

В. П. Строгалева, И. О. Толкачева

Имитационное моделирование

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности 170400
«Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное оружие»*

3-е издание



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 7

УДК 681.3.06(075.8)

ББК 32.973.2

С86

Рецензенты:

канд. техн. наук, зам. начальника 3 ЦНИИ МО РФ *А. В. Жигалов*;
канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника
и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана *А. И. Максимов*

Строгалева, В. П.

С86 Имитационное моделирование : учебное пособие / В. П. Строгалева, И. О. Толкачева. — 3-е изд. — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — 295, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4751-0

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.

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 681.03.06(075.8)

ББК 32.973.2



Все права защищены. Никакая часть данного издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку Издательства обеспечивает Адвокатское бюро «Сергей Москаленко и партнеры».

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

© Строгалева В.П., Толкачева И.О., 2015,
с изменениями

© Оформление. Издательство

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

ISBN 978-5-7038-4751-0

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 интересующей 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. 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 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» [1]. В предлагаемом пособии частично используется материал этой книги, сохранена последовательность изложения рассматриваемых проблем, возникающих при создании

работоспособной 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 [2—4].

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 точностных 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 Президенту МГТУ им. Н. Э. Баумана И. Б. Федорову за существенную помощь в опубликовании второго издания этой книги.

1. ОСНОВЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование (ИМ) — один из самых мощных инструментов 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.

В настоящее время не существует единой точки зрения по вопросу о том, что понимать под имитационным моделированием. Так, существуют различные трактовки:

в первой под имитационной моделью понимается математическая модель в классическом смысле;

во второй этот термин сохраняется лишь за теми моделями, в которых тем или иным способом разыгрываются (имитируются) случайные воздействия;

в третьей предполагают, что имитационная модель отличается от обычной математической более детальным описанием, но критерий окончания математической модели и начала имитационной, не вводится.

Попробуем разобраться в гносеологии этого вопроса, несмотря на то, что, как полагают авторы, это практически невозможно.

Приведем цитату академика Н. Н. Моисеева: «И первое, что оказывается необходимым для реализации подобных идей, — это умение организовать серию вариантных расчетов: эксперту важно представить себе характер изучаемого процесса, степень его “управляемости”, характер предельных возможностей (множеств достижимости), т. е. организовать многократно повторенный машинный эксперимент с моделью.

Для этой цели и должны быть созданы модели, имитирующие реальность, имитирующие изучаемый процесс. Эксперт с помощью этих моделей, с помощью серии специально организованных вариантных расчетов получает те знания, без которых выбрать аль-

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, представляющей авторам наиболее удобной для восприятия.

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 [8, 9]. 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 числа, называемого вероятностью. В случае примера с игральной костью этим числом является $1/6$.

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 проводит 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 благодаря 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 цифровым машинам, и устранить их недостатки. Некоторые типы задач обуславливают необходимость усовершенствовать

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 использования, т. е. проведение с ее помощью нее экспериментов. В связи с этим следует рассмотреть вопросы такого стратегического планирования эксперимента, которое позволит получить необходимую информацию при минимальных затратах.

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 эксперимента необходимо повторять его, каждый раз изменяя значения входящих в модель случайных факторов. Поскольку время одного прогона сложного модельного эксперимента может быть достаточно большим, а выделенное на него 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.

При определении необходимого числа повторений (прогнозов) исследователь должен рассматривать интересующие его переменные отклика вместе с оценками их среднеквадратичных отклонений. Необходимое число повторений определяется

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 позволяют 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 за 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 существенная переменная может быть оценена или представлена неточно;
- структура модели (т. е. зависимость, связывающая отклик с управляемыми или неуправляемыми переменными) может быть ошибочной.

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 ознакомление 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 участвовать в других проектах. На ранних стадиях разработки модели необходимы только специалисты по исследованию операций и специалисты-отраслевики. Экспертные оценки могут потребоваться на различных стадиях выполнения проекта, в то время как программисты и аналитики привлекаются лишь после завершения создания ПО для предварительных вариантов модели системы.

Весьма 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: $a = 150$ м, $b = 60$ 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 поперечной оси симметрии предприятия, решение легко получить аналитически, тогда как для остальных случаев такое решение становится громоздким и аналитический подход себя не оправ-

Литература

1. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Пер. с англ. М.: Мир, 1978.
2. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972.
3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
4. *Волков И.К., Загоруйко Е.А.* Исследование операций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
5. *Горяинов В.Б., Павлов И.В., Цветкова Г.М.* и др. Математическая статистика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
6. *Адлер Ю.П., Щенетова С.Е.* Система экономики качества. М.: Стандарты и качество, 2009.
7. *Кельтон В., Лоу А.* Имитационное моделирование. Классика CS. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004.
8. *Колде Я.К.* Практикум по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высш. шк., 1991.
9. *Рыжиков Ю.И.* Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб.: КОРОНА принт.; М.: Альтекс-А, 2004.
10. *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.
11. *Строгалева В.П., Толкачева И.О., Пашков Н.Ю.* Имитационное моделирование систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996.

Содержание

Предисловия.	3
1. Основы имитационного моделирования	5
1.1. Суть имитационного моделирования	8
1.2. Система, модели и имитационное моделирование.	10
1.3. Системный подход к формированию имитационной модели	29
1.4. Обоснование, формулирование и конструирование имитационной модели	35
2. Математический аппарат имитационного моделирования	48
2.1. Основные положения теории вероятностей.	48
2.2. Схемы образования случайных величин.	60
2.3. Выборочный метод Монте-Карло	79
2.4. Основные понятия математической статистики	86
2.5. Теория оценок	89
2.6. Проверка статистических гипотез	96
2.7. Методы идентификации и преобразования статистической информации	112
2.8. Методы экспертных оценок	124
3. Программное обеспечение имитационного моделирования.	129
3.1. Особенности выбора программного обеспечения	130
3.2. Классификация программных средств имитационного моделирования.	132
3.3. Возможности программ имитационного моделирования	140
3.4. Генераторы случайных чисел.	147
3.5. Генерирование случайных величин	154
4. Планирование экспериментов и методы оптимизации.	162
4.1. Основные понятия и определения.	163
4.2. Однофакторный дисперсионный анализ	168
4.3. Факторный анализ.	173
4.4. Неполный факторный анализ.	179
4.5. Нахождение оптимальных условий	181
5. Тактическое планирование	185
5.1. Нестационарные режимы работы имитационной модели	186
5.2. Определение размера выборки	190
5.3. Методы понижения дисперсии.	197

6. Анализ выходных данных и сравнение альтернативных вариантов имитационной модели	203
6.1. Метод проверок	204
6.2. Метод доверительных интервалов	211
6.3. Проблема многомерных откликов	213
6.4. Анализ чувствительности имитационной модели.	215
7. Организационные аспекты имитационного моделирования . . .	218
7.1. Имитационное моделирование как инструмент исследования операций	219
7.2. Общие требования к разработке имитационной модели. . .	227
7.3. Использование результатов имитационного моделирования.	234
7.4. Перспективы имитационного моделирования	238
8. Примеры разработки имитационных моделей	241
8.1. Имитационная модель бомбардировки промышленного предприятия	241
8.2. Имитационная модель отражения атаки ракетной батареей ПВО.	243
8.3. Имитационная модель дуэльной ситуации	251
8.4. Оценка рассеивания артиллерийских снарядов	256
8.5. Оценка эффективности стрельбы реактивных систем залпового огня	259
8.6. Моделирование азартных игр	265
8.7. Модель определения потребностей города в количестве пожарных машин	269
8.8. Модель функционирования фейерверочного комплекса . .	271
8.9. Имитационная модель полета тактической управляемой ракеты	275
8.10. Задачи для самостоятельного решения	279
Литература	285
Приложения	286

Учебное издание

Строгалев Валерий Петрович
Толкачева Ирина Олеговна

Имитационное моделирование

Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художник *А.С. Ключева*
Корректор *Р.В. Царева*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *Т.А. Клименко*

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

Подписано в печать 01.07.2017. Формат 60 × 90 1/16.
Усл. печ. л. 18,5. Тираж 100 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.