

В.П. Строгалева, И.О. Толкачева

# Имитационное моделирование

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки специалистов  
«Оружие и системы вооружения»*

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2008

УДК 681.3.06(075.8)

ББК 32.973.2

С86

Рецензенты:

канд. техн. наук *А.В. Жигалов* (зам. начальника 3 ЦНИИ МО РФ);

канд. техн. наук, доц. кафедры СМ-7 МГТУ им. Н.Э. Баумана

*А.И. Максимов*

**Строгалев В.П., Толкачева И.О.**

С86 Имитационное моделирование: Учеб. пособие. – М.:  
Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 280 с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3021-5

Изложены основные вопросы, связанные с построением моделей реальных систем, проведением компьютерных экспериментов на моделях и управлением этими экспериментами. Подробно рассмотрены принципы имитационного моделирования и представлен соответствующий математический аппарат с большим количеством примеров для иллюстрации его использования.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, специализирующихся в области разработки сложных технических систем, а также для специалистов, занимающихся прикладными исследованиями, и руководителей различного рода предприятий.

УДК 681.3.06(075.8)

ББК 32.973.2

ISBN 978-5-7038-3021-5

© Строгалев В.П., Толкачева И.О., 2008

© Оформление. Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |            |
|--|------------|
| Предисловие . . . . .  | 5          |
| <b>1. Основы имитационного моделирования . . . . .</b>                                 | <b>7</b>   |
| 1.1. Суть имитационного моделирования . . . . .  | 7          |
| 1.2. Система, модели и имитационное моделирование . . . . .                            | 10         |
| 1.3. Системный подход к формированию имитационной модели . . . . .                     | 26         |
| 1.4. Обоснование, формулирование и конструирование имитационной модели . . . . .       | 32         |
| <b>2. Математический аппарат имитационного моделирования . . . . .</b>                 | <b>44</b>  |
| 2.1. Основные положения теории вероятностей . . . . .                                  | 44         |
| 2.2. Схемы образования случайных величин . . . . .                                     | 56         |
| 2.3. Выборочный метод Монте-Карло . . . . .  | 75         |
| 2.4. Основные понятия математической статистики . . . . .                              | 82         |
| 2.5. Теория оценок . . . . .   | 85         |
| 2.6. Проверка статистических гипотез . . . . .   | 92         |
| 2.7. Методы идентификации и преобразования статистической информации . . . . .         | 108        |
| 2.8. Методы экспертных оценок . . . . .  | 120        |
| <b>3. Программное обеспечение имитационного моделирования . . . . .</b>                | <b>125</b> |
| 3.1. Особенности выбора программного обеспечения имитационного моделирования . . . . . | 126        |
| 3.2. Классификация программных средств имитационного моделирования . . . . .           | 128        |
| 3.3. Возможности при использовании программ имитационного моделирования . . . . .      | 135        |
| 3.4. Генераторы случайных чисел . . . . .  | 142        |
| 3.5. Генерирование случайных величин . . . . .   | 149        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>4. Планирование экспериментов и методы оптимизации . . . . .</b>                                 | 157 |
| 4.1. Основные понятия и определения . . . . .   | 158 |
| 4.2. Однофакторный дисперсионный анализ . . . . .   | 163 |
| 4.3. Факторный анализ . . . . .   | 168 |
| 4.4. Неполный факторный анализ . . . . .  | 173 |
| 4.5. Нахождение оптимальных условий . . . . .   | 175 |
| <b>5. Тактическое планирование . . . . .</b>  | 179 |
| 5.1. Нестационарные режимы работы имитационной модели . . . . .                                     | 180 |
| 5.2. Определение размера выборки . . . . .  | 184 |
| 5.3. Методы понижения дисперсии . . . . .   | 191 |
| <b>6. Анализ выходных данных и сравнение альтернативных вариантов имитационной модели . . . . .</b> | 197 |
| 6.1. Метод проверок . . . . .   | 198 |
| 6.2. Метод доверительных интервалов . . . . .   | 205 |
| 6.3. Проблема многомерных откликов . . . . .  | 207 |
| 6.4. Анализ чувствительности имитационной модели . . . . .  | 209 |
| <b>7. Организационные аспекты имитационного моделирования . . . . .</b>                             | 212 |
| 7.1. Имитационное моделирование как инструмент исследования операций . . . . .                      | 213 |
| 7.2. Общие требования к разработке имитационной модели . . . . .                                    | 220 |
| 7.3. Использование результатов имитационного моделирования . . . . .                                | 227 |
| 7.4. Перспективы имитационного моделирования . . . . .  | 230 |
| <b>8. Примеры разработки имитационных моделей . . . . .</b>   | 234 |
| 8.1. Имитационная модель бомбардировки промышленного предприятия . . . . .                          | 234 |
| 8.2. Имитационная модель отражения атаки ракетной батареей ПВО . . . . .                            | 237 |
| 8.3. Имитационная модель дуэльной ситуации . . . . .  | 244 |
| 8.4. Оценка рассеивания артиллерийских снарядов . . . . .   | 249 |
| 8.5. Оценка эффективности стрельбы реактивных систем залпового огня . . . . .                       | 252 |
| 8.6. Моделирование азартных игр . . . . .   | 258 |
| 8.7. Модель определения потребностей города в количестве пожарных машин . . . . .                   | 262 |
| 8.8. Задачи для самостоятельного решения . . . . .  | 264 |
| Заключение . . . . .  | 270 |
| Приложения . . . . .  | 271 |
| Список литературы . . . . .   | 279 |

Когда я употребляю слово, – сказал Шалтай-болтай довольно презрительно, – то оно обозначает именно то, что я думаю, – ни больше, ни меньше.

Вопрос в том, – сказала Алиса, – можете ли Вы заставить слово выражать так много разных вещей.

Вопрос в том, – сказал Шалтай-болтай, – какая среди них главная – вот и все.

*Льюис Кэрролл*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Данное учебное пособие рекомендуется студентам при изучении курса «Имитационное моделирование» в рамках программ по инженерным дисциплинам, теории управления, теории вычислительных систем и административному руководству. Пособие окажет существенную помощь при курсовом и дипломном проектировании, поскольку разработка имитационной модели системы или процесса может составлять предмет не только специальной части, но и курсовых и дипломных проектов в целом. Предполагается, что читатель знает основы математической статистики и программирования на ЭВМ.

Имитационное моделирование – один из самых мощных инструментов анализа, которыми располагают специалисты, ответственные за разработку и функционирование сложных процессов и систем. Идея имитационного моделирования проста и в то же время интуитивно привлекательна. Каждый современный инженер и администратор должен уметь пользоваться этими методами моделирования. Поэтому настоящая книга предназначена для двух категорий читателей: для тех, кто разрабатывает имитационные модели, и для тех, кто использует результаты исследований, полученные с помощью этих моделей.

Авторы полагают, что аналогов этому учебному пособию не существует как по методичности изложения материала, так и по его полноте при сравнительно небольшом общем объеме. Особый интерес из имеющихся изданий, на наш взгляд, представляет лишь книга Р. Шеннона «Имитационное моделирование – искусство и наука». В предлагаемом пособии частично используется материал этой книги, сохранена последовательность изложения рассматриваемых проблем, возникающих при создании имитационной модели, при существенном углублении и расширении фактического материала.

Более того, авторы сочли возможным взять эпиграф к пособию, который использовал в своей книге Р. Шеннон, поскольку в нем, по нашему мнению, в наибольшей степени отражена суть понятия «имитационное моделирование». В других литературных источниках приведены либо весьма отрывочные и разрозненные сведения, либо сведения, перегруженные трудночитаемым материалом, носящим частный характер.

В главе 1 изложена общая теория и дан обзор методов имитационного моделирования. Глава 2 посвящена вопросам математического аппарата, используемого при разработке имитационных моделей. Наибольший интерес представляют принципы выбора и обоснования характерных распределений случайных величин. В главе 3 рассмотрены вопросы создания адекватного программного обеспечения, причем большое внимание уделено проблеме генерирования случайных чисел, поскольку от характеристик последовательности этих чисел зависят выходные характеристики имитационной модели в целом. Глава 4 посвящена вопросам планирования эксперимента, так как метод имитационного моделирования представляет собой численный эксперимент. В главе 5 рассмотрены вопросы тактического плана, позволяющие сократить время функционирования модели при существенном улучшении ее характеристик. Глава 6 посвящена оценке выходных характеристик имитационной модели в сравнении с характеристиками, получаемыми на реальных объектах. Здесь же исследуется важная проблема оценки адекватности модели объекту и правильность выводов, сделанных на основе экспериментов. В главе 7 рассмотрены проблемы руководства научными исследованиями и передачи их результатов пользователю. Наконец, в главе 8 приведены примеры разработок имитационных моделей, касающихся различных сфер человеческой деятельности. Необходимо отметить, что приобрести навык пользования техникой имитационного моделирования можно только на опыте.

Авторы выражают глубокую признательность руководителю НУК СМ В.В. Зеленцову и ректору МГТУ им. Н.Э. Баумана И.Б. Федорову за существенную помощь в опубликовании этой книги. Кроме того, авторы благодарят студентов факультета СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана З.Ю. Дякина, И.Н. Костюкова и А.А. Крючкова за участие в подготовке практических примеров и иллюстраций.

## 1. ОСНОВЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование (ИМ) – один из самых мощных инструментов анализа при разработке сложных систем и анализе процессов их функционирования. Суть имитационного моделирования проста и в то же время интуитивно привлекательна. Его использование дает возможность экспериментировать с существующими или предлагаемыми системами в тех случаях, когда сделать это на реальных объектах практически невозможно или нецелесообразно.

### 1.1. Суть имитационного моделирования

Имитационное моделирование как метод научного исследования предполагает использование компьютерных технологий для имитации различных процессов или операций – *моделирования*. Устройства или процесс в дальнейшем будут называться *системой*. Для научного исследования системы применяют определенные допущения, касающиеся ее функционирования. Эти допущения, как правило выражаемые в виде математических зависимостей или логических отношений, представляют собой *модель*, с помощью которой можно изучать поведение рассматриваемой системы. Если выражения, входящие в модель, достаточно просты для получения точной информации при решении тех или иных вопросов, то можно использовать аналитические методы. Однако большинство реальных систем являются очень сложными, и создать их аналитическую модель не представляется возможным. Такие модели следует изучать путем ИМ; при этом для получения численных результатов, с помощью которых проводят расчет характеристик исследуемой системы, применяют компьютер.

Моделирование, например, можно использовать при рассмотрении производственной компанией возможности строительства больших дополнительных помещений для одного из ее заводов,

## **2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Имитационное моделирование, как правило, используют при наличии стохастических процессов. В связи с этим в первую очередь коснемся вопросов, связанных со случайными явлениями. В случае применения ИМ для решения большого числа задач требуется использование теории вероятностей, математической статистики, исследования операций и т. д. Математический аппарат ИМ охватывает все необходимые сведения из специальных разделов математики, он изложен в последовательности, представляющейся авторам наиболее удобной.

### **2.1. Основные положения теории вероятностей**

Теория вероятностей является разделом математики, в котором изучаются математические модели случайных экспериментов, т. е. экспериментов, результаты которых заранее не известны. Предполагается, что эксперимент может быть неоднократно повторен, а его результаты (исходы) обладают статистической устойчивостью. Так, при бросании игральной кости (кубика) возможны шесть исходов: выпадение 1–6 очков на верхней грани бросаемой кости, причем частота появления любой цифры при достаточно большом числе бросаний приближается к  $1/6$ . Координаты точки падения снаряда можно установить только после того, как произведен выстрел; таких примеров можно привести множество.

Несмотря на то что результаты экспериментов предсказать невозможно, на практике отмечена закономерность, состоящая в том, что при проведении большого числа испытаний наблюдаемые частоты появления событий (под частотой случайного события понимают отношение числа его появлений к общему числу испытаний) стабилизируются, т. е. все меньше отличаются от некоторого чис-



### **3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

При ИМ используют вычислительные системы трех типов – универсальные ЭВМ, электронные аналоговые машины и гибридные ЭВМ. Преимущества каждой из них определяются спецификой основных свойств аналоговых и цифровых ЭВМ. Аналоговая вычислительная машина (АВМ) представляет переменные параметры в виде легкогенерируемых и управляемых физических величин, например электрического напряжения. С ее помощью получают решение, выполняя операции параллельно, в то время как цифровая ЭВМ производит операции последовательно (сериями). Это дает АВМ существенное преимущество в скорости вычислений, особенно при решении систем дифференциальных уравнений.

В то же время цифровая ЭВМ может обеспечивать большую точность и расширенный функциональный диапазон в результате возможности считать, подчиняться логическим правилам, работать с плавающей точкой и использовать длинные слова. Таким образом, одно из основных различий между АВМ и цифровыми ЭВМ заключается в способе обработки зависимых переменных. В АВМ для записи таких переменных (к независимым переменным это может и не относиться) используется непрерывная форма. В цифровых же ЭВМ все переменные (зависимые и независимые) представляются только в дискретном виде. Точность чисел (т. е. количество значимых цифр) в АВМ ограничена качеством компонентов ее электрических цепей, в то время как точность цифровых ЭВМ зависит от количества разрядов и ограничена лишь размером или объемом регистров памяти.

В целом с любой задачей, которую решает АВМ, может справиться и мощная цифровая ЭВМ. Но на АВМ решать многие задачи можно быстрее, легче и дешевле.

При создании гибридных вычислительных систем сделана попытка объединить преимущества, присущие аналоговым и цифро-

#### **4. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ**

Со времени опубликованной в 1935 г. книги Р. Фишера «Планирование экспериментов» было выпущено большое количество книг и статей по планированию экспериментов, нашедшему широкое применение в биологических, физических и системных исследованиях. Планирование экспериментов является структурной основой исследований. Его использование целесообразно, поскольку оно позволяет уменьшить число необходимых испытаний и тем самым повысить экономичность эксперимента.

План экспериментального имитационного моделирования на ЭВМ представляет собой метод получения путем проведения эксперимента необходимой информации, стоимость которой зависит от способа сбора и обработки данных. Эффективность использования ресурсов для проведения эксперимента существенным образом зависит от выбора плана эксперимента, так как

- он в значительной степени определяет порядок статистического анализа результатов;
- успех решения поставленных вопросов существенно зависит от правильности плана эксперимента.

Для экспериментального моделирования на ЭВМ требуются не только затраты труда и времени экспериментатора, но и затраты машинного времени. Чем больше усилий вложено в построение плана эксперимента, тем меньше их остается на остальные задачи исследования, и поэтому необходимо иметь план, позволяющий получать в результате каждого эксперимента максимальное количество информации. Основная цель экспериментального моделирования состоит в глубоком изучении поведения моделируемой системы при наименьших затратах. Для этого необходимо планировать и проектировать не только модель, но и процесс ее использования, т. е. проведение с помощью нее экспериментов. В связи с этим следует рассмотреть вопросы такого стратегического плани-

## 5. ТАКТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ

При разработке имитационных моделей кроме стратегических проблем планирования эксперимента возникают другие проблемы, которые можно назвать тактическими. Так как флуктуации переменных характерны для всех стохастических имитационных моделей, для достижения заданной точности результатов необходимо повторять эксперимент, каждый раз изменяя значения входящих в модель случайных факторов. Поскольку время одного прогона сложного модельного эксперимента на ЭВМ может быть достаточно большим, а выделенное на эксперимент время обычно ограничено, необходимо стремиться к получению максимальной информации с помощью небольшого числа прогонов. Кроме того, эксперимент должен проводиться таким образом, чтобы не только получить результаты, но и оценить их точность и соответственно степень доверия к тем выводам, которые будут сделаны на основе этих результатов.

Точность определяется флуктуацией случайного фактора (его дисперсией). Требуемую степень точности можно задать в различных формах: в виде доли стандартного отклонения; в процентах от среднего значения; в абсолютных значениях и т. д. Очевидно, что точность результатов и количество вложенного в моделирование труда тесно связаны между собой.

Уменьшить ошибку получения данных можно двумя различными способами. Один из них состоит в простом повторении эксперимента необходимое число раз и усреднении полученных результатов (метод повторения). К сожалению, такой способ недостаточно эффективен, так как среднеквадратичное отклонение усредненной величины обратно пропорционально только квадратному корню из числа повторений. Другой способ заключается в использовании более точной методики формирования случайных выборок.

## **6. АНАЛИЗ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ И СРАВНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

Как отмечалось ранее, даже весьма простые на первый взгляд реальные системы слишком сложны, чтобы их можно было изучать детально. Следовательно, необходимо отвлечься от большинства свойств реальной системы и выделить среди них лишь те, которые в совокупности дают возможность построить упрощенный ее вариант. Обычно этот процесс удобно разбить на ряд независимых этапов анализа отдельных элементов системы. Такой подход основан на том, что в системе всегда существуют элементы, взаимодействие между которыми практически отсутствует.

После разбиения системы на элементы строят гипотезы относительно природы и вида взаимодействий. Во многих случаях гипотезы о том, как работает элемент, или о взаимодействии двух и более элементов настолько просты и следствия из них настолько очевидны, что их можно проверить непосредственно с помощью статистического анализа или других эмпирических методов. Например, если предположить, что время обслуживания в системе распределено по экспоненциальному закону, а время между приходом заявок на обслуживание – по закону Пуассона, можно проверить эти гипотезы по имеющимся данным, т. е. по наблюдениям над работой системы обслуживания.

Как несколько раз было отмечено ранее, задача проверки адекватности модели возникает в течение всего процесса моделирования. Перечислим некоторые недостатки любой модели в целом:

- модель может содержать несущественные переменные;
- модель может не содержать существенных переменных;
- одна или более существенных переменных могут быть оценены или представлены неточно;

## **7. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Среди методов прикладного системного анализа имитационное моделирование является одним из самых мощных инструментов исследования сложных систем, управление которыми связано с принятием решений в условиях неопределенности. По сравнению с другими методами такое моделирование позволяет рассматривать большое количество альтернатив, улучшать качество управленческих решений и точнее прогнозировать их последствия. Для проведения имитационного эксперимента знаний математических основ ИМ недостаточно. Необходимо также ознакомиться с практическими аспектами предмета исследований, включая изучение причин возможных успехов и неудач.

Для разработки машинной имитационной модели сложной системы требуются специалисты различных профилей, например в области исследования операций, статистики, программирования, системного анализа, экономики и др. Причем каждый специалист может быть задействован по мере необходимости и в дальнейшем продолжать работу, касающуюся других проектов. На ранних стадиях разработки модели необходимы только специалисты по исследованию операций и специалисты-отраслевники. Экспертные оценки могут потребоваться на различных стадиях выполнения проекта, в то время как программисты и аналитики привлекаются лишь после завершения создания программного обеспечения для первых грубых вариантов модели системы.

Не менее важным является вопрос о том, сколько же проектов оказываются фактически внедренными. Процент успешного использования программ ИМ в настоящее время остается достаточно низким, что заставляет обратить особое внимание на организационные аспекты ИМ.

## **8. ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

Как отмечалось ранее, ИМ можно использовать во всех областях человеческой деятельности, но, поскольку эта наука возникла в первую очередь при решении военно-стратегических и военно-экономических задач, большинство рассмотренных в этом разделе примеров посвящено этой тематике. Более того, наибольшие успешные результаты, достигнутые с помощью ИМ, получены именно в этих отраслях.

### **8.1. Имитационная модель бомбардировки промышленного предприятия**

Предлагаемая модель имитирует поведение бомбардировщика, посланного атаковать важное промышленное предприятие ракетами класса «воздух – земля». Каждая ракета наводится индивидуально. Размеры предприятия: длина  $a = 150$  м, ширина  $b = 60$  м. Точка прицеливания – геометрический центр цели. Для расстояния, с которого запускаются ракеты, отклонение по дальности и боковое отклонение независимы, нормально распределены относительно точки прицеливания и имеют нулевое среднее значение. Среднеквадратичные отклонения по дальности  $\sigma_x = 60$  м и боковому направлению  $\sigma_y = 120$  м. При каждом заходе бомбардировщик выпускает  $n = 6$  ракет. Необходимо оценить среднее число попаданий при каждой атаке.

Возможно несколько вариантов захода бомбардировщика на атаку, связанных со взаимным расположением предприятия и атакующего самолета. Задачу можно решить аналитическим методом с использованием таблиц функций Лапласа и методом Монте-Карло. Для случаев заходов самолета на атаку с направлений, совпадающих с направлением продольной или попе-

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непрерывный прогресс в развитии науки и техники обуславливает использование сложных систем, построение адекватных математических моделей которых становится все более затруднительным. Поскольку, как отмечалось выше, практически не существует задач, которые невозможно было бы решить с помощью методов имитационного моделирования, применение этих методов по-прежнему остается актуальным.

Несмотря на отмеченные ранее недостатки метода, хорошие перспективы имитационного моделирования обусловлены такими факторами, как

- рост быстродействия и объема памяти ЭВМ;
- возможность параллельных вычислений на многопроцессорных машинах;
- создание сетей ЭВМ с выходом пользователя на наиболее подходящую машину;
- развитие методов понижения дисперсии результатов;
- обеспечение интерактивного режима работы пользователя и ЭВМ;
- создание банков данных об объектах моделирования.

Перечисленные и многие другие факторы являются основанием для качественного скачка в развитии методов имитационного моделирования, что, в свою очередь, внесет существенный вклад в развитие научно-технического прогресса в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972.
2. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
3. *Волков И.К., Загоруйко Е.А.* Исследование операций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
4. *Горяинов В.Б., Павлов И.В., Цветкова Г.М.* и др. Математическая статистика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
5. *Кельтон В., Лоу А.* Имитационное моделирование. Классика CS. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004.
6. *Колде Я.К.* Практикум по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высш. шк., 1991.
7. *Рыжиков Ю.И.* Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб.: КОРОНА принт.; М.: Альтекс-А, 2004.
8. *Строгалева В.П., Новиков Б.К., Толкачева И.О.* Системный подход к проектированию и оценка эффективности ракетного и ствольного оружия. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
9. *Строгалева В.П., Толкачева И.О., Пашиков Н.Ю.* Имитационное моделирование систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996.
10. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Пер. с англ. М.: Мир, 1978.



*Учебное издание*

**Строгалев Валерий Петрович  
Толкачева Ирина Олеговна**

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Редактор *Э.Я. Ахадова*  
Корректор *Е.В. Авалова*  
Технический редактор *Э.А. Кулакова*  
Художник *Н.Г. Столярова*  
Компьютерная графика *О.В. Левашиовой*  
Компьютерная верстка *И.В. Степанова*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 14.12.07. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 17,5. Уч.-изд. л. 16,83.  
Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5