена ее состояний в некотором интервале времени $[t_0, t_1]$. Состояния системы в каждый момент $t_0 \leq t \leq t_1$ характеризуются набором величин z_1, z_2, \dots, z_n . Величины $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$, определяющие процесс функционирования системы, называют *характеристиками состояний*. Моменту времени $t_0 = 0$ соответствует начальное состояние с характеристиками (начальными условиями) $z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0n}$. На вход системы могут поступать входные сигналы x_i ($i = 1, 2, \dots$). Они влияют на изменение состояний системы. Кроме того, функции $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ могут зависеть от некоторого числа постоянных величин — *параметров*. Система формирует выходные сигналы y_j ($j = 1, 2, \dots$), полностью определяемые ее состояниями. Так, для электрического колебательного контура характеристиками состояний служат заряд конденсатора и ток в цепи, а параметрами — величины емкости и индуктивности.

Следовательно, кроме постановки задачи в содержательное описание должны быть включены исходные данные, характе-

ризирующие параметры и начальные условия. Описание представляется в виде схем, текстов, формул и таблиц.

На этапе содержательного описания следует [4, 19]:

1) убедиться, что задача существует и ее целесообразно решать; сформулировать и оценить сложность задачи и возможность ее разбиения на подзадачи;

2) выбрать приоритеты решения подзадач и возможные методы их решения;

3) обосновать требования к ресурсам ЭВМ, на которой должно выполняться моделирование, и оценить трудоемкость моделирования;

4) провести анализ задачи, для этого:

— выбрать и определить параметры и переменные,

— предложить возможные критерии интерпретации результатов моделирования,

— предложить методы проверки модели;

5) приступить к сбору информации.

При отсутствии конкретных знаний о некоторых составляющих задачи приходится ставить эксперименты, выдвигать гипотезы и предположения.

Формализованная схема разрабатывается совместно инженерами и математиками в тех случаях, когда невозможен прямой переход к математической модели (в основном из-за сложности исследуемой системы). На этом этапе необходимо уточнить характеристики объекта или процесса, установить систему параметров, строго определить все зависимости между характеристиками и параметрами с учетом тех факторов, которые принимаются во внимание при формализации, дать точную математическую формулировку задачи исследования с указанием окончательного перечня искомых величин и оцениваемых зависимостей. К формализованной схеме прилагается систематизированная и уточненная совокупность всех исходных данных, известных параметров процесса и начальных условий. Эти величины могут оставаться в виде таблиц или графиков, но должны быть полностью выяснены все вопросы, связанные с интерполяцией и экстраполяцией экспериментального материала.

Для перехода от содержательного описания к формализованной схеме необходимо:

1) исключить сведения, не существенные с точки зрения цели исследования системы;

2) установить такой критерий интерпретации результатов моделирования, который:

— отражает интересы «потребителя», использующего моделируемую систему,

— достаточно полно характеризует исследуемую систему,

— дает возможность выбора рационального варианта построения системы, т. е. чувствителен к изменению определяющих параметров,

— обозрим и удобен для вычислений;

3) оценить степень пригодности собранных экспериментальных данных;

4) определить необходимость детализации фрагментов концептуальной модели с целью выбора уровня их представления, позволяющего описать связи между ними математическими соотношениями или алгоритмами.

Следует еще раз проверить и учесть ресурсы, доступные для моделирования, а также фактор времени, чтобы результаты моделирования можно было своевременно использовать при принятии решений.

Математическая модель представляет собой систему соотношений, связывающих характеристики процесса функционирования объекта с его параметрами и начальными условиями. Для преобразования формализованной схемы в математическую модель необходимо использовать известные математические схемы (дифференциальные уравнения, агрегаты, системы массового обслуживания, графы, сети Петри и т. д.), записать в аналитической форме, соответствующей выбранной математической схеме, все соотношения, представить аппроксимирующими функциями и интерполяционными полиномами численные данные. Например, вместо таблиц частот для значений случайных величин используются аналитические выражения функций плотности типичных законов распределения, которые с достаточной точностью представляются этими частотами.

1.2. Структурная схема имитационного алгоритма

Работа системы на интервале $[t_0, t_m]$ моделируется N -кратно с использованием независимых реализаций случайных факторов, существенных для ее работы. При этом получают N независимых реализаций Q_i ($i = 1, 2, \dots, N$) критерия интерпрета-