

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Ни один проект крупной сети со сложной топологией в настоящее время не обходится без исчерпывающего моделирования будущей сети. Программы, выполняющие эту задачу, достаточно сложны и дороги. Целью моделирования является определение оптимальной топологии, адекватный выбор сетевого оборудования, определение рабочих характеристик сети и возможных этапов будущего развития. Необходимо помнить, что сеть, слишком точно оптимизированная для решений задач текущего момента, может потребовать серьезных переделок в будущем. При этом на модели можно опробовать влияние всплесков широковебательных запросов или реализовать режим коллапса (для Ethernet), что вряд ли можно применить в работающей сети.

В процессе моделирования выясняются следующие параметры:

- предельные пропускные способности различных фрагментов сети и зависимости потерь пакетов от загрузки отдельных станций и внешних каналов;
- время отклика основных серверов в разных режимах, в том числе таких, которые в реальной сети крайне нежелательны;
- влияние установки новых серверов на перераспределение информационных потоков;
- решение оптимизации топологии при возникновении узких мест в сети (размещение серверов, внешних шлюзов, организация опорных каналов и пр.);
- выбор того или иного типа сетевого оборудования (например, 10BaseTX или 100BaseFX) или режима его работы (например, cut-through, store-and-forward для мостов и переключателей и т.д.);
- выбор внутреннего протокола маршрутизации и его параметров (например, метрики);
- определение предельно допустимого числа пользователей того или иного сервера;
- оценка влияния мультимедийного трафика на работу локальной сети, например, при подготовке видеоконференций.

Результаты моделирования должны иметь точность 10–15 % (см. п. 1.1 гл. 1), т.к. этого достаточно для большинства целей и не требует слишком большого количества машинного времени. Для моделирования поведения реальной сети необходимо знать все ее рабочие параметры. Чем точнее будет воспроизведено поведение сети, тем больше машинного времени это потребует. Кроме того, необходимо сделать некоторые предположения относительно распределения загрузки для конкрет-

ных ЭВМ и других сетевых элементов, задержек в переключателях, мостах, времени обработки запросов в серверах. Здесь нужно учитывать и характер решаемых на ЭВМ задач.

В зависимости от целей и задач моделирования сетей выделяют моделирование аналитическое и имитационное.

3.1. Аналитическое моделирование

Использование аналитических методов связано с необходимостью построения математических моделей локальных вычислительных сетей (ЛВС) в строгих математических терминах. Аналитические модели вычислительных сетей носят обычно вероятностный характер и строятся на основе понятий аппарата теорий массового обслуживания, вероятностей и марковских процессов, а также методов диффузной аппроксимации. Могут также применяться дифференциальные и алгебраические уравнения [12].

При использовании этого математического аппарата часто удается быстро получить аналитические модели для решения достаточно широкого круга задач исследования ЛВС. В то же время аналитические модели имеют ряд существенных недостатков, к числу которых следует отнести:

- значительные упрощения, свойственные большинству аналитических моделей (представление потоков заявок как простейших; предположение об экспоненциальном распределении длительностей обслуживания заявок; невозможность обслуживания заявок одновременно несколькими приборами, например процессором и оперативной памятью, и др.). Подобные упрощения, а зачастую искусственное приспособление аналитических моделей с целью использования хорошо разработанного математического аппарата для исследования реальных ЛВС, ставят иногда под сомнение результаты аналитического моделирования [19];

- громоздкость вычислений для сложных моделей, например использование для представления в модели процесса функционирования современной ЛВС по методу дифференциальных уравнений Колмогорова требует (для установившегося режима) решения сложной системы алгебраических уравнений [19];

- сложность аналитического описания вычислительных процессов ЛВС. Большинство известных аналитических моделей можно рассматривать лишь как попытку подхода к описанию процессов функционирования ЛВС;

- недостаточная развитость аналитического аппарата в ряде случаев не позволяет в аналитических моделях выбирать для исследования

наиболее важные характеристики (показатели эффективности) ЛВС. Особенно большие затруднения при аналитическом моделировании связаны с учетом в процессах функционирования ЛВС программных средств операционных систем и другого общего ПО [19].

Указанные особенности позволяют заключить, что аналитические методы имеют самостоятельное значение лишь при исследовании процессов функционирования ЛВС в первом приближении и в частных, достаточно специфичных задачах. В этих случаях возможности исследования аналитических моделей ЛВС существенно расширяют приближенные методы, например: методы диффузионной аппроксимации, методы операционного анализа и аналитические сетевые модели.

3.1.1. Аналитическое моделирование на основе систем массового обслуживания

При аналитическом моделировании исследование процессов или объектов заменяется построением их математических моделей и исследованием этих моделей. В основу метода положены идентичность формы уравнений и однозначность соотношений между переменными в уравнениях, описывающих оригинал и модель. Поскольку события, происходящие в локальных вычислительных сетях, носят случайный характер, то для их изучения наиболее подходящими являются вероятностные математические модели теории массового обслуживания [5].

Аналитическая модель сети представляет собой совокупность математических соотношений, связывающих между собой входные и выходные характеристики сети. При выводе таких соотношений приходится пренебрегать какими-то малосущественными деталями или обстоятельствами [8].

Телекоммуникационная сеть при некотором упрощении может быть представлена в виде совокупности процессоров (узлов), соединенных каналами связи. Сообщение, пришедшее в узел, ждет некоторое время до того, как оно будет обработано. При этом может образоваться очередь таких сообщений, ожидающих обработки. Время передачи или полное время задержки сообщения D равно:

$$D = T_p + S + W, \quad (3.1)$$

где T_p , S и W , соответственно, время распространения, время обслуживания и время ожидания. Одной из задач аналитического моделирования является определение среднего значения D . При больших нагрузках основной вклад дает ожидание обслуживания W . Для описания очередей в дальнейшем будет использована нотация Д. Дж. Кенделла:

$$A/B/C/K/m/z,$$

где A – процесс прибытия;

B – процесс обслуживания;

C – число серверов (узлов);

K – максимальный размер очереди (по умолчанию – ∞);

m – число клиентов (по умолчанию – ∞);

z – схема работы буфера (по умолчанию FIFO).

Буквы A и B представляют процессы прихода и обслуживания и обычно заменяются следующими буквами, характеризующими закон, соответствующий распределению событий:

D – постоянная вероятность;

M – марковское экспоненциальное распределение;

G – обобщенный закон распределения;

E_k – распределение Эрланга порядка k ;

H_k – гиперэкспоненциальное распределение порядка k [4].

Наиболее распространенными схемами работы буферов являются FIFO (First-In-First-Out), LIFO (Last-In-First-Out) и FIRO (First-In-Random-Out). Например, запись $M/M/2$ означает очередь, для которой времена прихода и обслуживания имеют экспоненциальное распределение, имеется два сервера, длина очереди и число клиентов могут быть сколь угодно большими, а буфер работает по схеме FIFO [19].

Среднее значение длины очереди \bar{Q} при заданной средней входной частоте сообщений λ и среднем времени ожидания \bar{W} определяется на основе теоремы Литла (1961) [19]:

$$\bar{Q} = \lambda \bar{W}. \quad (3.2)$$

Для варианта очереди $M/G/1$ входной процесс характеризуется распределением Пуассона со скоростью поступления сообщений λ . Вероятность поступления k сообщений на вход за время t равно:

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} = e^{-\lambda t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

Пусть N – число клиентов в системе, Q – число клиентов в очереди и пусть вероятность того, что входящий клиент обнаружит j других клиентов, равна:

$$\Pi_j = P[n = j], \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} \Pi_j = 1.$$

$$\Pi_0 = 1 - r; r = lt. \quad (3.4)$$

Тогда среднее время ожидания \bar{W} :

$$\bar{W} = \frac{\bar{Q}}{\lambda} = \frac{pt}{2(1-p)} \left(1 + \frac{\sigma^2}{\tau^2} \right) \text{ (формула Поллажека – Хинчина)} \quad (3.5)$$

s – среднеквадратичное отклонение для распределения времени обслуживания.

Для варианта очереди $M/G/1$ $H(t) = P[X \leq t] = 1 - e^{-mt}$ (H – функция распределения времени обслуживания). Откуда следует $s^2 = t^2$ [19]

$$\bar{W} = \frac{p\tau}{1-p}. \quad (3.6)$$

Для варианта очереди $M/D/1$ время обслуживания постоянно, а среднее время ожидания составляет:

$$\bar{W} = \frac{p\tau}{2(1-p)}. \quad (3.7)$$

Рассмотрим вариант сети Ethernet на основе концентратора-переключателя с числом каналов N . При этом будет предполагаться, что сообщения на входе всех узлов имеют пуассоновское распределение со средней интенсивностью l_i , распределение сообщений по длине произвольно. Сообщения отправляются в том же порядке, в котором они прибыли. Трафик в сети предполагается симметричным. Очередь имеет модель $M/G/1$. Среднее время ожидания в этом случае равно:

$$\bar{W} = \hat{y} + \frac{\lambda \hat{y}^2}{1(1-p)},$$

где $\hat{y} = [1 + (N-2)pG] \bar{S}$;

$$\hat{y} = 2[1 + (N-2)pG + (N-2)(N-3)p^2G^2] \bar{S}^2. \quad (3.8)$$

$$p = \frac{\lambda \bar{S}}{1 - (N-2)G\lambda \bar{S}}. \quad (3.9)$$

$\lambda = \lambda_i$, а $G = 1/(N-1)$ равно вероятности того, что сообщение отправителя i направлено получателю j . Требование стабильности требует, чтобы $\lambda \bar{S} \leq (N-1)(2N-3)$. Для бóльших n это приводит к $\lambda \bar{S} \leq 1/2$.

Работа сети Ethernet характеризуется рядом параметров, к числу которых относятся вероятность захвата канала и эффективность [19].

Первый параметр определяется по выражению

$$P = \left(1 - \frac{1}{Q}\right)^{Q-1}, \quad (3.10)$$

где P – вероятность того, что ровно одна станция попытается передать кадр в течение такта и захватит канал;

Q – число станций, пытающихся захватить канал для передачи кадра данных.

Эффективность LAN Ethernet определяется следующим образом. Общее время работы сети Ethernet делится между интервалами передачи и интервалами конкуренции. Для передачи кадра данных требуется L/C секунд, где L – длина кадра в битах, C – скорость передачи данных в бит/сек. Среднее время T , необходимое на захват канала, равно:

$$T = W \cdot B, \quad (3.11)$$

где W – среднее число тактов, прошедших в интервале конкуренции, пока станция не захватит канал для передачи кадра данных;

B – длительность такта или время до обнаружения конфликта после начала передачи кадра.

Среднее число тактов W рассчитывается как:

$$W = \frac{1 - P}{P}. \quad (3.12)$$

С учетом введенных показателей, эффективность E работы локальной сети Ethernet определяется следующим образом:

$$E = \frac{L/C}{L/C + T}. \quad (3.13)$$

Для моделирования ЛВС наиболее часто используются следующие типы СМО:

1. Одноканальные СМО с ожиданием. Представляют собой один обслуживающий прибор с бесконечной очередью. Данная СМО является наиболее распространенной при моделировании. С той или иной долей приближения с ее помощью можно моделировать практически любой узел ЛВС.

2. Одноканальные СМО с потерями. Представляют собой один обслуживающий прибор с конечным числом мест в очереди. Если число

заявок превышает число мест в очереди, то лишние заявки теряются. Этот тип СМО может быть использован при моделировании каналов передачи в ЛВС.

3. Многоканальные СМО с ожиданием. Представляют собой несколько параллельно работающих обслуживающих приборов с общей бесконечной очередью. Данный тип СМО часто используется при моделировании групп абонентских терминалов ЛВС, работающих в диалоговом режиме.

4. Многоканальные СМО с потерями. Представляют собой несколько параллельно работающих обслуживающих приборов с общей очередью, число мест в которой ограничено. Эти СМО, как и одноканальные с потерями, часто используются для моделирования каналов связи в ЛВС.

5. Одноканальные СМО с групповым поступлением заявок. Представляют собой один обслуживающий прибор с бесконечной очередью. Перед обслуживанием заявки группируются в пакеты по определенному правилу.

6. Одноканальные СМО с групповым обслуживанием заявок. Представляют собой один обслуживающий прибор с бесконечной очередью.

Заявки обслуживаются пакетами, составляемыми по определенному правилу. Последние два типа СМО могут использоваться для моделирования таких узлов ЛВС, как центры (узлы) коммутации.

Локальная вычислительная сеть в целом может быть представлена в виде сети массового обслуживания. Различают *открытые*, *замкнутые* и *смешанные* сети.

Открытой называется сеть массового обслуживания, состоящая из M узлов, причем хотя бы в один из узлов сети поступает извне входящий поток заявок, и имеется сток заявок из сети. Для открытых сетей характерно то, что интенсивность поступления заявок в сеть не зависит от состояния сети, т.е. от числа заявок, уже поступивших в сеть. Открытые сети используются для моделирования ЛВС, работающих в неоперативном режиме. Каждая заявка поступает на вход соответствующего узла коммутации, где определяется место ее обработки. Затем заявка передается на «свой» сервер или по каналу связи – на «соседний» сервер, где обрабатывается, после чего возвращается к источнику и покидает сеть [19].

Замкнутой называется сеть массового обслуживания с множеством узлов M без источника и стока, в которой циркулирует постоянное число заявок. Замкнутые СМО используются для моделирования таких ЛВС, источниками информации для которых служат абонентские терминалы, работающие в диалоговом режиме. В этом случае каждая груп-

па абонентских терминалов представляется в виде многоканальной системы массового обслуживания с ожиданием и включается в состав устройств сети [19].

Различают *простой* и *сложный* режимы работы диалоговых абонентов. В простом режиме абоненты не производят никаких действий, кроме отправки заданий в ЛВС и обдумывания полученного ответа [19].

Абоненты с терминалов посылают запросы, которые по каналам связи поступают на узлы коммутации, а оттуда – на обработку на «свой» или «соседний» сервер. Дальнейшая обработка осуществляется так же, как в открытой сети [14].

При сложном режиме диалога работа абонентов представляется в виде совокупности операций некоего процесса, называемого технологическим процессом. Каждая операция технологического процесса моделируется соответствующей СМО. Часть операций предусматривает обращение к ЛВС, а часть операций может такого обращения не предусматривать [19].

Алгоритм работы самой ЛВС такой же, как для замкнутой сети.

Смешанной называется сеть массового обслуживания, в которой циркулирует несколько различных типов заявок (трафика), причем относительно одних типов заявок сеть замкнута, а относительно других типов заявок сеть открыта. С помощью смешанных СМО моделируются такие ЛВС, часть абонентов, которых работает в диалоговом, а часть – в неоперативном режиме. Для диалоговых абонентов также различают простой и сложный режим работы. Часто смешанные СМО моделируют ЛВС, в которых сервер дополнительно загружается задачами, решаемыми на фоне работы самой сети [19].

Алгоритм работы сети для диалоговых абонентов аналогичен алгоритму работы замкнутой сети, а алгоритм работы сети для неоперативных абонентов – алгоритму работы открытой сети.

Различают экспоненциальные и неэкспоненциальные модели ЛВС.

Экспоненциальные модели основаны на предположении о том, что потоки заявок, поступающие в ЛВС, являются пуассоновскими, а время обслуживания в узлах ЛВС имеет экспоненциальное распределение.

Для таких сетей получены точные методы для определения их характеристик; трудоемкость получения решения зависит в основном от размерности сети [19].

Однако в большинстве сетей (и локальных сетей в частности) потоки не являются пуассоновскими. Модели таких сетей называются *неэкспоненциальными*. При анализе неэкспоненциальных сетей в общем случае отсутствуют точные решения, поэтому наибольшее применение здесь находят приближенные методы.

Одним из таких методов является *метод диффузионной аппроксимации*. Использование диффузионной аппроксимации позволило, к настоящему времени получить приближенные аналитические зависимости для определения характеристик всех типов СМО, рассмотренных выше.

При этом не требуется точного знания функций распределения случайных величин, связанных с данной СМО (интервалов между поступлениями заявок временем обслуживания в приборах), а достаточно только знание первого (математического ожидания) и второго (дисперсии или квадрата коэффициента вариации – ККВ) моментов этих величин [19].

Применение диффузионной аппроксимации при анализе ЛВС основано на следующем:

- по каждому типу заявок вычисляется интенсивность поступления заявок данного типа в узлы сети так, как если бы данный поток заявок циркулировал в сети только один;
- по определенному правилу, зависящему от типа СМО и дисциплины обслуживания, складываются потоки заявок от всех источников;
- по определенному правилу определяется среднее время обслуживания в каждом узле ЛВС;
- полученные значения подставляются в соответствующую диффузионную формулу и определяются характеристики узлов ЛВС;
- определяются характеристики ЛВС в целом.

Постановка задачи анализа ЛВС при этом примет следующий вид. Дано:

- число узлов ЛВС;
- тип каждого узла ЛВС (тип СМО, моделирующей данный узел);
- дисциплина обслуживания в каждом узле ЛВС;
- общее число типов источников заявок, работающих в диалоговом режиме;
- общее число типов источников заявок, работающих в неоперативном режиме;
- для диалоговых источников в случае сложного режима работы число технологических процессов каждого типа, число операций в каждом технологическом процессе, среднее и ККВ времени выполнения каждой операции, матрица вероятностей передач между операциями, а также наличие или отсутствие на каждой операции обращения к ЛВС;
- для диалоговых источников в случае простого режима работы число источников (терминалов) каждого типа, среднее и ККВ времени реакции абонента на ответ сети;

- для неоперативных абонентов – средняя интенсивность поступления заявок и ККВ времени между поступлениями заявок; по каждому типу заявок (диалоговому и неоперативному) средняя интенсивность обслуживания в каждом узле ЛВС, ККВ времени обслуживания в узлах ЛВС и матрица вероятностей передач между узлами.

Требуется найти:

- среднее значение и дисперсию (или стандартное отклонение) времени задержки заявки каждого типа в ЛВС в целом;
- среднее значение и дисперсию (или стандартное отклонение) времени задержки в узлах ЛВС;
- загрузку узлов ЛВС;
- вероятность потери заявки в узле ЛВС (для узлов, моделируемых СМО с потерями).

Ограничения могут быть следующими:

- загрузка узлов не должна превышать 1;
- вероятность потери заявки не должна превышать 1;
- все характеристики должны быть положительны.

Иногда представляет интерес определение такого показателя, как максимальное время задержки заявки каждого типа в ЛВС. Максимальное время это такое время, превышение которого допустимо лишь для некоторого, наперед заданного процента заявок каждого типа. Для определения максимального времени используется методика, основанная на аппроксимации функции распределения времени задержки в сети эрланговским или гиперэкспоненциальным распределением, при этом необходимо задавать долю (процент) заявок, для которых рассчитывается максимальное время.

3.1.2. Сети Петри

Часто аналитики в задачах моделирования и анализа сложных параллельных и асинхронных систем обращаются к формальным системам, основанным на использовании математического аппарата сетей Петри. Формальная часть теории сетей Петри, основанная в начале 60-х годов немецким математиком Карлом Петри, в настоящее время содержит большое количество моделей, методов и средств анализа, имеющих обширное количество приложений практически во всех отраслях вычислительной техники [14].

Прикладная теория сетей Петри связана главным образом с применением сетей Петри к моделированию систем, их анализу и получающимся в результате этого глубоким проникновением в моделируемые системы [14].

Моделирование в сетях Петри осуществляется на событийном уровне. Определяются, какие действия происходят в системе, какие состояния предшествовали этим действиям и какие состояния примет система после выполнения действия. Выполнение событийной модели в сетях Петри описывает поведение системы. Анализ результатов выполнения может сказать о том, в каких состояниях пребывала или не пребывала система, какие состояния в принципе не достижимы. Однако такой анализ не дает числовых характеристик, определяющих состояние системы. Развитие теории сетей Петри привело к появлению так называемых «цветных» или «раскрашенных» сетей Петри. Понятие цветности в них тесно связано с понятиями переменных, типов данных, условий и других конструкций, более приближенных к языкам программирования.

Таким образом, структура сети Петри задается ориентированным двудольным мультиграфом, в котором одно множество вершин состоит из позиций, а другое множество – из переходов [14], причем множество вершин этого графа разбивается на два подмножества и не существует дуги, соединяющей две вершины из одного подмножества.

Итак, сеть Петри – это набор

$$N = (T, P, A), T \cap P = \emptyset, \quad (3.14)$$

где $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – подмножество вершин, называемых переходами;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – подмножество вершин, называемых позициями (местами);

$A \subseteq (T \times P) \cup (P \times T)$ – множество ориентированных дуг.

В сетях Петри вводятся объекты двух типов: динамические – изображаются метками (маркерами) внутри позиций и статические – им соответствуют вершины сети Петри.

Распределение маркеров по позициям называют маркировкой. Маркеры могут перемещаться в сети. Каждое изменение маркировки называют событием, причем каждое событие связано с определенным переходом. Считается, что события происходят мгновенно и одновременно при выполнении некоторых условий.

Каждому условию в сети Петри соответствует определенная позиция. Совершению события соответствует срабатывание (возбуждение или запуск) перехода, при котором маркеры из входных позиций этого перехода перемещаются в выходные позиции. Последовательность событий образует моделируемый процесс. Перемещаемые по сети маркеры часто называют фишками. Основные элементы сети Петри представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Элементы сетей Петри

| Название элемента | Изображение элемента |
|-------------------|----------------------|
| Позиция (Р) | |
| Переход (Т) | |
| Дуга | |

Переходы в сети Петри являются событиями, которые изменяют состояния в реальной системе. На рис. 3.1 приведен пример интерпретации сети Петри.

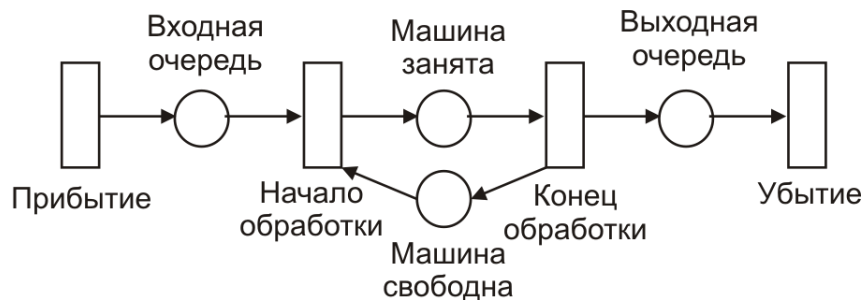


Рис. 3.1. Интерпретация сети Петри

Формальный аппарат сетей Петри предназначен для моделирования систем различного рода и отражает состояния исследуемой системы состоянием сети. Состояние сети Петри определяется ее маркировкой. Количество и распределение фишек сети определяют динамику исследуемой системы. Сеть Петри выполняется посредством запусков переходов в результате удаления фишек из его входных позиций и добавления их в выходные позиции перехода. Последовательность срабатываний переходов полностью определяет поведение сети. Таким образом, сеть Петри описывает структуру системы, ее состояние и поведение [14].

При введении ряда дополнительных правил и условий в алгоритмы моделирования получают различные разновидности сетей Петри. Это необходимо для определения модельного времени, которое позволит моделировать не только последовательность событий, но и их привязку ко времени. В настоящее время выделяют следующие разновидности сетей Петри:

- временная сеть Петри (переходы обладают весом, определяющим продолжительность срабатывания – задержку);
- стохастическая сеть Петри (задержки являются случайными величинами);
- функциональная сеть Петри (задержки определяются как функции некоторых аргументов, например: количества меток в каких-либо позициях, состояния некоторых переходов);
- цветная (раскрашенная) сеть Петри (метки могут быть различных типов, обозначаемых цветами, тип метки может быть использован как аргумент в функциональных сетях).

Основными свойствами сети Петри являются:

- ограниченность (число меток в любой позиции сети не может превысить некоторого значения K);
- безопасность (частный случай ограниченности);
- сохраняемость (постоянство загрузки ресурсов);
- достижимость (возможность перехода сети из одного заданного состояния, характеризуемого распределением меток, в другое);
- живость (возможностью срабатывания любого перехода при функционировании моделируемого объекта).

Среди достоинств аппарата сетей Петри можно указать следующие:

- позволяет моделировать асинхронность и недетерминизм параллельных независимых событий (в сети Петри могут одновременно и независимо друг от друга сработать несколько переходов), конфликтные взаимодействия между процессами;
- позволяет использовать единые методологические позиции для описания программного обеспечения, аппаратных средств и информационного обмена между системами;
- предоставляет возможность введения любой степени иерархической детализации описываемых программных и аппаратных подсистем модели;
- имеет большую анализирующую мощь, которая позволяет формальными средствами доказывать существование или отсутствие определенных состояний сети Петри.

Однако формальная модель сетей Петри, в силу своей универсальности, имеет ряд недостатков, затрудняющих практическое применение для моделирования сложных систем. К основным таким недостаткам можно отнести следующие:

- высокая трудоемкость анализа сетей большой размерности, а реальные бизнес-процессы предприятия моделируются именно сетями большой размерности;

- описательная мощность сетей Петри недостаточна для содержательного моделирования систем;
- обычные сети Петри не отражают требуемые временные характеристики моделируемой системы;
- фишка сети Петри не представляет собой никакой информации, кроме самого факта ее наличия, поэтому чрезвычайно сложно отразить преобразование информации при срабатывании переходов сети Петри;
- невозможность проведения логических преобразований и, как следствие, невозможность управления продвижением фишек по сети.

Недостатки сетей Петри не позволяют описывать сложные системы и в настоящее время используются для описания простейших операций. Также эти факторы явились причиной разработки подклассов и расширений сетей Петри, в которых вводятся определенные ограничения на структуру сети, что позволяет использовать более простые алгоритмы для ее анализа либо дополнительные элементы формальной системы, призванные увеличить ее описательную мощность.

Большого внимания заслуживают сети высокого уровня, такие как *раскрашенные сети Петри* (Color Petri Net), являющиеся модификацией сетей Петри и отличающиеся хорошо разработанным математическим аппаратом, широко применяемые для самых разнообразных практических целей. Основной причиной высокой эффективности этих формальных моделей является то, что они без потери возможностей формального анализа позволяют исследователю получить значительно более краткие и удобные описания, чем те, которые могут быть сделаны с помощью сетей низкого уровня. В сетях высокого уровня сложность моделей может быть разделена между структурой сети, надписями и описаниями. Это позволяет осуществлять описание значительно более сложных систем и анализировать процессы преобразования данных с помощью общепринятых математических выражений вместо сложного набора позиций, переходов и дуг. Раскрашенные сети Петри, в отличие от обычных сетей Петри, позволяют описывать структуру системы в виде иерархии диаграмм.

Но у данного аппарата моделирования также не устранен ряд недостатков, которые присущи сетям Петри. К таким недостаткам можно отнести:

- необходимость знания разработчиком специфического языка описания моделей [6];
- отсутствие использования принципов объектно-ориентированного подхода;

- низкую гибкость и трудоемкость описания систем в случае их декомпозиции до уровня некоторых элементарных операций.

Раскрашенные сети Петри до сих пор часто применяются для моделирования сетей.

3.2. Имитационное моделирование

Несмотря на большие достижения математического моделирования, многие реальные ситуации невозможно адекватно представить с помощью соответствующих математических моделей. В одних случаях этому мешает определенная «жесткость» математики как языка описания и представления событий и явлений. Кроме того, даже если есть возможность формализовать рассматриваемую жизненную ситуацию посредством построения математической модели, полученная на ее основе задача оптимизации может быть слишком сложной для современных алгоритмов решения задач этого класса.

Альтернативой математическому моделированию сложных систем может служить **имитационное моделирование (ИМ)**. Этот вид моделирования часто является наилучшим (если не единственным) способом исследования реальных систем.

Термин «*имитационное моделирование*» означает, что мы имеем дело с такими моделями, с помощью которых нельзя заранее вычислить или предсказать поведение системы, а для предсказания поведения системы необходим вычислительный эксперимент (имитация) на математической модели при заданных исходных данных [16].

Различие между математической и имитационной моделями заключается в том, что в последней вместо явного математического описания взаимоотношения между входными и выходными переменными реальная система разбивается на ряд достаточно малых (в функциональном отношении) элементов или модулей. Затем поведение исходной системы имитируется как поведение совокупности этих элементов, определенным образом связанных (путем установления соответствующих взаимосвязей между ними) в единое целое. Вычислительная реализация такой модели начинается с входного элемента, далее проходит по всем элементам, пока не будет достигнут выходной элемент модели.

Имитационные модели принято классифицировать по следующим наиболее распространенным признакам:

- по способу взаимодействия с пользователем;
- способу изменения модельного времени;
- цели эксперимента.

Классификация имитационных моделей схематично показана на рис. 3.2.

По способу взаимодействия с пользователем имитационные модели могут быть *автономными* и *интерактивными*. Автономные модели не требуют вмешательства исследователя после определения режима моделирования и задания исходных данных, взаимодействие пользователя с такими моделями сводится только к вводу исходной информации и управлению началом и окончанием работы моделей. Интерактивные модели предусматривают диалог с пользователем в том или ином режиме в соответствии со сценарием моделирования, позволяющие пользователю приостанавливать сеанс моделирования/изменять значения параметров модели, корректировать перечень регистрируемых данных и т.д.

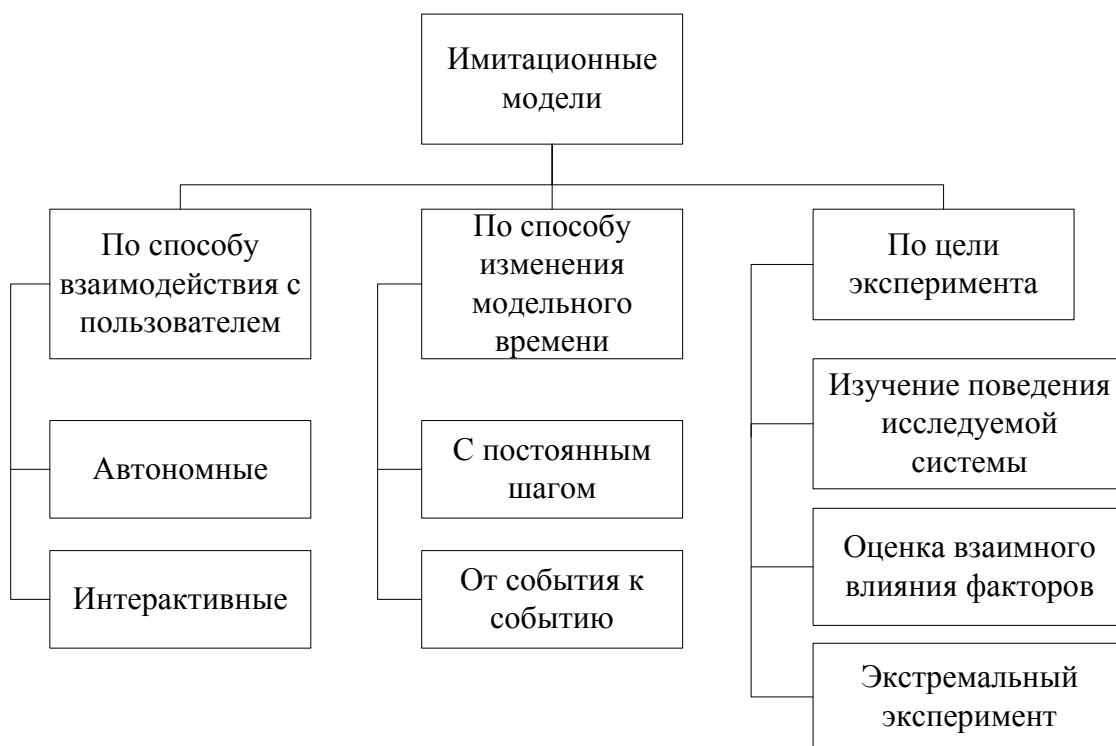


Рис. 3.2. Классификация имитационных моделей

Как было сказано ранее (п. 1.3 гл. 1) существует два механизма изменения модельного времени: *продвижение времени от события к событию* и *продвижение времени с постоянным шагом*.

Процесс построения имитационных моделей представляет собой последовательное выполнение этапов моделирования. Этапы имитационного моделирования, также как и любого другого вида моделирования, обобщены и представлены в п. 1.3. гл. 1 этого учебного пособия.

Названные выше этапы имитационного исследования редко выполняются в строго заданной последовательности, начиная с определения проблемы и заканчивая документированием. В ходе имитационного исследования могут быть сбои в прогонах модели, ошибочные допущения, от которых впоследствии приходится отказываться, т.е. на каждом этапе возможно возвращение назад, к предыдущим этапам. Именно такой итеративный процесс даёт возможность получить модель, которая позволяет принимать решения.

Вычислительные аспекты имитационных моделей обычно сравнительно несложные, но, как правило, очень трудоемкие. Поэтому реализация таких моделей подразумевает использование вычислительной техники.

Имитационные модели значительно гибче в представлении реальных систем, чем их математические «конкуренты». Причина такой гибкости заключается в том, что при имитационном моделировании исходная система рассматривается на элементарном уровне, в то время как математические модели стремятся описать системы на глобальном, как можно более общем уровне.

Но за гибкость имитационных моделей приходится платить высокими требованиями к потребляемым временным и вычислительным ресурсам. Поэтому реализация некоторых имитационных моделей даже на современных быстрых и высокопроизводительных компьютерах может быть очень медленной.

Таким образом, имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения реальных систем. Методы имитационного моделирования позволяют собрать необходимую информацию о поведении системы путем создания ее компьютеризированной модели. Эта информация используется затем для проектирования системы.

Основное достоинство ИМ:

- возможность описания поведения компонент (элементов) процессов или систем на высоком уровне детализации;
- отсутствие ограничений между параметрами ИМ и состоянием внешней среды;
- возможность исследования динамики взаимодействия компонент во времени и пространстве параметров системы [6].

Эти достоинства обеспечивают имитационному методу широкое распространение.

Рекомендуется использовать *имитационное моделирование* в следующих случаях:

1. Если не существует законченной постановки задачи исследования и идет процесс познания объекта моделирования. *Имитационная модель* служит средством изучения явления.

2. Если аналитические методы имеются, но математические процессы сложны и трудоемки, *имитационное моделирование* дает более простой способ решения задачи.

3. Когда, кроме оценки влияния параметров (переменных) процесса или системы, желательно осуществить наблюдение за поведением компонент (элементов) процесса или системы в течение определенного периода.

4. Когда *имитационное моделирование* оказывается единственным способом исследования сложной системы из-за невозможности наблюдения явлений в реальных условиях (реакции термоядерного синтеза, исследования космического пространства).

5. Когда необходимо контролировать протекание процессов или поведение систем путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации.

6. При подготовке специалистов для новой техники, когда на *имитационных моделях* обеспечивается возможность приобретения навыков в эксплуатации новой техники.

7. Когда изучаются новые ситуации в поведении реальных процессов и систем. В этом случае имитация служит для проверки новых стратегий и правил проведения натурных экспериментов.

8. Когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемых процессах и системах, и модель используется для предсказания узких мест в их функционировании [6].

Однако ИМ наряду с достоинствами имеет и недостатки:

- разработка хорошей ИМ часто обходится дороже создания аналитической модели и требует больших временных затрат;
- может оказаться, что ИМ неточна (что бывает часто), и исследователь не в состоянии измерить степень этой неточности;
- зачастую исследователи обращаются к ИМ, не представляя тех трудностей, с которыми они встретятся и совершают при этом ряд ошибок методологического характера [16].

И тем не менее, ИМ является одним из наиболее широко используемых методов при решении задач синтеза и анализа сложных процессов и систем.

Применительно к вычислительным сетям их имитационные модели воспроизводят: процессы генерации сообщений приложениями; разбиение сообщений на пакеты и кадры определенных протоколов; задержки, связанные с обработкой сообщений, пакетов и кадров внутри операци-

онной системы; процесс получения доступа компьютером к разделяемой сетевой среде; процесс обработки поступающих пакетов маршрутизатором и т.д. При имитационном моделировании сети не требуется приобретать дорогостоящее оборудование – его работы имитируются программами, достаточно точно воспроизводящими все основные особенности и параметры такого оборудования.

Преимуществом имитационных моделей является возможность подмены процесса смены событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени на ускоренный процесс смены событий в темпе работы программы. В результате за несколько минут можно воспроизвести работу сети в течение нескольких дней, что дает возможность оценить работу сети в широком диапазоне варьируемых параметров.

Результатом работы имитационной модели являются собранные в ходе наблюдения за протекающими событиями статистические данные о наиболее важных характеристиках сети: временах реакции, коэффициентах использования каналов и узлов, вероятности потерь пакетов и т.п.

3.3. Выводы по главе

В данной главе рассмотрены основные понятия и виды моделирования вычислительных сетей, а именно два его основных типа: аналитическое и имитационное. Описаны достоинства и недостатки каждого типа моделирования, преимущества использования каждого типа моделирования для решения определенных задач.

Имитационное моделирование является более гибким в применении и предоставляет больше возможностей для моделирования вычислительных сетей, поэтому в дальнейшем будем рассматривать построение моделей в рамках имитационного моделирования.

В следующей главе рассмотрим наиболее распространенные программные средства моделирования вычислительных сетей.

3.4. Вопросы по главе*

1. Для чего необходимо моделирование сети?
2. Что такое аналитическое моделирование сети? Перечислите его достоинства и недостатки.
3. Что такое имитационное моделирование сети? Перечислите его достоинства и недостатки.
4. К какому типу моделирования сетей относятся СМО и сети Петри?

* Данные вопросы могут быть использованы для учебной дискуссии.

5. Перечислите основные структурные элементы СМО. Приведите примеры реальных устройств/компонент сети для каждого структурного элемента СМО.
6. Что в теории СМО означает запись $M/M/2$?
7. Что в СМО определяется по теореме Литла?
8. Какие типы СМО наиболее часто используются для моделирования ЛВС? Приведите примеры.
9. Что такое сеть Петри? Какие типы сетей Петри вам известны?
10. Перечислите основные элементы сети Петри и приведите примеры реальных устройств сети, соответствующим элементам сети Петри.