

ГЛАВА 1

Возмущающие факторы и помехоустойчивость волоконно-оптических систем передач

Приведено обоснование значимости физического и математического моделирования при построении современных телекоммуникационных систем. Определены критерии работоспособности волоконно-оптических систем передач, описаны основные причины искажений сигнала, сделано обобщение ряда известных математических моделей процесса приёма цифрового сигнала в ВОСП и стандартных методик определения значений показателей помехоустойчивости. Предложен статистический подход к моделированию процесса приёма реального цифрового сигнала. С целью повышения практической значимости развитой статистической модели показана возможность «привязки» входных технических характеристик к реальному сегменту ВОСП с заданным вектором влияющих параметров и их временных зависимостей.

1.1. Роль математического моделирования при построении и эксплуатации ВОСП

Наметившаяся в последние 10 лет тенденция развития современных систем телекоммуникаций связана с широкомасштабным внедрением оптических технологий для передачи сообщений. Это, с одной стороны, является следствием стремительного развития волоконной и интегрально-оптической техники, с другой стороны, продиктовано требованиями информационных технологий, машиностроения и пр., всеми областями, где используются телекоммуникации и выдвигаются требования по увеличению информационной ёмкости канала и скорости обработки сообщений. Сегодня без систем телекоммуникаций невозможно представить деятельность ни одного промышленного предприятия. Огромная полоса пропускания оптоволоконных магистралей, позволяющая мультиплексировать в одно волокно до $10^6 \dots 10^7$ каналов (типа E0) [1] благодаря использованию временного (TDM) и волнового (WDM) [1] способов уплотнения, способствует такому всеобъемлющему развитию ВОСП.

Если на начальном этапе становления оптоволоконной техники ВОСП внедрялись только на магистральных сетях (WAN), то по мере их развития всё в большей степени имеет место тенденция организации на их основе корпоративных, ведомственных и внутризональных участков регионального уровня (LAN). И здесь ряд методик настройки, критериев оптимальности, технических и архитектурных решений, что имеет место для WAN, не всегда в полной мере остаётся справедливым – в первую очередь в силу значимых

особенностей той или иной LAN, зависящих в том числе от выполняемых функций, типа обслуживаемого производства и т.д. Необходимо также отметить, что развитие корпоративных LAN в России во многом обязано предприятиям ТЭК, что во многом объясняется характером производственной деятельности последних. Здесь, с одной стороны, характерно значительное влияние внешних воздействий - электромагнитных помех (от работающих промышленных агрегатов, высоковольтных линий электропередач), фоновых излучений, широкополосной вибрации, температурных флуктуаций и связанных с ними возмущений и т.д., с другой стороны, к каждому элементу системы (активной преобразующей аппаратуре, узлам управления световыми потоками на базе электрических или магнитных потенциалов, их электрическим блокам питания, электрическим проводам и разъёмам) предъявляются требования по обеспечению соответствующего уровня надёжности, в том числе пожаровзрывобезопасности в соответствии с действующими стандартами [2] в зависимости от требований производства. Такие технико-экономические ограничения, свойственные системам телекоммуникаций предприятий ТЭК, как:

- необходимость выделения отдельного канала для каждого передаваемого трафика;
 - наличие существенно разнородной среды для передачи сообщений (медь, оптика, радиолинии);
 - фактически труднопрогнозируемое время на устранение неисправностей;
 - отсутствие унификации оборудования систем связи;
 - существенно различная квалификация обслуживающего персонала
- особенно остро выдвигают требования по:
- надёжности, гарантированной доставке переданных сообщений;
 - возможности передачи всех видов данных без потери качества;
 - сокращению до минимума времени переключения на резервный канал, встроенные механизмы резервирования;
 - обеспечению центрального мониторинга и управления сетью;
 - простоте масштабируемости, способности к развитию как минимум на 10 лет;
 - простоте эксплуатации, совместимости с различными видами оборудования;
 - доступной цене.

По поводу последнего пункта следует отметить, что главная задача любой системы телекоммуникаций – это обеспечивать связь на том или ином предприятии (системе предприятий), и она должна создаваться (вновь вводиться в эксплуатацию или модернизироваться) в согласии с действующими требованиями тех систем, работоспособность которых она должна поддерживать. В отношении предприятий, строящих LAN-телекоммуникации, стои-

мостной показатель играет важную роль, и его можно отнести к показателям качества.

Распространенное мнение о том, что оптоволоконные цифровые системы связи и без того являются достаточно качественными и надёжными, и поэтому, во-первых, иностранные фирмы, которые обеспечивают пуск участков цифровых сетей, должным образом настроят сеть, во-вторых, в дальнейшем её работа не потребует квалифицированной эксплуатации, в значительной степени неверно. Действительно, верно, что современные цифровые технологии обеспечивают высокое качество связи, малые эксплуатационные затраты, лучший контроль за ресурсом сети. Справедливо также, что хорошо отлаженная, «ухоженная» цифровая сеть требует обслуживания в меньшей степени. Однако также известно [1], что «неухоженная» цифровая сеть деградирует гораздо быстрее аналоговой и требует при восстановлении гораздо больших затрат, что является объективной платой за сложность технологии цифровой передачи. При этом подход «достаточности первоначальной настройки» ведет к зависимости операторов сети от инофирм, что является негативным фактором. Здесь поиск конфликтных ситуаций, противоречий, неисправностей, причин их возникновения, «тонкая настройка» сети, и т.д., которые дают операторам ключ к пониманию процессов, происходящих в сети, и помогают добиться максимальной эффективности её работы, остаются практически недостижимыми.

С уверенностью можно сказать, что с развитием оптоволоконных цифровых телекоммуникаций и с всё большим их внедрением вырисовывается научно-техническая проблема создания аналитических методик настройки, согласования разнородного телекоммуникационного оборудования, позволяющих реально оценивать и прогнозировать работоспособность сети, выявлять весь спектр возможных решений, «слабые места» и многое другое.

Представленную выше проблему сегодня пытаются решать двумя путями. Первый - развитие систем внутренней диагностики интеллектуальных узлов сетей, второй - применение современной измерительной техники. Но поскольку развитие систем телекоммуникаций и инфокоммуникационных технологий идет очень динамично, разработка систем самодиагностики и их отработка несколько отстают от развития самих средств связи [3]. Следовательно, применение независимых от оборудования систем контроля ВОСП средств измерительной техники в ряде случаев для операторов связи является единственно доступным решением. Это приводит к тому, что роль измерительной техники и измерительных систем (ИС) на сети связи повышается. Такая роль ИС является новой в практике отечественной связи. До сих пор измерительная техника служила для контроля работы сети и соответствия ее узлов в первую очередь отечественным стандартам - имелись четкие рекомендации по методологии измерений на сетях связи, т.е. указания на прибор, методику и параметры измерений. В современной ситуации, когда процесс стандартизации технологии значительно отстает от развития самих технологий, четких рекомендаций по использованию измерительной техники и экс-

платационной методологии нет и в ближайшем будущем не предвидится [3]. Средства ИС, применяемые современными операторами, используются не только для проверки на соответствие стандартам (в первую очередь международным), но и для изучения процессов, протекающих в сети.

С одной стороны, такой подход позволяет операторам быстро осваивать новые технологии на международном уровне, что является необходимым условием их дальнейшей успешной работы. С другой стороны, использование средств ИС в достаточной мере является весьма дорогостоящей возможностью – прежде всего по причине значительной стоимости самого измерительного оборудования, высоких требований к квалификации сетевых операторов, ощутимым накладным требованиям к различным видам измерений. Последние означают необходимость отключения телекоммуникационного оборудования при проведении ряда измерений, значительное время от начала до получения результата измерений (в системах синхронизации – до нескольких месяцев, [4]), и так далее. Использование тех или иных методик сокращённых испытаний [5], в том числе эквивалентно-циклических, ресурсных, частично решает перечисленную проблему, тем не менее, оставляя требования к финансированию оборудования ИС, подготовке персонала и пр., частично снижая при этом точность и достоверность измерений.

Одним из корректных способов решения поставленной проблемы является создание своеобразной виртуальной базы, «вычислительного полигона», в конечном итоге представленного в виде программно-аппаратных средств, использование которого позволит проводить компьютерное моделирование анализируемого сегмента ВОСП без значительных затрат времени, не приобретая дорогостоящей измерительной базы, и т.д. Безусловно, внедрение такой виртуальной системы ни в коей мере не может отменить приборные (макетные, натурные) испытания и измерения. Речь идёт о том, что последние представляется целесообразным проводить на этапе приёмосдаточных, периодических, государственных испытаний, а текущую настройку, оптимизацию, поиск путей модернизации, и т.д. проводить с использованием виртуальных «испытаний».

Создание такого виртуального полигона, позволяющего адекватно оценивать работоспособность ВОСП, требует серьёзной инженерной, математической и программной проработки. В первую очередь отметим, что получение достоверных результатов невозможно без использования математических моделей, адекватно отражающих сущность реально происходящих на оптоволоконных сетях процессов. Необходимо также учитывать, что большинство задач в системах оптических телекоммуникаций в стандартной их постановке относятся к классу некорректных задач [6]. Немалой сложностью при математическом моделировании является трудность учёта всех значимых влияющих факторов, выявление оптимального вектора исследуемых в задаче параметров, обеспечивающего, с одной стороны, достоверность найденного решения, с другой стороны, позволяющего избежать излишней сложности математической модели, предотвращающего её громоздкость. Гибкость ис-

пользуемой в такой виртуальной методике математической модели должна позволять оператору производить те или иные настройки, переключать опции и т.д.

Следует отметить, что в настоящее время имеет место тенденция заметного разделения, состоящего в отрыве методов аналитического математического моделирования процессов приёма-передачи информации в ВОСП с последующим нахождением значений параметров работоспособности, и способов оценки тех же или аналогичных параметров на базе стандартных эксплуатационных методик. Известные математические модели систем связи в основном направлены на решение двух классов задач. Первый – исследование влияющих факторов на канал передачи данных, с последующим выбором алфавита источника, способа помехоустойчивого кодирования и пр. (задача Шеннона) [7], многоканальных систем связи, добавляются исследования по ортогональности и условиям последующего разделения передаваемых сигналов [8]. Для синхронных систем связи – исследования по выбору оптимального сигнала синхронизации [9], структуры схем подстройки частоты [10] принимаемого сигнала синхронизации. Второй класс задач посвящён расчету по мощности и отдельным дисперсионным искажениям импульсного сигнала в оптоволоконных системах [11], [12] (длины регенерационного участка, Rec. G.681, G.692) с учётом потерь в световодных соединителях, разветвителях, на преобразование и т.д. для обеспечения требуемого уровня критериев помехоустойчивости передачи. В стационарном случае - вероятности битовых ошибок (PE), в нестационарном добавляются: количество секунд с ошибками (NES) и количество сильно поражённых секунд ($NMES$). Параметры NES и $NMES$ определяются экспериментально (по результатам эксплуатации) по факту нахождения параметра PE в установленном стандартом [12] диапазоне. В приложении А приведены диапазоны допустимых значений вероятности ошибки для канала «передачи данных» и канала «передачи голоса». Читатель найдёт там также краткое описание следующих широко применяемых в эксплуатации методик: оценки пропускной способности оптического волокна, предельных длин участков регенерации, быстродействия ВОСП*, вероятности ошибок и порога чувствительности приёмного оптического модуля, затухания в разъёмных соединениях с базовым примером расчёта. На основе аналогичных методик оценки параметров оптоволоконных сетей построены прикладные инженерные программные пакеты, такие как BeamPROP, LinkSEEM и другие. Ограниченность применения представленных здесь методик, в частности, методики оценки максимальной битовой скорости и быстродействия передачи на участке регенерации, обусловлена ещё и краткостью физической модели. Последняя в своей основе содержит учёт лишь хроматической дисперсии [1], пренебрегая остальными её видами без возможности при необходимости их дополнительного учёта оператором.

* Названия методик соответствуют установленным действующими стандартами, в том числе [12].

В настоящее время отсутствуют математические модели многоканальных систем связи, позволяющие отслеживать изменение критериев качества передачи в условиях воздействия помех на активную аппаратуру линейного тракта, аппаратуру размножения синхросигнала. Известные математические модели критериев качества передачи [13, 14 и т.д.], используемые при выборе сетевых решений, оптимизации архитектуры ВОСП, построены без учёта неидеальности сигнала синхронизации, в том числе возможных его скачкообразных изменений. Количество ведомых генераторов сетевых элементов (ГСЭ) и вторичных задающих генераторов (ВЗГ) определено в руководящих документах [15, 16] и пр., безотносительно к условиям эксплуатации системы телекоммуникаций, способам передачи синхросигнала, архитектуре сети синхронизации. Существующие учебно-методические и инженерно-технические литературные источники [1, 17 - 20] и многие другие (в приложении В приведён ряд широко применяемых в телекоммуникационной промышленности стандартов), содержащие описание алгоритма синхронного группообразования (АСГ) и аппаратуры, его реализующей, не отражают как характеристик реальных компонентных сигналов с возможными искажениями и уровнем шума, так и параметров работоспособности, в том числе ресурса реально эксплуатируемой аппаратуры. Не учитывается влияние искажений, вносимых АСГ в уплотняемый сигнал синхронизации. Задача обеспечения качества передачи на требуемом уровне решается путём неоправданного завышения системного запаса ВОСП, а задача выбора оптимального пути модернизации как сети для передачи данных, так и системы синхронизации решается в большинстве случаев операторами связи интуитивно [4, 21 - 23]. Следовательно, известные математические модели ВОСП, с одной стороны, сложны и трудноприменимы в эксплуатации, так как далеко не всегда выходят на требуемые характеристики и параметры, кроме того, вектор исходных данных зачастую не позволяет их применить непосредственно в эксплуатации. С другой стороны, они также обладают ограниченным рассмотрением факторов влияния, тем самым неадекватно описывают физические процессы, происходящие в ВОСП.

Таким образом, новые технические задачи, поставленные промышленностью перед системами телекоммуникаций по увеличению скорости, объемов передаваемой информации, расширению областей технических приложений, приводят к необходимости моделирования с последующей оптимизацией и пересмотром принципов проектирования, управления и контроля. В связи с этим задачи построения новых инженерных методик расчёта ВОСП с применением методов математического, физического и компьютерного моделирования являются актуальными.

1.2. Критерии работоспособности системы передачи

Несмотря на значимость моделирования при построении и эксплуатации телекоммуникационных систем, видно, что в настоящее время имеет место недостаточная проработка в области создания математических и физических моделей ВОСП (здесь и далее: реальных физических процессов, происходящих в ВОСП при приёме-передаче информации), позволяющих найти взаимосвязь инженерных параметров, характеризующих помехоустойчивость, надёжность, качество и т.д. рассматриваемой системы передачи, характеристик возмущающих факторов и пользовательских показателей. Как будет представлено далее, известные математические модели в своём большинстве направлены на определение какого-либо одного параметра, например, вероятности ошибок считывания двоичных разрядов, т.е. величины PE , оставляя без рассмотрения показатели надёжности, быстродействия и прочее, принимая в рассмотрение только один возмущающий фактор [13, 14]. При этом очевидно, что система связи, обладающая весьма низким значением PE при передаче данных (например, в какой-то определённый момент времени), но и одновременно невысокими показателями надёжности (допустим, долгосрочными характеристиками), вряд ли привлечёт к себе интерес операторов и потребителей. В связи с этим логичным является требование описывать систему передачи при физическом и математическом моделировании реальных процессов, происходящих на ней, не единственным параметром (хотя весьма значимым, таким как PE , и в немалой степени определяющим значения других параметров), а их набором, вектором. Компоненты последнего должны содержать как краткосрочные, так и долгосрочные характеристики, позволяющие в той или иной мере сделать вывод о способности данной системы телекоммуникаций удовлетворить требования пользователя. Кроме того, эти характеристики должны быть справедливы для любой системы телекоммуникаций: безотносительно к среде передачи (световые импульсы в диэлектрических волноводах, световые импульсы и радиосигналы в свободном пространстве, импульсы электрического напряжения и пр.), конструктивными особенностям оборудования, способу уплотнения, кодирования и т.д.

Такой набор параметров, вообще говоря промежуточных, которые тем не менее однозначно характеризуют помехоустойчивость, скорость передачи информации, надёжность и другие характеристики, имеющие значение для пользователя, предлагается называть *критериями работоспособности* рассматриваемой системы передачи.

В свете поставленной задачи – создания математической базы для компьютерного полигона исследования систем телекоммуникаций – основной целью математического моделирования ВОСП является нахождение взаимосвязей между такими обобщающими параметрами, как критерии работоспособности, которые в определённой мере нормируются нормативно-технической документацией (НТД), конструктивными параметрами узлового оборудования и линий передачи, зависящими от конкретно рассматриваемой

системы телекоммуникаций, и информационными показателями. Отметим также, что степень или меру «полезности системы передачи для пользователя» во многом, к сожалению, приходится оценивать интуитивно, что объясняется объективным положением дел в данной области исследования и запаздыванием нормативно-метрологической базы для телекоммуникаций.

Перейдём к рассмотрению основных критериев работоспособности систем передачи с учётом тематики настоящей монографии применительно к волоконно-оптическим телекоммуникациям, а также конструктивным параметрам технических устройств, используемых в данной области, которые определяют в конечном итоге структуру системы телекоммуникаций и необходимое для её построения оборудование. Пусть критериями работоспособности являются:

- 1) показатели помехоустойчивости передачи, которые регламентируются стандартом [12], т.е. определяются величинами PE , NES и $NMES$ (Приложение А); и
- 2) показатели надёжности, определяемые вероятностью безотказной работы (Q), наработкой на отказ (T_Q) и коэффициентом готовности присоединяемого i -го сегмента ($\kappa_{red,i}$).

Выбор последних из достаточно широкого ряда надёжных характеристик [5, 24, 25] и др. обусловлен, во-первых, значимостью их при эксплуатации устройств связи, во-вторых, использованием их, в частности параметра $\kappa_{red,i}$, в качестве основополагающих при формировании отечественной нормативно-метрологической базы для телекоммуникаций [26-30].

В отношении систем синхронизации, которые подробно будут рассматриваться в гл. 2, ещё раз остановимся на определении наиболее важных показателей в области надёжности. Под *отказом системы синхронизации* сетевого сегмента, согласно [26], будем понимать состояние, в котором какой-либо ведомый генератор сети потерял все определённые для него источники внешней синхронизации и находится в режиме удержания или свободных колебаний. Это означает, что точность ведущего синхросигнала $\varpi_{вед}$ для этого ГСЭ оказывается хуже, чем точность его собственного генератора $\varpi_{соб}$. Согласно [15, 16], параметр $\varpi_{вед}$ определяется отношением

$$\varpi_{вед} = \Delta f / f_{ном}, \quad (1.1)$$

где величина Δf представляет собой отличие частот ведомого и ведущего генераторов, может также определяться как абсолютная величина рассинхронизации (несоответствия частот) между сетевыми узлами, $f_{ном}$ – номинальная частота синхронизации, установленная НТД.

Можно говорить о *вероятности отказа*, т.е. события, характеризуемого $P_{от}(\varpi_{вед} \geq \varpi_{соб})$, и далее – о вероятности безотказной работы:

$$Q = 1 - P_{от}(\varpi_{вед} \geq \varpi_{соб}). \quad (1.2)$$

В общем случае $P_{от}$ и Q зависят от физического состояния оптоволоконного тракта, электронной аппаратуры, степени влияния внешних воздействий, возможных искажений в сигнал действием нелинейных оптических эффектов, количества подключенных ГСЭ к цепочке и т.д. Знак «больше» в (1.2) обусловлен тем, что точность ϖ тем лучше, чем рассчитанное значение по (1.1) меньше – с уменьшением Δf точность синхронизации улучшается. Под *наработкой на отказ* (T_Q) сетевого сегмента, согласно [24], следует понимать интервал времени от начала наблюдения до момента отказа. Критерием отказа сетевого элемента является превышение предельных значений девиации временного интервала (ДВИ) и джиттера по [11, 12] в его выходном сигнале.

Под *коэффициентом готовности* присоединяемого i -го сегмента ($\kappa_{red,i}$), согласно [26, 27], следует понимать произведение коэффициентов готовности входящих компонентов сегментарных сетей: коэффициентов готовности генераторного оборудования ($\kappa_{red,ген}$), линий передачи ($\kappa_{red,ВОЛП}$) и пр.:

$$\kappa_{red,net} = \prod_{i_c=1}^{N_c} \kappa_{red,i} \quad (1.3)$$

Без учёта резервирования надёжность сети будет тем ниже, чем большее число элементов установлено на неё и чем больше общая длина линий передачи сигнала синхронизации (подробнее в гл. 2). Параметры $\kappa_{red,ген}$, $\kappa_{red,ВОЛП}$, в общем случае обозначаемые через $\kappa_{red,i}$, определяют работоспособность компонентов ВОСП и на протяжении назначенного ресурса оборудования меняются под действием как помех, так и старения на интервале $[1, 0]$. В техническом смысле перечисленные параметры определяют степень отсутствия искажений, вносимых этим оборудованием в передаваемый сигнал, вероятность нахождения устройств в работоспособном состоянии на протяжении большого интервала времени (срока службы изделия), или можно сказать, что они *характеризуют передаточную функцию* рассматриваемых устройств. Как было отмечено, рассмотренные здесь показатели надёжности далеко не полностью исчерпывают список известных надёжных характеристик в целом. Тем не менее представляет интерес рассмотрение лишь *независимых* параметров, но так как в эксплуатации пользуются и альтернативными оценками и расчётами, одна из типичных эксплуатационных методик оценки надёжности представлена в Приложении С.

По отношению к конструктивным параметрам оборудования ВОСП необходимо отметить следующее. Их значения, которые установлены НТД, техническими условиями на изделие, оговорены в паспорте на вводимый в эксплуатацию сетевой сегмент, и др., в реальной эксплуатации достигаются не всегда. На реально действующей сети, как правило, имеются отличия по скорости передачи информации [21] и т.д., вероятности ошибок и другим техническим показателям. Указанные отличия появляются как в процессе эксплуатации, так и под влиянием различного рода возмущений и воздейст-

вий. Здесь ещё раз хочется сказать о цели проводимого моделирования ВОСП: получить взаимосвязь между регламентируемыми, реальными конструктивными параметрами, обобщёнными критериями работоспособности и функциональными характеристиками возмущающих в сети факторов. Такая модель позволит решать как прямую задачу поиска значений критериев работоспособности сегмента (по известным регламентируемым, реальным конструктивным параметрам и характеристикам возмущающих факторов), а с ними и пользовательских характеристик системы связи, так и не менее важную обратную задачу адаптации – поиска значений таких конструктивных параметров оборудования, настройка которых позволит обеспечить на данном сетевом сегменте, с учётом имеющих место возмущений, требуемые значения критериев работоспособности, а с ними, соответственно, и пользовательских характеристик. Если составленные математическая и физическая модели происходящих на сети процессов адекватны и значения критериев работоспособности рассчитывались с учётом реальных условий эксплуатации и особенностей используемого оборудования, то в соответствии с их значениями при проектировании, модернизации и т.д. системы телекоммуникаций её конструктивные параметры и требуемая архитектура определяются достоверно. Проектирование, оптимизация любой системы передачи связаны с расчётом этих промежуточных критериев работоспособности, так как их значения не зависят от способа организации связи, в то время как результирующие конструктивные параметры в общем случае должны меняться от одной системы передачи к другой в зависимости от условий эксплуатации, типа используемого оборудования и пр. Вопросам нахождения пользовательских информационных параметров ВОСП на базе известных критериев работоспособности в настоящей монографии внимания не уделяется. Такие методики неплохо представлены в литературе, например, в [7, 31], и других.

Рассматриваемые конструктивные параметры (представляющие интерес при организации системы телекоммуникаций) оборудования в немалой степени зависят от технических особенностей объединяемых в сеть устройств. Сегодня в системах связи в России широко применяются три типа приёмников, ставящих в соответствие принимаемому сигналу в течение тактового интервала логический ноль или единицу:

а) принимающие решение о поступлении логической единицы в случае превышения уровня принятой энергии за время длительности такта (интервала времени, когда производится считывание одного информационного бита) над некоторым пороговым уровнем \tilde{E} (по энергии), [13], рис. 1.1;

б) принимающие решение о поступлении логической единицы в случае, если наблюдается превышение уровня амплитуды принятого сигнала (оптической мощности излучения, линейно переходящей в амплитуду электрического тока в электронной схеме) над некоторой пороговой величиной \hat{A} (например, по срабатыванию компаратора и пр.) в течение заранее заданного интервала времени $\tau_{пр}^{реш}$ (интервала принятия решения), [13], рис. 1.1; и

в) принимающие решение о поступлении логической единицы в случае, если в установленный момент стробирования амплитуда принимаемого сигнала превышает установленное пороговое значение, [32].

Таблица 1.1

Тип параметров	Регламентируемые НТД, техническими условиями и прочими документами	Реально наблюдаемые на сети
Независимо от типа приёмника	Δt – длительность тактового интервала в системе передачи	$\tau_{\text{пер}}, \tau_{\text{пр}}$ – длительности тактового интервала передатчика и приёмника соответственно, $A_{\text{реал}}^0$ – значение амплитуды сигнала на выходе передающего устройства,
	$A^{(1)}$ – значение амплитуды сигнала, соответствующего уровню логической единицы	
Приёмник типа а)	\hat{A} – порог решения по амплитуде	$A_{\text{реал}}$ – значение амплитуды сигнала на входе приёмного устройства*
	$\tau_{\text{пр}}^{\text{реш}}$ – интервал принятия решения	
Приёмник типа б)	\tilde{E} – порог решения по энергии	

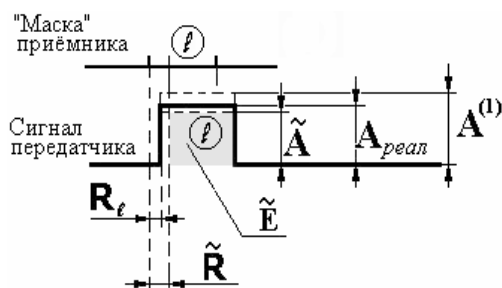


Рис. 1.1. Пороговые и реальные параметры принимаемого импульса

Предполагается, что форма импульса на протяжении тактового интервала изменяется слабо. На рис.1.1 обозначены: l – номер произвольного такта при передаче, R – отличие момента времени считывания такта в приёмнике и реального поступления фронта этого импульса от передатчика (подробно см. далее), \tilde{R} – максимально допустимая величина из диапазона возможного изменения R , когда приём сигнала ещё возможен с требуемым качеством.

Так как последний тип приёмников обладает невысокой помехоустойчивостью, предназначен для работы на битовых скоростях, не превышающих нескольких десятков Мбит/с (не более чем по потоку ЕЗ плезиохронной цифровой иерархии, [1]) и является, вообще говоря, устаревшим техническим решением, в настоящей книге при проведении математического моделирования он рассматриваться не будет. В отношении приёмников по п.п. а) и б) табл. 1.1 содержит обозначения конструктивных параметров, рассматриваемых далее в монографии при моделировании процессов приёма-передачи информации в ВОСП.

К регламентируемым параметрам также можно отнести количество ведомых ГСЭ, в синхронизируемой цепочке ($K_{\text{ГСЭ}}$) подключаемых к ВЗГ или другой аппаратуре размножения сигнала синхронизации (АРСС). При этом

математическая модель должна позволять проводить оценку правомерности выбора значения $K_{ГСЭ}$: заниженное значение количества ведомых генераторов (реально мультиплексоров) неоправданно повышает стоимость ВОСП, завышенное значение снижает качество передачи из-за недостаточной точности синхронизации.

Последующий материал настоящей главы посвящён рассмотрению искажающих цифровой сигнал факторов, имеющих место в ВОСП, и математических моделей оптоволоконных телекоммуникаций.

1.3. Источники помех и искажений в цифровом линейном тракте

Прежде чем перейти к моделированию процессов, происходящих при приёме и передаче информации в ВОСП, остановимся на источниках помех и искажений в цифровом оптоволоконном тракте. Как упоминалось выше, последние приводят к отличию реальных значений технических параметров системы передачи от их нормативных величин. Реальная система связи отличается от идеальной по следующим основным техническим причинам:

- временной интервал, в течение которого производится передача одного бита информации (именуемый также тактовым интервалом), не остается постоянным на протяжении времени. Этот эффект заключается в реальном отличии длительностей тактовых интервалов в приёмнике и передатчике, его называют фазовым дрожанием цифрового сигнала;
- уровень мощности оптического излучения в линейном тракте* (именуемый далее для краткости амплитудой излучения) не остается строго на одном и том же уровне при передаче как каждой логической единицы, так и каждого логического нуля. Последнее связано с наличием шума передатчика, входных цепей приёмника, действием возмущений в оптоволоконном тракте (прежде всего нелинейных эффектов). Флуктуации амплитуды принимаемого сигнала также возникают и по причине изменений конструктивных параметров ВОСП: затухания в канале связи, возникновения мультипликативных помех, многолучевой интерференции [33], модового шума и т.д.;
- взаимное влияние (наложение) сигналов, передаваемых в различных тактах. К такому эффекту в ВОСП приводит в меньшей мере конечная полоса пропускания устройств [13, 32], и в большей мере – действие дисперсии [1, 13, 17, 19] в оптоволоконном линейном тракте.

* Значения $A_{\text{реал}}$ и $A_{\text{реал}}^0$ обычно рассматриваются безотносительно к используемому линейному коду [18] и способу преобразования его к коду NRZ. Объяснением служит использование в оптической линии двух уровней логических сигналов: логического нуля с нулевой мощностью в идеальной системе передачи и логической единицы с уровнем $A_{\text{реал}}$ (или $A_{\text{реал}}^0$). По значениям $A_{\text{реал}}$ и $A_{\text{реал}}^0$ в оптимальной системе должны устанавливаться пороговые значения амплитуды и энергии сигнала в такте.