

ГЛАВА 4

Задача статистического моделирования и прогнозирования процессов в системах передачи

В настоящей главе показана значимость статистического имитационного моделирования в задаче модернизации эксплуатирующихся и разработки проектируемых систем передач. Развита методика к статистическому моделированию цифровых сигналов и процессов их передачи по сети с учётом влияния возмущающих факторов. Обобщены известные концепции маршрутизации и предложена оригинальная методика оценки помехоустойчивости и надёжности телекоммуникационных систем. Показана возможность динамической маршрутизации сигналов служебных подсистем с целью повышения надёжности сети и намечены пути доработки системы сетевого управления для реализации представленной концепции.

4.1. Метод статистического представления случайных параметров в задаче моделирования процессов в системах передачи

Формализация процесса работы ВОСП, включающая в себя как выработку вектора количественных критериев работоспособности, так и построение физических и математических моделей процессов тех или иных преобразований сигналов, несёт практический интерес в виде создаваемых методик согласования телекоммуникационных устройств и настройки сети под выполнение поставленных задач. Только окончательный результат, представленный, например, в виде оригинальной методики настройки оборудования под рассматриваемый конкретный случай является критерием состоятельности моделирования («случай» здесь – это совокупность объекта, цели моделирования и положения объекта в телекоммуникационной системе). Такие методики должны содержать ответы на вопросы о том, можно или нельзя на данном сегменте установить то или иное сетевое приложение, какое изменение конструктивных параметров сети для этого потребуется, придётся ли производить дополнительный учёт каких-либо факторов, минимальную аппаратную модернизацию, каковы при этом будут показатели работоспособности. Необходимы ли мероприятия в процессе эксплуатации, поддерживающие работоспособность на требуемом уровне, что связано с наличием возможных причин деградации качества. Если же процесс моделирования не удастся довести до подобных рекомендаций, то очевидно, что его практическая значимость будет существенно снижена.

Здесь и далее повествование ведётся по отношению к волоконно-оптическим системам передачи, хотя, безусловно, все развитые подходы и полученные выводы окажутся справедливыми в общем случае и для радиосистем, проводных систем с использованием медных соединений, и т.д. Выбор обобщённой ВОСП объясняется, с одной стороны, богатым опытом авторов в области эксплуатации волоконно-оптических сетей, с другой стороны – их перспективностью, а следовательно, и значительной актуальностью полученных результатов для таких систем.

Итак, возвращаясь к задачам моделирования, отметим, что, с одной стороны, адекватные модели систем передач, отражающие стохастический характер поведения моделируемого объекта, являются достаточно сложными, с другой стороны, для описания процесса передачи сигналов с требуемой точностью необходимо значительное количество входных параметров, следовательно, произвести моделирование в аналитическом виде удаётся либо в отдельных частных случаях, либо не удаётся вовсе. Наличие трудно формализуемых факторов и ограничений, приближённость ряда исходных данных и многокритериальный характер общей задачи анализа и проектирования (имеющей место также и в случае модернизации уже имеющейся сети) вызывает необходимость использования интерактивного (диалогового) режима проектирования. Такой режим позволяет объединить в едином процессе современные математические методы и алгоритмы оптимизации с опытом и интуицией проектировщика. Последнее обеспечивает возможность контроля за ходом проектирования и активного вмешательства в процесс поиска оптимальных решений. С этой точки зрения компьютерное моделирование является не столько фактором упрощения, сколько неотъемлемой частью процесса анализа телекоммуникационной системы. В настоящей главе представлены основные аспекты компьютерного статистического моделирования, а также постановка задачи моделирования с целью непосредственного нахождения значений показателей работоспособности ВОСП исходя из имеющихся конструктивных параметров (прямая задача) и определения вектора подстройки конструктивных параметров для обеспечения требуемых показателей работоспособности (обратная задача).

Целью представленных исследований является выработка пути получения оптимальных решений по резервированию, модернизации сетей с учётом значительной разнородности эксплуатируемого оборудования и сред передачи (последней мили), требований к компонентам системы передачи в эксплуатации. Хотя эти аспекты в немалой степени определяют работоспособность ВОСП, им уделено недостаточное внимание в нормативных документах. Известные методики расчёта надёжности сетей, сбора и анализа данных по фактической надёжности справедливы не для полного аспекта телекоммуникационных задач [86]. Вместе с тем как системы передачи данных, так и сети служебных подсистем присоединяемых операторов связи должны удовлетворять требованиям международных и европейских

стандартов к хронизирующему сигналу не только по показателям качества, но и по показателям надёжности [85 – 87].

Вследствие этого значимость компьютерного моделирования в телекоммуникационных задачах возрастает как из-за значительной сложности последних, так и необходимости делать не только текущий анализ, но и прогнозировать состояния ВОСП. Проблему прогнозирования следует рассматривать не только в узком кругу задач, посвящённых, например, оценке пропускной способности и сетевой нагрузки, ожидаемой в ближайшем будущем. Известно [2, 68, 109 и др.], что для решения такого класса задач широко развиты математические методы теории массового обслуживания и в настоящее время посвящено значительное количество литературы (список монографий, посвящённых теоретическим основам проектирования компьютерных сетей и аспектам теории массового обслуживания приводится по адресу: <http://www2.uniwindor.ca/hlynka/qbook.html>; в том числе развиты универсальные и специализированные вычислительные средства моделирования сетей массового обслуживания: GPS, SES, см. www.ses.com; ARENA, см. www.sm.com; OPNET, см. www.mil3.com; BONES, см. www.alt.com; COMNET, см. www.cacias1.com и др.). Под прогнозированием в ВОСП предлагается понимать оценку развития во времени всех показателей работоспособности и параметров качества (QoS) с задаваемой в задаче вероятностью. Применительно к системам телекоммуникаций к настоящему моменту подобная постановка задачи отсутствует. Закреплённые же в нормативных документах понятия помехоустойчивости и особенно надёжности систем передач носят весьма поверхностный характер, что не позволяет наблюдать за системой во времени и оптимальным образом осуществлять какие-либо мероприятия, направленные на поддержание надёжности отдельных составляющих, выявлять точки (области) деградации качества и т.д.

Реализация предложенной концепции оценки работоспособности систем передач на уровне оператора невозможна без применения методов компьютерного моделирования, целью которых является обеспечение возможности воспроизведения процесса работы исследуемого объекта с любой точностью в пределах используемых физических и математических моделей и получение интересующих статистических характеристик. По сравнению с непосредственным (макетным и измерительным) экспериментом моделирование на ЭВМ обладает рядом преимуществ: его можно применить к новым, ещё не введённым в эксплуатацию сегментам, работу исследуемой сети можно проверить в самых разнообразных условиях, которые порой трудно или невозможно воссоздать на системах связи, а сам процесс исследования можно провести в ускоренном темпе за счёт как изменения масштаба времени, так и введения специализированных методик ускоренных виртуальных испытаний [106] и подобных.

Так как данная книга ориентирована на специалистов в области приложений теоретических основ моделирования телекоммуникационных систем

тем и эксплуатации последних, кратко приведём основные аспекты компьютерного моделирования, необходимые для дальнейшего анализа. Для имитации случайных величин и событий используют библиотечные подпрограммы (датчики) генерирования псевдослучайных чисел. *Псевдослучайная последовательность чисел – это такая неслучайная последовательность, в которой частота появления любых чисел и их комбинаций совпадает в пределе с частотой появления этих чисел и их комбинаций для имитируемой случайной величины или процесса.*

Большинство датчиков вырабатывают псевдослучайные числа x_i ($i = 1, 2, 3 \dots$), равномерно распределенные на отрезке $[0, 1]$, для которых вероятность появления некоторого числа x_i , меньшего чем y , равна y :

$$P(x_i < y) = y. \quad (4.1)$$

Псевдослучайная последовательность чисел x_i характеризуется длиной отрезка аperiodичности L и длиной периода M . Первые L чисел x_0, x_1, \dots, x_{L-1} будут все различными, а число x_L ввиду конечности числа знаков в ячейке непременно совпадёт с одним из ранее выданных чисел. Кроме того, длина отрезка аperiodичности зависит от x_0 . С этой точки зрения необходимо, чтобы количество используемых псевдослучайных чисел не превосходило L , иначе возможно получение неверных результатов при моделировании. Для увеличения отрезка аperiodичности используют несколько чередующихся рекуррентных соотношений [68] или способов получения псевдослучайных чисел.

Для проведения дальнейших расчетов каждая такая последовательность проверяется на «случайность» по ряду критериев. Наиболее распространёнными являются: проверка частот (или критерий Пирсона), проверка пар, разрядов, комбинаций и серий [68]. Такие проверки обеспечивают заданное оператором качество получаемой в итоге псевдослучайной последовательности – путём выбора метода получения, используемого датчика и т.д. Одним из наиболее жёстких критериев случайности является критерий Пирсона, который, во-первых, непосредственно является следствием определения полученных статистически псевдослучайных чисел, во-вторых, во многих технических задачах его применение достаточно для обеспечения качества моделирования. Суть критерия Пирсона представлена далее.

Интервал $[0, 1]$ разбивается на $N^{(z)}$ равных промежутков и фиксируется количество α псевдослучайных чисел ($\alpha = 1 \dots N^{(z)}$ $N^{(z)} = 10 \dots 20$), попадающих в соответствующий промежуток. Полученные эмпирические частоты $\beta_\alpha = \alpha/\hat{\alpha}$ ($\hat{\alpha}$ – общее количество чисел) сравниваются с теоретическими вероятностями $1/N^{(z)}$, при этом вырабатывается критерий χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{\alpha=1}^{\hat{\alpha}} \left\{ \beta_\alpha - \frac{1}{N^{(z)}} \right\}^2. \quad (4.2)$$

Критерий Пирсона заключается в том, чтобы величина λ^2 была не больше задаваемого в задаче значения $\xi_{\text{Пир}} > 0$ - допустимого отличия эмпирических частот появления чисел от теоретических вероятностей, т.е.

$$\lambda^2 \leq \xi_{\text{Пир}}. \quad (4.3)$$

При проведении технических расчётов величину $\xi_{\text{Пир}}$ следует выбирать не более 0.001...0.005 на отрезке, меньшем отрезка аperiodичности [102]. Проверить выполнение последнего требования можно следующим образом: после того как программа получила определенное количество псевдослучайных чисел N_1 , необходимо сравнить их между собой. Если среди них есть одинаковые, то N_1 уменьшается на некоторую величину (например, на 5%) и процесс получения чисел с последующим их сравнением повторяется до тех пор, пока все псевдослучайные числа не окажутся разными.

Из равномерно распределённых в интервале $[0, 1]$ чисел x_i преобразованием подобия несложно найти числа z_i , равномерно распределённые в произвольном интервале $[a, b]$. Согласно рис. 4.1, закон преобразования выглядит следующим образом:

$$z_i = (b - a) \cdot x_i + a. \quad (4.4)$$

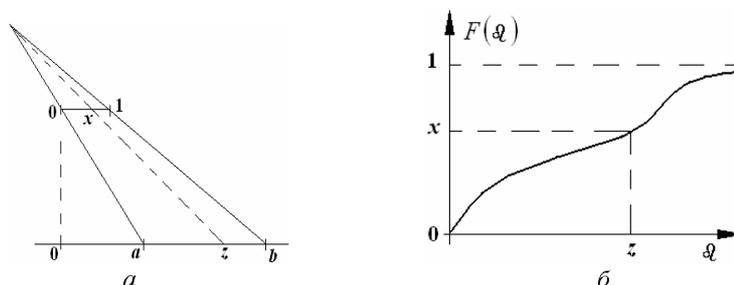


Рис. 4.1. Иллюстрация к получению закона преобразования псевдослучайных чисел распределённых равномерно (а) на отрезке $[a, b]$; по произвольному закону (б) с интегральной функцией вероятности $F(z)$

Для получения чисел z_i , подчинённых произвольному закону распределения с интегральной функцией вероятности $F(z)$, необходимо равномерно распределённые в интервале $[0, 1]$ числа x_i подставить в функцию, обратную к $F(z)$, (рис. 4.1, б):

$$z_i = F^{-1}(x_i). \quad (4.5)$$

При этом числа z_i будут подчиняться распределению $F(\mathcal{Q})$:

$$P(z_i < \mathcal{Q}) = P[F^{-1}(\mathcal{Q}) < \mathcal{Q}] = P[x_i < F(\mathcal{Q})] = F(\mathcal{Q}). \quad (4.6)$$

Для пояснения приведём пример получения чисел z_i , подчинённых экспоненциальному распределению: $F(\mathcal{Q}) = 1 - e^{-\hat{\lambda}\mathcal{Q}}$, в котором $\hat{\lambda}$ - некоторая постоянная величина. Согласно (4.5), $x = 1 - e^{-\hat{\lambda}z}$, тогда $z = -\ln(1-x)/\hat{\lambda}$ или, заменяя x на величину x_i , получаем преобразующее соотношение

$$z_i = -\ln(x_i)/\hat{\lambda} \text{ для всех } i. \quad (4.7)$$

Следовательно, применение метода имитационного статистического моделирования (МИСМ) открывает возможность имитировать на ЭВМ достаточно широкий класс случайных процессов, а значит – проводить моделирование разнообразных телекоммуникационных задач с получением практически значимых результатов.

4.2. Задачи проектирования, анализа и настройки системы передачи с применением статистического моделирования

Как упоминалось выше, цель моделирования состоит в нахождении оптимального пути модернизации сети (либо проектировании вновь вводимого в эксплуатацию сегмента). Первым этапом в такой задаче является выбор технических средств и системы протоколов (включая способы сигнализации и коммутации). Второй этап требует решения совокупности взаимосвязанных задач, к которым относятся: оптимизация топологической структуры и пропускной способности каналов связи, выбор маршрутов, методов управления потоками, стратегии буферизации при перегрузках и т.д. Формально задачу проектирования можно свести к отысканию минимума функционала некоторой приведённой стоимости:

$$C(\vec{\Omega}, \vec{Y}, \vec{U}) \rightarrow \min \quad (4.8)$$

при наличии ограничений на вероятностно-временные и структурные характеристики сети:

$$V_i(\vec{\Omega}, \vec{Y}, \vec{U}) \leq V_{i0}, i = 1 \dots N \quad (4.9)$$

и требовании принадлежности множества вариантов аппаратно-архитектурных решений сети $Q(\vec{\Omega}, \vec{Y}, \vec{U})$, удовлетворяющих ограничениям (4.9), к области технически реализуемых решений:

$$Q(\vec{\Omega}, \vec{Y}, \vec{U}) \in Q_0. \quad (4.10)$$

Здесь $\vec{\Omega}$ - вектор совокупности параметров технических средств, включая их параметры надёжности, помехоустойчивости (обеспечивающие достоверность передачи информации, в том числе физических линий связи), производительность узлов коммутации и каналообразующей аппаратуры; \vec{Y} - вектор параметров логической структуры сети (определяемый типом сигнализации, системой уплотнения каналов, способом организации набора виртуальных топологий на базе заданной физической архитектуры, [84]); \vec{U} - вектор параметров передаваемых сигналов, отражающий интенсивности потоков сообщений между каждой парой узлов коммутации, способы передачи информации (коммутация каналов, пакетов, сообщений, [2]), параметры сетевой нагрузки, приоритетность сообщений, распределения длин пакетов и т.д. Очевидно, что средством решения представленной задачи является создание комплекса математических и физических моделей и вычислительных средств проектирования, причём высокое качество проектирования может быть достигнуто только тогда, когда отдельные методы и модели объединены на основе системного подхода в единую систему проектирования. Однако практическая невозможность постановки и решения в рамках единой задачи всего комплекса проблем проектирования приводит к необходимости использования процедуры, основанной на декомпозиции. Так, декомпозиция возможна как на структурном уровне, так и на уровне решения отдельных задач проектирования, что позволяет перейти от задачи большой размерности к последовательности задач меньшей размерности.

Декомпозиция на структурном уровне означает, что проектирование всей сети (либо поиск пути оптимальной её модернизации) сводится к независимому проектированию ряда подсетей (сегментов) при условии совпадения или близости оптимальных решений для сети и соответствующих решений для подсетей. Декомпозиция на уровне решения отдельных задач означает создание иерархии взаимосвязанных моделей, анализ которых позволяет получить решение общей задачи. Такое разделение сложной аналитической технической проблемы позволяет находить как точное решение для сети небольшой размерности (например, впервые вводимую в эксплуатацию), так и для сетей большой размерности (получаемых вследствие развития и модернизации).

Так, с точки зрения разделения общей задачи проектирования, анализа и настройки телекоммуникационной системы предложено производить не-

зависимо моделирование статистических цифровых сигналов с учётом случайного характера следования логических единиц и нулей (на основе применения МИСМ, см. след. подраздел), процесса их передачи по сети и процесса преобразования на сетевых узлах⁶. Моделирование процесса передачи сигналов в сети представляет весьма сложную задачу, так как связано с вычислением характеристик задачи массового обслуживания (значений сетевой нагрузки, типов очередей), формализацией алгоритмов маршрутизации, особенностями физической и логической топологии, надёжности линейных сооружений (в том числе способов резервирования) и т.д. В нижеследующих подразделах представлены некоторые аспекты и ряд подходов к решению обозначенной подзадачи. В отношении процесса преобразования сигналов на сетевых узлах при решении широкого круга телекоммуникационных задач можно считать, что работоспособность аппаратных средств принимает скачкообразный характер (изменения значений вектора конструктивных параметров). Компоненты такого вектора соответствуют либо изначальному работоспособному состоянию на протяжении наработки на отказ, либо равны нулю в состоянии отказа⁷.

Так, общая задача при проведении моделирования с целью проектирования или модернизации сети может состоять либо в непосредственном нахождении значений показателей работоспособности ВОСП исходя из имеющихся конструктивных параметров аппаратных средств (прямая задача), либо определении вектора подстройки этих конструктивных параметров для обеспечения требуемых показателей работоспособности (обратная задача).

Прямая задача или *задача анализа работоспособности* ВОСП посвящена определению значений таких QoS-параметров, как вероятность ошибки, количество секунд с ошибками, количество сильно поражённых секунд [19, 21, 90, 94], вероятность безотказной работы, длительность наработки на отказ, коэффициент готовности и др. на основе использования физических и математических моделей процессов передачи и преобразования сигналов исходя из следующих наперёд заданных параметров:

- конструктивных параметров системы передачи, под которыми следует понимать уровень мощности логической единицы в линейном тракте (вообще говоря – маску сигнала), тип линейного кодирования, алгоритмы маршрутизации, резервирования, набор параметров, характеризующих приёмник в зависимости от его типа (см. раздел 3.3, [101]), архитектуру сегмен-

⁶ В большинстве случаев можно считать допустимым предположение об абсолютной (идеальной) работоспособности сетевых устройств. Иначе, в случае значимости влияния искажающих факторов, что имеет место в специализированных сетях (промышленных предприятий и т.д.), реальная работоспособность аппаратуры должна быть описана на основе векторных матриц [107, 108].

⁷ Здесь предполагается, что входной сигнал умножается на значение передаточной функции устройства.

та с учётом физических особенностей линейного тракта, длин сегментов, типа волокна на них, и т.д.; и

- параметров искажения, являющихся результатом действия всевозможных возмущающих факторов: мультипликативных и аддитивных помех, возможных ошибок в преобразовании сигналов, связанных с реальной работоспособностью аппаратуры, искажений алгоритмического характера, заложенных непосредственно в процесс работы сети в виде неудачных конструктивно-топологических решений и т.д.

Очевидно, что, задав реальную сеть в виде некоторого объекта, рис. 4.2, и его передаточную функцию преобразования, можно определить параметры выходных сигналов, если известны параметры входных сигналов.

Иными словами, если мы произвели моделирование действия возмущающих факторов и процесса преобразования сигналов, подаваемых на вход телекоммуникационной системы, то можно находить те или иные характеристики выходных сигналов для различных входных. Это позволяет проводить исследования о возможности установления на данной конкретной сети какого-либо приложения, проведении модернизации, состоящей, например во введении в эксплуатацию оборудования, рассчитанного на увеличение битовой скорости, и т.д. Задавая каждый раз одним из таких параметрических векторов, и, возможно, изменяя некоторые параметры входных сигналов, в результате вычислений оператор будет получать значения показателей работоспособности сети по отношению к рассматриваемому случаю. Сравнивая полученные значения с регламентируемыми НТД, оператор будет определять возможность решения той или иной телекоммуникационной задачи с использованием этой конкретной телекоммуникационной системы.

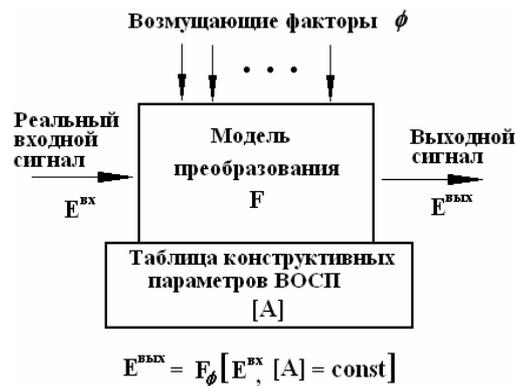


Рис. 4.2. Иллюстрация постановки задачи анализа ВОСП

Безусловно, в представленной постановке моделирование ВОСП несёт определённый технический смысл за исключением того, что именно решением прямой задачи можно установить адекватность разработанных аналитических моделей процессов преобразования сигналов в сети, адекватность моделирования искажающих факторов и их влияние на процесс приёма-передачи и т.д. Здесь предполагается, что результат, полученный вычислительным путём, может быть сравнен с результатами реальных измерений и данными из эксплуатации. Следовательно, можно сказать, что прямая задача несёт существенный аналитический смысл и может быть использована для проверки адекватности и корректности всех применяемых в процессе вычисления моделей на примере какого-либо сегмента с известными характеристиками.

Вернёмся к вопросу модернизации и эксплуатации систем передач. Оператора интересует ответ типа не «можно или нельзя» решить ту или иную телекоммуникационную задачу, а что именно надо сделать с минимальными затратами финансовых и рабочих ресурсов, для того, чтобы решить поставленную телекоммуникационную задачу. Здесь обозначается *постановка обратной задачи*: если заданы характеристики входных сигналов, модель влияющих факторов и искажений, которые не поддаются какому-либо управлению и изменению, модель процесса преобразования сигналов в сети, физическая архитектура и допустимый набор виртуальных топологических схем, то каковы должны быть конструктивные параметры последней для того, чтобы характеристики получаемых выходных сигналов оставались в установленных НТД пределах, рис. 4.3. В результате решения такой задачи оператор получает рекомендации по изменению конструктивных параметров своей телекоммуникационной системы, которая обеспечит решение поставленной телекоммуникационной задачи с требуемым качеством и надёжностью. Следовательно, можно говорить о применении физического, математического и компьютерного моделирования для настройки сети.

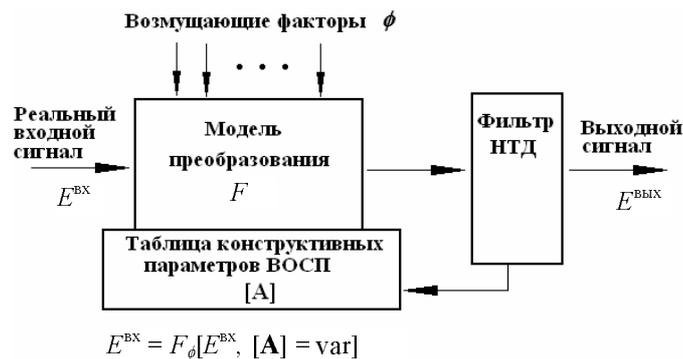


Рис. 4.3. Иллюстрация задачи настройки ВОСП

Очевидно, что вектор конструктивных параметров, искажающих факторов, характеристик входных и выходных сигналов, функций преобразования, контролируемых показателей работоспособности определяется для каждого конкретно рассматриваемого случая и представляет оригинальную часть методики модернизации и настройки. Безусловно, именно такой имитационный компьютерный полигон позволит автоматизировать процесс отладки сети и несёт законченную практическую ценность. Непосредственная разработка последнего требует отдельного внимания и представляет значительную научную новизну, а известные в настоящее время базовые программные средства с телекоммуникационной спецификой (пакеты BeemPROP, LinkSim и другие, [68]) предоставляют разработчикам и сетевым проектировщикам лишь круг начальных возможностей в области моделирования.

Не останавливаясь на аспектах теории управления, элементы которой вырисовываются в постановке обратной задачи по настройке ВОСП, рис. 4.3, связанные с выявлением области оптимального регулирования [77 - 79, 110 и др.], устойчивости и т.д., перейдём к описанию подхода к статистическому моделированию цифровых сигналов и процессов передачи сигналов в сети, что имеет прямое отношение к тематике главы. Рассмотрение аспектов теории управления, во-первых, выходит за рамки настоящей монографии, во-вторых, данной теме посвящено значительное количество литературы, и в-третьих, априори предполагается лишь возможность незначительного изменения конструктивных параметров устройств, что не должно приводить к потере их работоспособности. В противном случае последнее будет отчётливо видно по результатам вычислений, хотя, конечно же, в ряде случаев применение положений теории регулирования окажется оправданным и необходимым.

4.2.1. Подход к статистическому моделированию цифровых сигналов

Известен способ [111] формализованного представления цифровых сигналов, учитывающий их цикловую структуру и специфику описываемой системы передачи – иерархию скоростей, способ сигнализации, что отражается на заголовках, служебных битах и т.д. Способ основан на представлении сигнала многомерной матрицей, по координатам которой отложены различные характеристики сигнала. Принципиальным отличием многомерных матриц в [111] от векторных матриц, представленных в [107, 108], является принципиальное отсутствие в известном способе *фактора времени*, и соответственно, *фактора случайности*, что является неотъемлемой стороной моделируемого объекта. Поставленная же задача предполагает, что моделирование процесса передачи сигналов по сети будет произведено на протяжении времени, и где все параметры являются *функциями времени*. Именно это позволяет *наблюдать* за процессом работы системы телеком-

муникаций с проведением соответствующих оценок. С этой точки зрения матричное представление цифрового сигнала [111] не позволяет проводить динамическое наблюдение за сетью, в которой имеют место возмущения.

Применительно к решаемой задаче идея, заложенная в [111], должна трактоваться как способ описания детерминированной составляющей в цифровом сигнале, зависящей от типа телекоммуникационной системы и характеризующей структуру сигнала. Хотя следует ещё раз подчеркнуть, что цифровой сигнал в поле данных, а именно – расположенная там последовательность единиц и нулей, а также большинство конкретных управляющих байтов (в том числе и в служебных сигналах), носит, вообще говоря, случайный характер. Это приводит к тому, что весь сигнал, т.е. вся последовательность единиц и нулей, рассматриваемых на произвольном временном интервале, должна моделироваться как случайный процесс с некоторой оговоркой.

Суть последней состоит в том, что любая передаваемая информация, что бы она не содержала: речевой сигнал, видеоизображение, данные и т.д., несёт в себе избыточность [82], а значит, что процесс, моделирующий последовательность поступления единиц и нулей, не может быть чисто случайным. Этот процесс обязательно содержит последствие [112, 113 и др.]. Иными словами, вероятность случайного события, состоящего в том, что в некоторый момент времени t_0 в решающую схему приёмника поступила логическая единица, зависит от случившегося ранее события: на один или несколько тактовых интервалов раньше t_0 . Такие системы именуется системами с последствием [112 - 116], см. также Приложение **Г**.

Таким образом, для проведения компьютерного имитационного моделирования процесса следования логических единиц или, что то же самое, – поступления их в решающую схему приёмника, расположенного на некотором сетевом узле, предлагается факт *поступления логической единицы считать случайным событием*. Очевидно, что длительность временного интервала между этими моментами представляет собой также случайную величину. Под перечисленным временным интервалом следует понимать количество тактовых интервалов $N_{\Delta t}$, заполненных нулями, умноженное на длительность тактового интервала Δt .

Вполне справедлива аналогичная постановка относительно нулей, представляющих собой случайные события и следующих через случайные промежутки времени. Тем не менее сигнал можно считать однозначно определённым, если заданы единицы, так как все остальные символы алфавита, передаваемого в ВОСП, являются нулями.

Следовательно, для обеспечения состоятельности имитационного статистического моделирования ВОСП предложено цифровой сигнал представить в виде последовательности поступления единиц (для кода NRZ – импульсов) в схему приёмника, *интервал времени между которыми является случайной величиной*. Для отображения реальных возмущающих факторов дополнительно предложено форму импульсов – амплитуду и положение

фронтов по отношению к «маске» приёмника, а также и длительность поступающего на приёмник тактового интервала представлять случайными величинами.

Тогда для численного моделирования информационного входного сигнала (передаваемого, например, по потоку E1) необходимо генерировать четыре псевдослучайные последовательности:

- $[z^{(I)}]$ предназначена для формирования случайного потока единиц. Случайной величиной является промежуток времени (количество тактовых интервалов) между импульсами логических единиц.

- На базе $[z^{(II)}]$ моделируется значение девиации временного интервала. Случайным фактором являлось значение длительности реального тактового интервала.

- На базе последовательности $[z^{(III)}]$ моделируется форма реального импульса с учётом джиттера. Случайным фактором является амплитуда джиттера.

- На базе последовательности $[z^{(IV)}]$ моделируется форма реального импульса с учётом уровня шума в канале. Случайным фактором является амплитуда амплитуда шума.

Если количество чисел в последовательностях $[z^{(I)}]$ и $[z^{(II)}]$ равно количеству тактовых интервалов в течение времени наблюдения, т.е. каждое такое число определяет случайные параметры одного такта, то последовательности $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$ в зависимости от методики моделирования формы импульса могут быть либо целиком предназначены для получения этой случайной формы на протяжении одного такта, либо определять все импульсы на протяжении интервала наблюдения. В первом случае, последовательности $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$ необходимо каждый раз генерировались заново для каждого нового тактового интервала. Если необходимо имитировать сигнал служебной сетевой синхронизации, передаваемый, например, по потоку E1, то используются последовательности $[z^{(II)}]$, $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$. Генерировать $[z^{(I)}]$ не имеет смысла ввиду вполне определённого закона следования импульсов в таком сигнале: ... 0, 1, 0, 1.

На рис. 4.4 представлен результат имитационного моделирования, проведённого в [117] с использованием четырёх перечисленных псевдослучайных последовательностей.

Моделирование проведено в предположении, что случайные значения длительности промежутка времени между импульсами логических единиц подчиняются распределению Эрланга второго порядка [68]. Выбор последнего объясняется его принадлежностью к потокам Пальма [68], которые обладают ограниченным последствием, что правдоподобно отражает реальный информационный сигнал со скремблером [20].

Далее кратко представлен пример методики статистического моделирования цифровых информационных сигналов, предназначенных для имитации процесса работы ВОСП.



Рис. 4.4. Статистическая модель цифрового сигнала с учетом шума, джиттера и ДВИ в канале передачи Е1. Ровными линиями представлен идеальный сигнал в коде СМ1 (с инверсией комбинаций) [20]

Пример

Пусть плотность вероятности наступления очередного события подчинена распределению Эрланга II порядка [68]:

$$p_{\mathcal{E}}(t) = I_{\mathcal{E}}^2 \cdot t \cdot \exp(-I_{\mathcal{E}} \cdot t), \quad (4.11)$$

где $I_{\mathcal{E}}$ — интенсивность потока, t — время. $I_{\mathcal{E}}(t)$ есть предел отношения вероятности поступления не менее одного импульса (обозначим событие поступления импульса из оптоволоконного тракта на фотоприёмник за \mathcal{H}) в промежутке $[t, t + \delta \hat{t}]$ к величине этого промежутка $\delta \hat{t}$ при $\delta \hat{t} \rightarrow 0$, [68], или:

$$I_{\mathcal{E}}(t) = \lim_{\delta \hat{t} \rightarrow 0} \frac{P_{\mathcal{H} \geq 1}(t, t + \delta \hat{t})}{\delta \hat{t}}. \quad (4.12)$$

Для стационарного потока справедливо: $P_{\mathcal{H} \geq 1} = I_{\mathcal{E}} \cdot \delta \hat{t} + o(\delta \hat{t})$. Здесь $o(\delta \hat{t})$ — бесконечно малая величина по сравнению с $I_{\mathcal{E}} \delta \hat{t}$. Найдём $I_{\mathcal{E}}$ по отношению к потоку Е1. Реальный сигнал с учётом вводимого скремблера, избыточности при кодировании и т.д. имеет значение среднестатистической скважности $\chi \cong 3.1 \dots 3.2$ [20]. Скремблер вводят для обеспечения благоприятного режима работы фотоприёмника, идеальным считается случай $\chi = 2$ (реально недостижимый). Скважность характеризует количество импульсов логических единиц в определенном количестве тактовых интервалов. Отсюда найдём интенсивность потока:

$$P_{\mathcal{H} \geq 1} = I_{\mathcal{E}} \Delta t \chi, \quad \text{или} \quad I_{\mathcal{E}} = (\Delta t \chi)^{-1} \approx 1.3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}. \quad (4.13)$$

Полученное значение соответствует реально наблюдаемому сигналу данных по потоку Е1 (в рабочее время).

В рассматриваемом примере закон преобразования случайных чисел, аналогичный (4.6) и (4.7), для потока информационных единиц выглядит следующим образом:

$$z^{\text{сигн}} = F_{\text{Эпл}}^{-1} \left[I_{\text{Э}}^2 \cdot \int_0^t t \cdot e^{-I_{\text{Э}} \cdot t} \cdot dt \Big|_{t=z^{(1)}} \right]. \quad (4.14)$$

Аналогично в [117] с использованием последовательности $[z^{(II)}]$ моделировалось значение девиации временного интервала для цифровых плезиохронных потоков Е1:

$$z^{\text{ДВИ}} = F_{\text{ДВИ}}^{-1} \left[\int_0^t \mathfrak{S}_{\text{ДВИ}}(t) \cdot dt \Big|_{t=z^{(II)}} \right]. \quad (4.15)$$

В (4.15) $F_{\text{ДВИ}}^{-1}$ - функция, обратная к интегральному распределению случайной величины девиации временного интервала; $\mathfrak{S}_{\text{ДВИ}}(t)$ - плотность вероятности распределения случайной величины девиации временного интервала. Функция $\mathfrak{S}_{\text{ДВИ}}(t)$ в [117] была определена путём проведения измерений значения ДВИ на узлах связи моделируемого сегмента. Интегрирование (4.15) проводилось в численном виде. Случайная реальная длительность тактового интервала $\tau_{\text{пер}}$ принимала значение:

$$\tau_{\text{пер}} = z^{\text{ДВИ}} \cdot \Delta t. \quad (4.16)$$

Последовательность $[z^{(III)}]$ использовалась для получения функции джиттера $\tilde{\Phi}^{\text{Э1}}$ в соответствии с определённой стандартом [21] равномерно распределённой его плотностью вероятности. Джиттер в телекоммуникационных системах возникает под действием многих факторов – ошибок при перемещениях указателя АСГ, появлении некорректных сигнальных компонентов, различного рода нарушениях и т.д. Подробное изложение материала о фазовых дрожаниях цифрового сигнала, в том числе джиттере, и причинах их появления в сети представлено в разделе 2.2 и Приложениях Е и F. Здесь дополнительно добавим, что в результате действия джиттера возникает либо размытие фронтов импульсов, либо несоответствие реальной (возможно, чёткой) формы фронта тому положению, которое регламентировано «маской» приёмника. Амплитуда джиттера равна длительности этого размытия на протяжении тактового интервала, рис. 4.5, α , либо величине

несоответствия реальной границы фронта требуемому положению. Частота джиттера определяет скорость изменения значения его амплитуды со временем, рис. 4.5, б. Фазовое дрожание именуется джиттером, если его амплитуда меняется с частотой выше 10 Гц, в противном случае фазовое дрожание называется вандером (см. разд. 2).

Так, амплитуда джиттера, равная $t_{Дж}$, может быть получена по принципу «одно число $z^{(III)}$ на один такт»:

$$t_{Дж} = z^{Дж} = z^{(III)} \cdot 0.15 \cdot \Delta t. \quad (4.17)$$

В [117], предполагалось, что на протяжении времени $t_{Дж}$ фронты импульса претерпевают размытие, как показано на рис. 4.5, а, что, безусловно, было отражено в расчётах – при определении случайной амплитуды импульса на протяжении времени $t_{Дж}$ и соответствовало реально исследуемой телекоммуникационной задаче. В общем случае, как уже говорилось, джиттер может выглядеть как отставание (опережение) реального фронта по отношению к нормативному моменту времени его прихода, что является достаточно распространённым случаем. Тогда на протяжении времени $t_{Дж}$ методика определения реальной амплитуды импульса должна быть изменена. Кроме того, такая методика должна зависеть и от типа приёмного решающего устройства.

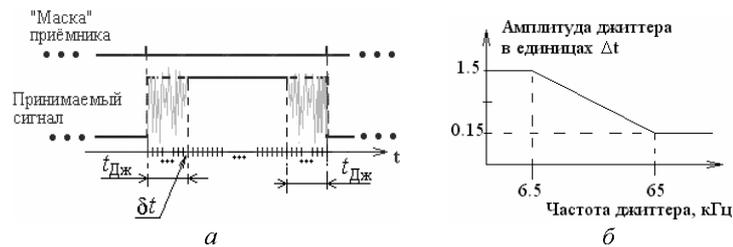


Рис. 4.5. Иллюстрация джиттера; а) феноменологическое представление джиттера в такте, области $t_{Дж}$ характеризуют амплитуду джиттера; б) допустимая маска джиттера по [21]

Так, приёмники, принимающие решение по значению энергии в такте, начинают отсчитывать энергию с нормативного момента времени (т.е. в соответствии с «маской»). По этой причине размытие фронтов импульса, пришедшего тем не менее во время, не приведёт к нарушению приёма. Это не остаётся справедливым для приёмников, принимающих решение по значению амплитуды, сохраняющемуся на протяжении времени $\tau_{ир}^{реш}$, так как интервал длительностью $t_{Дж}$ неопределённой амплитуды сокращает реальное время принятия решения. Если джиттер представляет собой нарушение

времени поступления чётко выраженного фронта в приёмник, то как для первого, так и второго типа приёмника вероятность ошибки возрастает: полученная энергия в такте оказывается меньше на величину порядка $t_{дж} \cdot A_{pear}$, а также сокращается время принятия решения. Следовательно, по той причине, что методика моделирования джиттера представляет весьма узкую задачу, имеющую специфическое решение в каждом отдельно рассматриваемом случае, здесь это рассматриваться не будет. Поясним только, что в [117] джиттер моделировался в виде размытых фронтов, поэтому на протяжении времени $t_{дж}$ к действию шума, искажающему форму идеального импульса, добавлялась ещё одна значащая составляющая, собственно и приводящая к такому заметному размытию, рис. 4.5, *a*.

Псевдослучайная последовательность $[z^{(IV)}]$ предназначена для формирования шумовой функции \tilde{H}^{E1} . Так как действующий в канале шум в подавляющем большинстве случаев соответствует Гауссову распределению [101, 106 и др.], то случайные числа z^{III} преобразуются из $[z^{(IV)}]$ с нормальным распределением в интервале $[-3\sigma^{E1}, 3\sigma^{E1}]$ вокруг математического ожидания $\langle \tilde{H}^{E1} \rangle$:

$$z^{III} = F_{шум}^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma^{E1}} \cdot \int_{-\infty}^{\mathfrak{m}} \exp \left(-\frac{(\mathfrak{m} - \langle \tilde{H}^{E1} \rangle)^2}{2(\sigma^{E1})^2} \right) \cdot d\mathfrak{m} \right]_{\mathfrak{m}=z^{(IV)}}, \quad (4.18)$$

где \mathfrak{m} - переменная интегрирования. В [117] было принято: $\langle \tilde{H}^{E1} \rangle \cong \cong 83 \dots 85$ мкВт, $\sigma^{E1} \cong 150$ мкВт, если уровень мощности логической единицы составляет около 1 мВт.

Моделирование шума в [117] в тактовом интервале с произвольным номером $\ell \in [1, \tilde{N}]$ производилось следующим образом. Реальная длительность такта, полученная с учётом $[z^{(II)}]$, разбивалась на достаточное число (равное количеству чисел в $[z^{(IV)}]$) интервалов длительностью δt , рис. 4.5, *a*. На каждом из участков δt вычислялась реальная амплитуда сигнала исходя из соответствующего этому участку числа $z^{(IV)}$ и передаваемого значения оптической мощности (0 или 1):

$$A_{pear}(\delta t) = A^{(1)} \cdot z^{III}(\delta t) \quad \text{или} \quad A_{pear}(\delta t) = A^{(0)} \cdot z^{III}(\delta t). \quad (4.19)$$

На рис. 4.4 представлена статистическая модель цифрового сигнала (реализация), полученная в [117] с использованием соотношений вида (4.13), (4.14), (4.15), (4.17) и (4.19). Данная модель имитирует поток E1, передаваемый в линейном коде СМІ, и отражает особенности искажённого сигнала, имеющего место в исследуемом сегменте системы телекоммуникаций.

Прежде чем перейти к описанию процессов в сети, не связанных напрямую с действием искажающих факторов, отметим следующее. В ряде случаев задача имитационного моделирования системы передачи не может быть решена корректно без учёта возможного ухудшения работоспособности аппаратных устройств. Хотя согласно известной теории многоканальных систем [118] аппаратура линейного тракта (а также и любые другие устройства, расположенные на узлах связи) предполагается не зависящей от каких-либо возмущений, тем не менее в реальной практике эксплуатации [7, 8], особенно на корпоративных сетях промышленных предприятий, имеют место случаи ухудшения её работоспособности (в том числе частичная потеря работоспособности, что не приводит к однозначному решению о ремонте или снятии с эксплуатации) с последующими ошибками в логических преобразованиях цифровых сигналов (неправильная сборка группового сигнала), искажению формы преобразуемых сигналов и прочее. Это говорит о том, что не только линейный канал (линейный тракт), но и устройства преобразования приводят к различным искажениям сигналов, следовательно, эти реальные устройства должны каким-либо образом моделироваться на вычислительном полигоне имитации процесса работы сети. Тем не менее в настоящей монографии мы подробно останавливаться на рассмотрении данного аспекта не будем по следующим причинам: во-первых, процессы медленного ухудшения работоспособности аппаратных устройств (и связанное с этим их заметное влияние на качество передачи информации) являются всё же редко встречающимся случаем, характерным, как упоминалось выше, для сетей промышленных предприятий. Во-вторых, данная задача представлена достаточно подробно и доступно в [107, 108, 119].

4.2.2. Подход к статистическому моделированию процесса маршрутизации сообщений в цифровой системе передачи

Стремительное развитие цифровых сетей, успехи оптоволоконных и беспроводных средств связи сопровождаются непрерывной сменой сетевых технологий. Однако, несмотря на достигнутый прогресс в теории проектирования телекоммуникационных систем, эта область в настоящее время оставляет широкий простор для разработки аналитических методов и подведения строгой теоретической базы для приближённых методик, реально используемых операторами и разработчиками. Такие методики во многом ещё являются эвристическими и опираются главным образом на интуицию и эмпирические исследования, а не на строгие доказательства, что делает их скорее искусством, чем наукой. Обладая определёнными преимуществами, эвристические методики и алгоритмы в большинстве случаев не позволяют оценить погрешности получаемых решений, обеспечить их общность (гарантировать отсутствие пропущенных решений), а также находить эффективные решения нестандартных задач. С этой точки зрения аналитические

подходы к моделированию сетевых процессов обладают значительной актуальностью, а полученные результаты – высокой значимостью.

В подавляющем большинстве случаев, согласно огромному количеству публикаций на данную тему, при аналитическом моделировании процесса передачи сигналов по сети производится переход из одной теоретической области (моделирование объекта) в другую (моделирование работы сети с этим объектом), что почти всегда лежит в сфере теории массового обслуживания. Причём зачастую с практической точки зрения исследования носят незаконченный характер – отсутствует обсуждение результатов по части их применения в сетевой практике. Безусловно, математические методы теории массового обслуживания являются весьма весомыми при разработке общей модели сетевых процессов, тем не менее результаты подобного моделирования должны применяться для поиска решений по построению, модернизации и оптимизации программно-аппаратных средств телекоммуникаций. Под последними следует понимать выбор (определение) физической архитектуры и логических топологических схем, типа маршрутизации, способов резервирования (в том числе буферизации) в случае имеющих место нарушений и поиск решений других сетевых подзадач.

В соответствии с тематикой настоящей монографии, посвящённой изучению процессов в уже разработанных (уже эксплуатирующихся) сетях, к значимым сетевым подзадачам следует отнести задачу маршрутизации. Заметим также, что вопросы резервирования, управления информационными потоками и им подобные, также в той или иной мере связаны с проблемами маршрутизации. С представленной точки зрения разработка аналитических подходов к моделированию процессов маршрутизации является актуальной технической задачей.

Термин «маршрутизация» (Routing) в настоящее время имеет неоднозначное толкование. Согласно [2], под ним понимают: «Подсистему маршрутизации», «Протокол(ы) маршрутизации» и «Вычисление маршрута», т.е. способ поиска пути для заданного сигнала (заявки, сообщения).

В функции подсистемы маршрутизации входит определение значений QoS-параметров, параметров трафика устанавливаемого виртуального соединения (в зависимости от типа коммутации: каналов, пакетов или сообщений), согласование и корректировка поступающего сигнала между его инициатором и администратором сети. Протокол маршрутизации предназначен для обмена информацией, необходимой для вычисления маршрутов (в системе ОКС № 7 эти функции в основном возложены на платформу SCCP). Вычисление маршрута – это как раз и есть наукоёмкая задача по определению пути, необходимому для передачи сигнала от источника к адресату. Вопросы первого и второго пунктов частично рассмотрены применительно к системе сигнализации ОКС № 7 (см. главу 1), по ним также имеется весьма обширная литература (в качестве исходных материалов можно указать [120...122]). Так, под термином «маршрутизация» мы будем понимать поиск пути для какого-либо заданного сигнала с выполнением

топологических ограничений сети, требований трафика и QoS-параметров при удовлетворении критериев оптимальности (прежде всего по эффективности сети).

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует единая стройная теория маршрутизации. Решение задач в данной области производится с применением эвристических алгоритмов, таких как «алгоритм девиации потока», «имитационного отжига», и других (см. [84, 109, 123]). Под алгоритмом маршрутизации в данном случае понимается правило, в соответствии с которым в каждом сетевом узле осуществляется выбор линии связи для передачи блока данных (сообщения). Существует фиксированная (однопутевая) и альтернативная виды маршрутизации. В случае фиксированной маршрутизации от узла-источника к узлу-адресату используется единственный маршрут для передачи всего предназначающегося трафика и задача сводится к выбору оптимального пути из всех возможных путей. При альтернативной (разветвлённой, многопутевой) маршрутизации предполагается возможность разделения передаваемого трафика на части с последующей передачей этих частей по различным каналам, что в более полной мере использует ресурсы сети.

В последнее время появляется разграничение на *статическую* и *динамическую* маршрутизацию [2, 84, 109]. В первом случае маршрут выбирается между каждой парой источник-адресат в соответствии с априорно заданными исходными данными, во втором – адаптивно в соответствии с текущими изменениями в состоянии сети.

Постановка общей задачи о выборе маршрута, согласно [109], может быть представлена следующим образом. Для известной топологической структуры сети (физической и набора виртуальных архитектур), матриц входных потоков $\|\gamma_{ij}\|$ (сообщений/с), возникающих в узле i и предназначенных узлу j , и пропускных способностей линий связи $\|d_{kl}\|$ (байт/с) между узлами k и l , средней длины сообщений $1/\mu$, (байт), требуется найти переменные $x_{kl}^{(i,j)}$, представляющие собой доли потоков γ_{ij} , проходящих по линии kl , рис. 4.6.

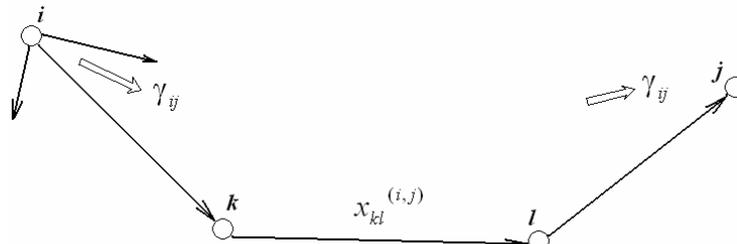


Рис. 4.6. Иллюстрация общей постановки задачи маршрутизации

Задача ставится при действии ряда условий:

1. Значения искомым долей потоков принадлежат замкнутому интервалу: $x_{kl}^{(i,j)} \in [0, 1]$. В этом случае интенсивность потока в линии kl λ_{kl} (сообщений/с), обусловленная всем сетевым трафиком $\gamma = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}$, где

N – количество узлов сети, имеет вид

$$\lambda_{kl} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot x_{kl}^{(i,j)}. \quad (4.20)$$

2. Для переменных $x_{kl}^{(i,j)}$, согласно [84, 109], должно выполняться *условие сохранения потока в сети*, состоящее в следующем: предполагается, что система передачи функционирует, находясь в точке равновесия по состояниям стационарного оборудования всей сети, [84, 123]. Иными словами, всей телекоммуникационной системе ставится в соответствие цепь Маркова (см. Приложение **G**) либо марковский процесс с дискретным множеством состояний, характеризующий полный набор вариантов взаимодействия сетевых устройств. Для придания ясности сказанному перечислим основные типы таких состояний, согласно [123], для какого-либо одного сетевого узла: режим передачи, состояние сканирования запроса (о требовании пересылки информации для данной станции), состояние выявления запроса, состояние настройки приёмника данной станции на сигнал передающей станции, и т.д. Очевидно, что, во-первых, эти состояния зависят от используемой системы сигнализации, способа многоканальной передачи и подобных особенностей сети, во-вторых, общее количество состояний всей системы растёт по закону факториала от числа состояний каждого узла и количества узлов⁸, и в общем случае является огромным. Вследствие этого напрямую решать задачу о нахождении вероятности пребывания той или иной станции в некотором состоянии и на основе этого определять маршрут (по выбранному критерию оптимальности) неэффективно из-за чрезмерных затрат машинного времени. Так, согласно условию сохранения потока в сети предполагается, что ожидаемый рост количества станций в любом из состояний телекоммуникационной системы равен нулю, или, что то же самое, – ожидаемое число станций, входящих в каждое состояние системы, должно быть равным числу станций, выходящих из каждого состояния системы на каждом временном интервале Δt .

Согласно [84, 123], это условие является приближением, поскольку на самом деле система движется в окрестности этой точки по фазовой траекто-

⁸ В Приложении **G** рассмотрен пример определения количества состояний системы компонентов, каждый из которых обладает двумя собственными состояниями.

рии. Тем не менее известная⁹ математическая формализация представленного условия выглядит следующим образом, [109]:

$$\sum_{k=1}^N x_{kl}^{(i,j)} - \sum_{l=1}^N x_{kl}^{(i,j)} = \begin{cases} -1, & l = i; \\ 0, & l \neq i, j; \\ 1, & l = j. \end{cases} \quad (4.21)$$

3. Третьим условием общей задачи, как правило, является выбранный(е) критерий(и) оптимизации. Возвращаясь к известной постановке задачи [109], отметим, что это требование о минимизации средней задержки сообщения T в сети (которая в соответствии с правилом Л.Клейнрока определяется как взвешенная сумма межконцевых задержек T_{ij}):

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot T_{ij} = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \lambda_{kl} \cdot t_{kl} \rightarrow \min. \quad (4.22)$$

В (4.22) t_{kl} – среднее время пребывания сообщения в линии (k, l) .

4. В известной постановке также предполагается, что все линии связи абсолютно надёжны и помехоустойчивы (вероятность ошибки и вероятность отказа равны нулю), узлы коммутации имеют память бесконечного размера, время обработки сигналов на сетевых узлах отсутствует, длины всех сообщений независимы и распределены по показательному закону со средним значением $1/\mu$, трафик, поступающий в сеть, состоит из сообщений одинакового приоритета и образует пуассоновский поток со средним значением интенсивности γ_{ij} , а также каждая линия связи представляет собой дуплексный канал с неизменной пропускной способностью d_{kl} (если линия связи между узлами k и l отсутствует, то $d_{kl} = 0$). Иными словами, в данной постановке предполагается, что задержки в передаче сообщений обусловлены очередями, возникающими из-за занятия (обслуживания предыдущих заявок) станционных устройств адресатов и не связаны с реальными характеристиками программно-аппаратных средств телекоммуникаций.

Заметим, что представленный подход к задаче маршрутизации имеет практическую применимость для сетей без искажений с коммутацией пакетов (сообщений), когда информация может передаваться по параллельным маршрутам. В частности, подобный подход может оказаться полезен для сигналов системы ОКС № 7, так как последняя является сетью с коммута-

⁹ Возможно развитие и других подходов, базирующихся, в частности, на требовании равенства нулю второй производной по времени от числа станций, находящихся в том или ином состоянии системы (первой производной от изменения скорости этого количества).

цией пакетов переменной длины. Однако с целью обеспечения практической значимости известной задачи маршрутизации необходим учёт реальных факторов искажений. В связи с этим среднее время пребывания сообщения в линии (k, l), зависящее от времени передачи сообщения по линии $1/\mu \cdot d_{kl}$, предлагается оценивать из следующих соображений:

$$\langle t_{kl} \rangle = \frac{1}{\mu \cdot \bar{d}_{kl}} + \langle W_{kl} \rangle + \langle H_{kl} \rangle, \quad (4.23)$$

где \bar{d}_{kl} - величина математического ожидания пропускной способности линии, зависящая от качества линии (влияния помех и искажений); $\langle W_{kl} \rangle$ - среднестатистическое время ожидания сообщения в очереди на узле с номером l ; $\langle H_{kl} \rangle$ - среднестатистическая величина задержки, вызванной искажениями в линии (по физическим причинам, см. разд. 2.3, по алгоритмическим причинам, см. разд. 3.4). Так как для обеспечения достоверности передаваемой информации системы сигнализации (в том числе и ОКС № 7) в случае потери или искажений сигнала сверх установленного значения производят запрос на повторную передачу, то в реальной сети пропускная способность каждой линии не может оставаться неизменной. Можно говорить о средней пропускной способности или математическом ожидании случайной величины d_{kl} . Очевидно, что \bar{d}_{kl} связано с фактической надёжностью линии, включая надёжность сетевых узлов k и l ¹⁰. Общее реальное время ожидания сообщения в очереди W_{kl} в отличие от известного соотношения, должно включать длительность его обработки на коммутационном узле с номером l . Тогда для случая равноприоритетного трафика и показательного распределения средней длины сообщения (при наличии бесконечной памяти на узле коммутации) среднестатистическое значение $\langle W_{kl} \rangle$ должно определяться следующим образом:

$$\langle W_{kl} \rangle = \frac{1}{\mu \cdot \bar{d}_{kl}} \cdot \frac{\lambda_{kl}}{\mu \cdot \bar{d}_{kl} - \lambda_{kl}} + \lambda_{kl} \cdot \langle \delta t_k \rangle, \quad (4.24)$$

где $\langle \delta t_k \rangle$ - среднее время обработки одного информационного бита стационарным оборудованием узла k . Здесь предполагается, что величина δt_k может варьироваться в зависимости от состояния реальной работоспособности аппаратуры данного узла.

¹⁰ Обсуждению вопросов, посвящённых определению фактической надёжности, посвящён следующий параграф.

Тогда после подстановки (4.24) в (4.23) по аналогии с известным подходом [109] получаем

$$\langle t_{kl} \rangle = \frac{1}{\mu \bar{d}_{kl} - \lambda_{kl}} + \lambda_{kl} \cdot \langle \delta t_k \rangle + \langle H_{kl} \rangle. \quad (4.25)$$

При подстановке соотношения (4.25) в (4.22) получается выражение для средней задержки сообщения по сети, в отличие от известного, учитывающее реальные факторы искажений:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left\{ \frac{\lambda_{kl}}{\mu \bar{d}_{kl} - \lambda_{kl}} + \lambda_{kl}^2 \cdot \langle \delta t_k \rangle + \langle H_{kl} \rangle \cdot \lambda_{kl} \right\}. \quad (4.26)$$

Или с учётом (4.20), запишем:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot x_{kl}^{(i,j)} \times \left\{ \frac{1}{\mu \bar{d}_{kl} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot x_{kl}^{(i,j)}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot x_{kl}^{(i,j)} \cdot \langle \delta t_k \rangle + \langle H_{kl} \rangle \right\} \right\}. \quad (4.27)$$

Выражение (4.27) представляет задачу поиска оптимального маршрута, выбор которого минимизирует T , для реальной сети с коммутацией пакетов (сообщений), в которой допустимо разделение заданного трафика γ_{ij} на искомые составляющие части $x_{kl}^{(i,j)}$, предназначенные для передачи по линиям (k, l) , $k, l = \overline{1, N}$. Реальные значения пропускных способностей линий \bar{d}_{kl} предлагается оценивать с использованием определения их фактической надёжности на основе расчёта или измерений QoS-параметров (коэффициента готовности сегмента, вероятности безотказной работы, вероятности ошибки PE с оценкой доверительной вероятности, характеризующей погрешность расчётов). Применительно к рассматриваемой задаче наиболее полной характеристикой для реальных величин \bar{d}_{kl} является коэффициент готовности \mathbf{K}_{red} (линии связи, коммутационного оборудования, сегмента системы передачи), который согласно [124] равен вероятности нахождения данного объекта в работоспособном состоянии к рассматриваемому моменту времени от начала наблюдения. К сожалению в действующих нормативных документах систем телекоммуникаций не уточняет-

ся, должен ли работоспособный объект иметь идеальную передаточную функцию (что, заметим, невозможно, и коэффициент готовности такой сети как вероятность данного состояния почти всегда будет равен нулю), либо реальную передаточную функцию, но тогда неоднозначным является вопрос – какую в количественном отношении. Для уточнения понятия K_{red} как вероятностной меры события, состоящего в том, что реальные показатели работоспособности сети будут равны полученным в расчётах значениям к моменту наступления заданного момента времени (что необходимо в том числе для обеспечения состоятельности статистической методики маршрутизации), предложены к рассмотрению *гамма-процентные показатели надёжности*, [125, 126]. Последние, по мнению авторов, целесообразно ввести в список надёжных характеристик для систем телекоммуникаций. Так, предлагается рассматривать вектор значений количественных мер работоспособности сети $\{PE_\gamma, \varpi_\gamma$ и др.}, при которых реальная вероятность безотказной работы этой системы передачи будет не меньше наперёд заданной величины Q_γ с вероятностью γ . Очевидно, что подход к статистическому моделированию ВОСП, изложенный в настоящей монографии, позволяет проводить оценку гамма-процентных показателей исходя из количественных характеристик качественного приёма.

Ввиду значимости этих параметров, по большей части отсутствующих в НТД систем телекоммуникаций, в следующем разделе им уделено определённое внимание.

Значения $\langle H_{kl} \rangle$ и $\langle \delta t_k \rangle$ также могут быть найдены путём обработки результатов измерений и данных из эксплуатации либо посредством моделирования их в виде случайных процессов с использованием соотношений (4.6) и (4.7). Пример подобного моделирования с использованием нестационарного процесса приведён в Приложении **Г**. В представленном примере статистического моделирования параметров $\langle H_{kl} \rangle$ и $\langle \delta t_k \rangle$ произведено определение наиболее вероятных значений (на произвольном сетевом узле k и линии связи (k, l)), рассуждения проведены относительно некоторой обобщённой переменной \mathbb{A} к задаваемому наперёд моменту времени в предположении, что случайный процесс его изменения является гауссовским и марковским, и имеет функцию плотности вероятности Орнштейна-Уленбека [114].

Очевидно, что величины $\langle H_{kl} \rangle$ и $\langle \delta t_k \rangle$, так же как и \bar{d}_{kl} , связаны с QoS-параметрами. При наличии такой зависимости (полученной, например, экспериментально) вида $\langle H_{kl}(PE) \rangle$ или $\langle \delta t_k(PE) \rangle$ и необходимости статистического моделирования предложена методика нахождения $PE_{ij}^{(k)}$, которая имеет широкую применимость для подобного моделирования (представлена в следующем подразделе).