

*Динамической* моделью называется модель, если среди ее параметров есть временной, т. е. она отображает систему (процессы в системе) во времени.

### **1.3. Этапы разработки моделей**

Процесс моделирования имеет итерационный характер и проводится в рамках ранее сформулированных целей и с соблюдением границ моделирования. Построение начинается с изучения (обследования) реальной системы, ее внутренней структуры и содержания взаимосвязей между ее элементами, а также внешних воздействий и завершается разработкой модели.

Моделирование – от постановки задачи до получения результатов – проходит следующие этапы:

#### **I. Анализ требований и проектирование:**

1. Постановка и анализ задачи и цели моделирования.
2. Сбор и анализ исходной информации об объекте моделирования.
3. Построение концептуальной модели.
4. Проверка достоверности концептуальной модели.

#### **II. Разработка модели:**

1. Выбор среды моделирования.
2. Составление логической модели.
3. Назначение свойств модулям модели.
4. Задание модельного времени.
5. Верификация модели.

#### **III. Проведение эксперимента:**

1. Запуск модели, прогон модели.
2. Варьирование параметров модели и сбор статистики.
3. Анализ результатов моделирования.

#### **IV. Подведение итогов моделирования согласно поставленной цели и задачи моделирования**

Схема этапов моделирования представлена на рис. 1.11.

Необходимо отметить, что при разработке конкретных моделей с определенными целями и границами моделирования необязательно все подэтапы должны выполняться. Например, при разработке статических моделей IDEF0, DFD 3-й и 4-й подэтапы «Разработки модели» не выполняются, так как эти методологии не предусматривают задание временных параметров модели.

На первом этапе моделирования – «Анализ требований и проектирование» – формулируется концептуальная модель, строится ее формальная схема и решается вопрос об эффективности и целесообразности моделирования системы.



Рис. 1.11. Схема создания модели

Концептуальная модель (КМ) – это абстрактная модель, определяющая состав и структуру системы, свойства элементов и причинно-следственные связи, присущие анализируемой системе и существенные для достижения целей моделирования. В таких моделях обычно в словесной форме приводятся сведения о природе и параметрах (характеристиках) элементарных явлений исследуемой системы, виде и степени взаимодействия между ними, месте и значении каждого элементарного явления в общем процессе функционирования системы. При создании КМ практически параллельно формируется область исходных данных (информационное пространство системы) – этап подготовки исходных данных. На данном этапе выявляются количественные характеристики (параметры) функционирования системы и ее элементов, численные значения которых составят исходные данные для моделирования. Очевидно, что значительная часть параметров системы – это случайные величины. Поэтому особое значение при формировании исходных данных имеют выбор законов распределения случайных величин, аппроксимация функций и т. д. В результате выявления свойств модели и построения концептуальной модели необходимо проверить адекватность модели.

На втором этапе моделирования – «Разработка модели» – происходит уточнение или выбор программного пакета моделирования. При выборе средств моделирования, как программных, так и технических, определяется ряд критериев. Непременным условием при этом является

достаточность и полнота средства моделирования для реализации концептуальной модели. Среди других критериев можно назвать доступность, простоту и легкость освоения, скорость и корректность создания программной модели.

После выбора среды проектирования концептуальная модель, сформулированная на предыдущем этапе, воплощается в компьютерную модель, т. е. решается проблема алгоритмизации и детализации модели.

Модель системы представляется в виде совокупности частей (элементов, подсистем). В эту совокупность включаются все части, которые обеспечивают, с одной стороны, сохранение целостности системы, а с другой – достижение поставленных целей моделирования (получение необходимой точности и достоверности результатов при проведении компьютерных экспериментов над моделью). В дальнейшем производится окончательная детализация, локализация (выделение системы из окружающей среды), структуризация (указание и общее описание связей между выделенными элементами системы), укрупненное описание динамики функционирования системы и ее возможных состояний.

Для того чтобы выполнить подэтап «Задание модельного времени», введем понятие модельного времени. В компьютерной модели переменная, обеспечивающая текущее значение модельного времени, называется *часами модельного времени*.

Существует два основных подхода к продвижению модельного времени: *продвижение времени от события к событию* и *продвижение времени с постоянным шагом* [6].

Подход, использующий продвижение времени в модели от события к событию, применяется всеми основными компьютерными программами и большинством разработчиков, создающих свои модели на универсальных языках (рис. 1.12) [6].

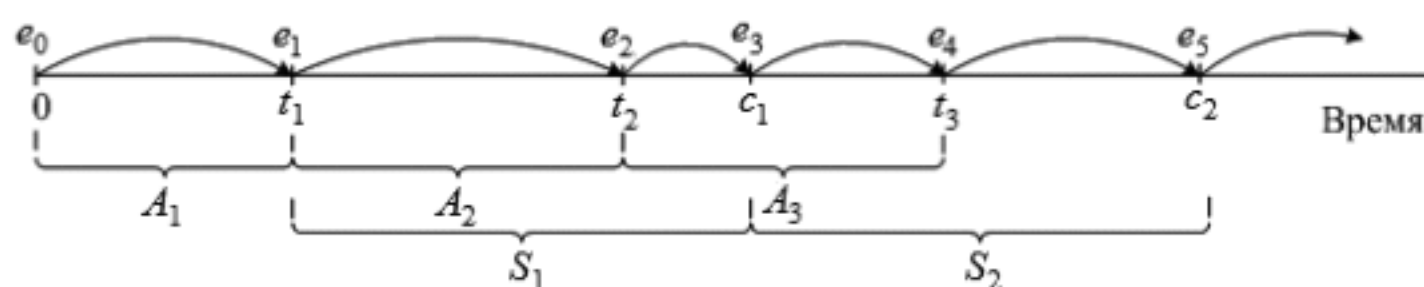


Рис. 1.12. Механизм продвижения модельного времени от события к событию

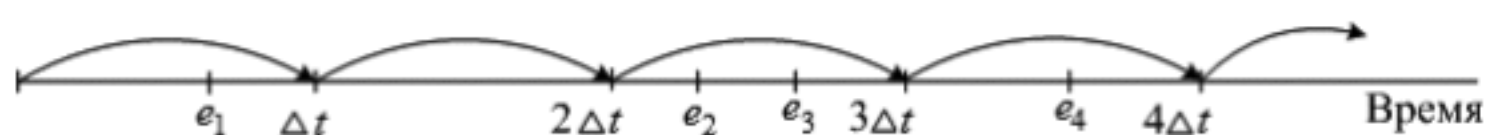
При использовании продвижения времени от события к событию часы модельного времени в исходном состоянии устанавливаются в ноль и определяется время возникновения будущих событий. После этого часы модельного времени переходят на время возникновения ближайшего со-

бытия, и в этот момент обновляется состояние системы, с учетом произошедшего события, а также сведения о времени возникновения будущих событий. Затем часы модельного времени продвигаются ко времени возникновения следующего нового ближайшего события, обновляется состояние системы, определяется время будущих событий и т. д. Процесс продвижения модельного времени от времени возникновения одного события ко времени возникновения другого продолжается до тех пор, пока не будет выполнено какое-либо условие останова, указанное заранее. Поскольку в дискретно-событийной имитационной модели все изменения происходят только во время возникновения событий, периоды бездействия системы просто пропускаются и часы переводятся со времени возникновения одного события на время возникновения другого. При продвижении времени с постоянным шагом такие периоды бездействия не пропускаются, что приводит к большим затратам компьютерного времени. Следует отметить, что длительность интервала продвижения модельного времени от одного события к другому может быть различной [6].

*При продвижении времени с постоянным шагом  $\Delta t$*  часы модельного времени продвигаются точно на  $\Delta t$  единиц времени для какого-либо соответствующего выбора значения  $\Delta t$ . После каждого обновления часов выполняется проверка, чтобы определить, произошли какие-либо события в течение предыдущего интервала времени  $\Delta t$  или нет. Если на этот интервал запланированы одно или несколько событий, считается, что данные события происходят в конце интервала, после чего состояние системы и статистические счетчики соответствующим образом обновляются. Продвижение времени посредством постоянного шага показано на рис. 1.13, где изогнутые стрелки показывают продвижение часов модельного времени, а  $e_i (i = 1, 2, \dots)$  – это действительное время возникновения события  $i$  любого типа, а не значение часов модельного времени. На интервале  $[0, \Delta t)$  событие происходит в момент времени  $e_1$ , но оно рассматривается как произошедшее в момент времени  $\Delta t$ . На интервале  $[\Delta t, 2\Delta t)$  события не происходят, но все же модель выполняет проверку, чтобы убедиться в этом. На интервале  $[2\Delta t, 3\Delta t)$  события происходят в моменты времени  $e_2$  и  $e_3$ , однако считается, что они произошли в момент времени  $3\Delta t$  и т. д. В ситуациях, когда принято считать, что два или несколько событий происходят в одно и то же время, необходимо применение ряда правил, позволяющих определять, в каком порядке обрабатывать события. Таким образом, продвижение времени посредством постоянного шага имеет два недостатка: возникновение ошибок, связанных с обработкой событий в конце интервала, в течение которого они происходят, а также необходимость решать, какое событие обрабатывать первым, если собы-



тия, в действительности происходящие в разное время, рассматриваются как одновременные. Подобного рода проблемы можно частично решить, сделав интервалы  $\Delta t$  менее продолжительными, но тогда возрастает число проверок возникновения событий, что приводит к увеличению времени выполнения задачи. Принимая во внимание это обстоятельство, продвижение времени с помощью постоянного шага не используют в дискретно-событийных имитационных моделях, когда интервалы времени между последовательными событиями могут значительно отличаться по своей продолжительности [6].



*Рис. 1.13. Пример продвижения модельного времени посредством постоянного шага*

В основном этот подход предназначен для систем, в которых можно допустить, что все события в действительности происходят в один из моментов  $n$  времени  $\Delta t$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) для соответственно выбранного  $\Delta t$ . Так, в экономических системах данные часто предоставляются за годичные промежутки времени, поэтому естественно в имитационной модели установить продвижение времени с шагом, равным одному году. Следует заметить, что продвижение времени посредством постоянного шага может быть выполнено с помощью механизма продвижения времени от события к событию, если планировать время возникновения событий через  $\Delta t$  единиц времени, т. е. данный подход является разновидностью механизма продвижения времени от события к событию.

Третий этап – «Проведение эксперимента» – является решающим, на котором, благодаря процессу имитации моделируемой системы, происходит сбор необходимой информации, ее статическая обработка в интерпретации результатов моделирования, в результате чего принимается решение: либо исследование будет продолжено, либо закончено. Если известен результат, то можно сравнить его с полученным результатом моделирования. Полученные выводы часто способствуют проведению дополнительной серии экспериментов, а иногда и изменению модели. Основой для выработки решения служат результаты тестирования и экспериментов. Если результаты не соответствуют целям моделирования (реальному объекту или процессу), значит, допущены ошибки на предыдущих этапах или входные данные не являются лучшими параметрами в изучаемой области, поэтому разработчик возвращается к одному из предыдущих этапов.

Подэтап «Анализ результатов моделирования» представляет собой всесторонний анализ полученных результатов с целью получения рекомендаций по проектированию системы или ее модификации.

На этапе *«Подведение итогов моделирования согласно поставленной цели и задачи моделирования»* проводят оценку проделанной работы, сопоставляют поставленные цели с полученными результатами и создают окончательный отчет по выполненной работе.

#### **1.4. Выводы по главе**

В данной главе были рассмотрены основные понятия теории моделирования. Даны определения модели и моделирования. Показано, что в зависимости от выбранного критерия модели могут быть классифицированы различным образом. Приведена классификация моделей по степени абстрагирования модели от оригинала, степени устойчивости, отношению к внешним факторам и отношению ко времени. Приведены и описаны этапы моделирования.

Для моделирования сетей на высоком уровне необходимо понимание математических основ моделирования. Для этого в следующей главе рассмотрим основы теории вероятностей и математической статистики.

#### **1.5. Вопросы к главе\***

1. Что такое модель и моделирование?
2. Что такое адекватная модель?
3. Перечислите, какими свойствами должна обладать модель.
4. Расскажите о классификации моделей.
5. Что такое математическая модель?
6. В чем разница задания модельного времени «продвижение времени от события к событию» и «продвижение времени с постоянным шагом»?
7. На какие типы можно разделить материальные и идеальные модели? Дайте определение каждому типу моделей.
8. Дайте объяснение «детерминированной» и «стохастической» моделям.
9. Что такое аналитическая модель системы?
10. Что такое имитационная модель системы?

---

\* Данные вопросы могут быть использованы для учебной дискуссии.