

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Параметры телекоммуникационных систем и типовые методики их расчёта

Приведены методики расчёта пропускной способности оптоволоконной линии, предельных длин участков регенерации, быстродействия, вероятности ошибок, затухания в разъёмных соединениях и порога чувствительности приёмного оптического модуля.

I. Диапазоны допустимых значений вероятности ошибки, характеризующие параметры NES и NMES

Таблица А.1

Тип канала	Диапазон PE_{NES} , подсчёт количества секунд с ошибками	Диапазон PE_{NMES} , подсчёт количества сильно поражённых секунд
Канал «передачи данных»	$0.3 \dots 10^{-9}$	свыше 0.3
Канал «передачи голоса»	$0.3 \dots 10^{-6}$	

II. Оценка пропускной способности оптического волокна (представлена на расчетном примере с оптическим кабелем типа ОМЗКГ-10-1-0,7-4, заданная длина линии 40 км)

Максимальная скорость передачи информации по выбранному одномодовому оптическому волокну (ОВ) зависит от его дисперсии. Под дисперсией понимают увеличение длительности (расширение) импульса оптического излучения при распространении его по ОВ. Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон ОВ, но и существенно снижает дальность передачи сигналов, так как чем длиннее линия, тем больше расширение импульсов. Таким образом, дисперсия - это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Ненормированную среднеквадратичную дисперсию можно определить по формуле

$$\sigma = 10^{-6} \cdot \Delta\lambda \cdot \sigma_n, \quad [\text{мкс/км}] \quad (\text{A.1})$$

Зададимся в рассматриваемом примере следующими значениями: $\sigma_n = 3.5$ [пс/(нм·км)] - нормированная среднеквадратичная дисперсия; $\Delta\lambda = 4,5$ нм - ширина полосы оптического излучения. Тогда получаем, что $\sigma = 15.75 \cdot 10^{-6}$ мкс/км.

Максимальная скорость передачи информации по выбранному одномодовому ОВ может быть найдена по приближенной формуле

$$B_{\max} \cong \frac{0.25}{\sigma \cdot l_{r, \text{мед}}}, \quad [\text{Мбит/с}] \quad (\text{A.2})$$

где $l_{r,meed}$ - среднее из технических данных значение длины регенерационного участка. Из соображений создания значительного запаса надежности рекомендуется взять $l_{r,meed} = 41,5$ км (см. ниже). Для этого значения по (А.2) получаем: $B_{max} = 382$ Мбит/с. Сравнивая полученную максимальную скорость передачи информации по ОВ B_{max} со скоростью передачи цифрового сигнала в линейном тракте выбранной ВОСП: $B' = 42.240$ Мбит/с, видим, что необходимое условие $B_{max} > B'$ выполняется. Таким образом, параметры выбранного оптического кабеля (ОК) удовлетворяют заданным требованиям.

III. Расчет предельных длин участков регенерации

Длина регенерационного участка (РУ) определяется двумя параметрами: суммарным затуханием линии и дисперсией сигналов ОВ. Длину РУ с учетом только затухания оптического сигнала, т.е. потерь в ОВ, устройствах ввода оптического излучения (как правило, потерь в разъемных соединениях), неразъемных соединениях (сварных соединениях строительных длин кабеля) можно найти из формулы

$$A_{py} - \mathcal{E} = \alpha \cdot l_r + A_p \cdot n_p + A_H \cdot n_H, \text{ [дБ]} \quad (\text{A.3})$$

где A_{py} - затухание оптического сигнала на регенерационном участке, дБ; \mathcal{E} - энергетический потенциал системы передачи, дБ; α - коэффициент затухания ОВ, дБ/км; l_r - длина регенерационного участка, км; A_p, A_H - затухание оптического сигнала на разъемном и неразъемном соединениях соответственно, дБ; n_p, n_H - количество разъемных и неразъемных соединений ОВ на регенерационном участке.

В этой формуле количество неразъемных соединений ОВ на длине регенерационного участка равно

$$n_H = \frac{l_r}{l_c} - 1, \quad (\text{A.4})$$

где l_c - строительная длина ОК. Подставив количество неразъемных соединений на регенерационном участке в уравнение (А.3) при нулевом значении A_{py} , получим

$$\mathcal{E} = \alpha \cdot l_r + A_p \cdot n_p + A_H \cdot \left[\frac{l_r}{l_c} - 1 \right]. \quad (\text{A.5})$$

Отсюда можно выразить длину регенерационного участка

$$l_r = \frac{\mathcal{E} - A_p \cdot n_p + A_H}{\alpha + A_H / l_c}. \quad (\text{A.6})$$

Современные технологии позволяют получать такие значения затухания, как $A_p < 0,5$ дБ, $A_H < 0,1$ дБ. Кроме того, на регенерационном участке количество разъемных соединений должно быть $n_p = 6$. Тогда можно найти максимальную длину регенерационного участка с учетом потерь на затухание в ОВ, потерь в устройствах ввода/вывода оптического сигнала (в разъемных соединителях), потерь в неразъемных сварных соединениях при монтаже строительных длин кабеля:

$$l_{r,max,\alpha} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_\mathcal{E} - A_p \cdot n_p + A_H}{\alpha + A_H / l_c}, \text{ [км]} \quad (\text{A.7})$$

где $\mathcal{E}_\mathcal{E}$ - энергетический (эксплуатационный запас) системы, необходимый для компенсации эффекта старения элементов аппаратуры и ОВ, необходимо взять $\mathcal{E}_\mathcal{E} = 6$ дБм. При проектировании оптической линии передачи энергетический потенциал

ВОСП рассчитывается как разность уровней передачи и минимального уровня приема: $\mathcal{E} = -3 - (-43) = 40$ дБ.

Таким образом, по формуле (А.7) можно вычислить максимальную длину регенерационного участка:

$$l_{r,\max,\alpha} = \frac{40 - 6 - 0,5 \cdot 6 + 0,1}{0,7 + 0,1/2} = 41,5 \text{ км.} \quad (\text{А.8})$$

Длина регенерационного участка ВОСП зависит также и от дисперсии сигнала в ОВ. Максимальная длина РУ с учетом дисперсионных свойств рассчитывается по следующей формуле:

$$l_{r,\max,\sigma} = \frac{0,25}{\sigma \cdot B'} \cdot [\text{км}] \quad (\text{А.9})$$

В рассматриваемом случае, подставляя значения σ и B' в (А.9), находим: $l_{r,\max,\sigma} = 375,8$ км. Таким образом, максимальная длина регенерационного участка составляет наименьшее значение из полученных: 41,5 км, что больше заданной длины волоконно-оптической линии передачи, равной 40 км. Следовательно, на проектируемой линии передачи имеется только один регенерационный участок.

IV. Расчет быстродействия ВОСП

Выбор типа ОК может быть оценен расчетом быстродействия системы и сравнением его с допустимым значением. Быстродействие системы определяется инертностью ее элементов и дисперсионными свойствами ОВ. Полное допустимое быстродействие системы определяется скоростью передачи B' , Мбит/с, способом модуляции оптического излучения, типом линейного кода и определяется по формуле

$$t_{d,\Sigma} = \frac{\beta}{B'}, [\text{нс}] \quad (\text{А.10})$$

где β - коэффициент, учитывающий характер линейного сигнала (вид линейного кода), и он равен 0,7 для кода NRZ. Общее ожидаемое быстродействие ВОСП определяется по формуле

$$t_{o,\Sigma} = 1,111 \cdot \sqrt{t_{OM}^2 + t_{POM}^2 + t_{OB}^2}, [\text{нс}] \quad (\text{А.11})$$

где t_{OM} - быстродействие передающего оптического модуля (ПОМ), зависящее от скорости передачи информации и типа источника излучения,

t_{POM} - быстродействие приемного оптического модуля (ПРОМ), определяемого скоростью передачи информации и типом фотодетектора (ФД),

t_{OB} - уширение импульса на длине РУ: $t_{OB} = \sigma \cdot l_r$.

Допустимое быстродействие системы должно быть не меньше:

$$t_{d,\Sigma} = \frac{0,7}{42,24} = 16,57 \text{ нс.} \quad (\text{А.12})$$

Пусть в нашем примере значения быстродействия модулей ПОМ и ПРОМ соответственно равны 1 нс и 0,8 нс (выбраны распространённые значения). Для создания запаса по надежности следует использовать $l_{r,\max} = 41,5$ км. Тогда в соответствии с (А.11) получаем: $t_{OB} = 15,75 \cdot 10^{-6} \cdot 41,5 = 0,00065$ нс,

$$\text{и } t_{o,\Sigma} = 1,111 \cdot \sqrt{1^2 + 0,8^2 + 0,00065^2} = 1,42, \text{ нс.} \quad (\text{А.13})$$

Так как выбор типа кабеля и длины РУ сделан верно, то стационарное и линейное оборудование проектируемой ВОСП будут обеспечивать передачу линейного сигнала без искажений. Величина $\Delta t = t_{d,\Sigma} - t_{o,\Sigma}$ называется запасом по быстродействию и в рассматриваемом случае равна $\Delta t = 16,57 - 1,42 = 15,15$ нс.

V. Расчет вероятности ошибок ПРОМ

Вероятность ошибок зависит от отношения «сигнал/шум» S/N на входе решающего устройства регенератора. Вероятность ошибок, приходящихся на один регенерационный участок, зависит от типа сети (местная, внутризонавая, магистральная) и определяется по формуле

$$P_{\text{ош.1}} = P_{\text{ош.км}} \cdot l_r, \quad (\text{A.14})$$

где $P_{\text{ош.км}}$ - вероятность ошибок, приходящихся на 1 километр линейного тракта; l_r - длина регенерационного участка, км. Вероятность ошибок, приходящуюся на 1 км линейного тракта, следует принять для магистральной сети 10^{-11} . Так как на линии связи, рассматриваемой в рассматриваемом примере, только один регенерационный участок, то

$$P_{\text{ош.}\Sigma} = P_{\text{ош.км}} \cdot l_r = 10^{-11} \cdot 40 = 4 \cdot 10^{-10}. \quad (\text{A.15})$$

Для рассчитанного значения $P_{\text{ош.}\Sigma}$ по таблице А.2 находим значение характеристики защищенности сигнала от помех на выходе канала ВОСП, обозначенного через A_3 .

Таблица А.2

$P_{\text{ош}}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
A_3 , дБ	13	15,5	17	18	18,9	20	20,7	21,1	21,5	22,2

В рассматриваемом случае $A_3 = 22,2$ дБ. По найденному значению защищенности можно найти отношение сигнал/шум:

$$\varphi(P_{\text{ош.}\Sigma}) = 10^{0,05 \cdot A_3} \quad (\text{A.16})$$

и окончательно: $S/N = \varphi(P_{\text{ош.}\Sigma}) = 10^{0,05 \cdot 22,2} = 12,88$.

VI. Расчет порога чувствительности ПРОМ

Одной из основных характеристик приемника оптического излучения является его чувствительность, т.е. минимальное значение обнаруживаемой (детектируемой) мощности оптического сигнала, при которой обеспечиваются заданные значения отношения сигнал/шум или вероятности ошибок. Минимальная средняя мощность оптического сигнала длительностью $\tau = \frac{1}{B}$ называется минимальной детектируемой мощностью (МДМ). В рассматриваемом случае для $B = B' = 42,24$ Мбит/с получаем $\tau = 23,67$ нс.

Минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе ПРОМ, при которой обеспечиваются заданные отношения сигнал/шум или вероятность ошибок, называется порогом чувствительности. Абсолютный уровень минимальной детектируемой мощности для лавинного ФД можно рассчитать по следующим формулам:

$$P_{\text{min}} = -70 + 10,5 \cdot \lg(B'), \quad (\text{A.17})$$

$$P_{\text{min}} = -70 + 10,5 \cdot \lg 41,5 = -53 \text{ дБ.}$$

Таким образом, минимальная средняя мощность оптического сигнала на входе ПРОМ должна быть больше -53 дБ.

VII. Расчет затухания в соединителях ОВ

Уровень оптической мощности, поступающей на вход ПРОМ, зависит от энергетического потенциала системы, потерь мощности в ОВ, потерь мощности в разъемных и неразъемных соединителях. Потери мощности в ОВ нормируются и во втором окне прозрачности должны составлять 0,7 дБ. Потери мощности в неразъемном соединении также нормируются и должны составлять 0,1 дБм. Потери в разъемном соединителе нормируются и должны составлять 0,5 дБм.

При необходимости возможен следующий оценочный расчёт для потерь в разъемном соединителе, в основе которого лежит следующая сумма:

$$A_p = \sum_{i=1}^N a_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (\text{A.18})$$

где a_1 - потери вследствие радиального смещения на стыке ОВ (рис. А.1); a_2 - потери на угловое рассогласование ОВ (рис. А.2); a_3 - потери на осевое рассогласование ОВ (рис. А.3); a_4 - неучтенные потери.

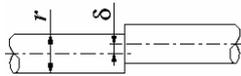


Рис. А.1. Радиальное смещение ОВ

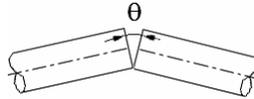


Рис. А.2. Угловое рассогласование ОВ

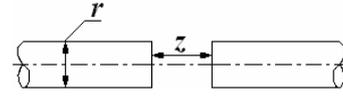


Рис. А.3. Осевое рассогласование ОВ

Потери вследствие радиального смещения в одномодовых ОВ рассчитываются по формуле

$$a_1 = -10 \cdot \lg \left[\exp \left(-\delta^2 / r^2 \right) \right], \quad [\text{дБ}], \quad (\text{A.19})$$

где δ - величина максимального радиального смещения двух ОВ на стыке, обычно берут $\delta = 1,52$ мкм; r - параметр, определяющий диаметр луча, который принимают равным диаметру световедущей части, и $r = 10$ мкм.

Потери вследствие углового рассогласования ОВ следует принять $a_2 = 0,35$ дБ.

Потери вследствие осевого рассогласования определяются формулой

$$a_3 = -10 \cdot \lg \left[1 - \theta_A \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{Z}{2 \cdot r} \right) \right], \quad [\text{дБ}] \quad (\text{A.20})$$

где Z - максимальное расстояние между торцами ОВ, θ_A - апертурный угол. Для одномодовых ОВ можно принять следующие максимальные значения: $Z = 2,95$ мкм, $\theta_A = 3,96$. Неучтенные потери в разъемном соединителе следует принимать равными $a_4 = 0,01$ дБ.

Тогда для рассматриваемого примера будет справедливо:

$$\begin{aligned} a_1 &= -10 \cdot \lg \left[\exp \left(-1,52^2 / 10^2 \right) \right] = 0,1 \text{ дБ}, \\ a_2 &= 0,35 \text{ дБ}, \\ a_3 &= -10 \cdot \lg \left[1 - 3,96 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2,95}{2 \cdot 10} \right) \right] = 0,04 \text{ дБ, и} \\ a_4 &= 0,01 \text{ дБ.} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

При существующих технологиях потери в разъемном соединителе не превышают величины $A_p = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \leq 0,5$ дБ, а в неразъемных соединениях – не более $A_n < 0,1$ дБ.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обзор стандартов, действующих в системах телекоммуникаций

Приведены широко используемые стандарты ITU-T (МСЭ-Т), EIA/TIA, Bellcore и Госстандарта.

VIII. Признанные организации по стандартизации

Практически все ведущие государства мира и крупные корпорации международного уровня имеют институты или комитеты по стандартизации, однако только некоторые из них признаны на международном уровне, а из этих последних только такие организации, как ANSI, Bellcore, EIA, ETSI, IEC, IEEE, ISO, ITU-T и NIST разрабатывают стандарты в области волоконно-оптической техники международного уровня [1].

ANSI (American National Standards Institute) - Американский национальный институт стандартов - частная неправительственная некоммерческая организация, членами которой являются компании - производители оборудования, сетевые операторы и другие.

Bellcore (Bell Communications Research) - Исследовательский центр в области связи компании Bell Telephone (США).

EIA (Electronic Industries Association) - Ассоциация электронной промышленности (США).

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) - Европейский институт стандартов в области связи (ЕЕС, основан в 1988 г.).

IEC (International Electrotechnical Commission) - Международная электротехническая комиссия (МЭК) (основана в 1906 г.).

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ИИЭР) (США).

ISO (International Standards Organization) или International Organization for Standardization - Международная организация по стандартизации (МОС, основана в 1946 г.) - организация, разрабатывающая международные стандарты во всех областях, кроме электроники и электротехники, которые готовит МЭК (IEC).

ITU (The (United Nations) International Telecommunications Union) - Международный Союз Электросвязи (МСЭ) - Агентство ООН (Комитеты ССИК и ITU-T, заменивший с 1.3-93 Комиссию ССПТ - МККТТ).

ITU-T (The ITU Telecommunication Standardization Sector) - Сектор стандартизации электросвязи МСЭ - постоянный орган по стандартизации в области электросвязи МСЭ с 1.3-93.

NIST (National Institute of Standards and Technology) - Национальный институт стандартов и технологий – официальный орган по разработке и утверждению стандартов в США (до 1988 года назывался Национальным бюро стандартов), часть Департамента торговли США.

Госстандарт СССР, в настоящее время Государственный Комитет РФ по стандартизации, метрологии и сертификации.

IX. *Стандарты на оптическое волокно и кабель*

Описывают различные методы и процедуры испытаний одномодового и многомодового ОВ, оценки различных параметров и их предельных значений, а также свойств ОВ и ОК, в том числе волокон с градиентным профилем показателя преломления, минимизированного по затуханию, со сдвигом дисперсии. Посвящены различным аспектам технологии изготовления, тестирования и маркировки ОВ и ОК. Широко используются при разработке измерительных приборов и новых методов тестирования ОВ и ОК.

1. ITU-T Rec. G.650 - Definition and Test Methods for the Relevant Parameters of Single-Mode Fibers (4.97).
2. ITU-T Rec G.651 - Characteristics of a 50/125 (µm Multimode Graded Index Optical Fiber Cable (2.98).
3. ITU-T Rec. G.652 - Characteristics of a Single-Mode Optical Fiber Cable (4.97).
4. ITU-T Rec G.653 - Characteristics of a Dispersion-Shifted Single-Mode Optical Fiber Cable (4.97).
5. ITU-T Rec. G.654 Characteristics of a 1550 nm Wavelength Loss-Mini mixed Single-Mode Optical Fiber Cable (4.97).
6. ITU-T Rec. G.655 - Characteristics of a Non-Zero Dispersion Shifted Single-Mode Optical Fiber Cable (10.96).
7. EIA/TIA-455-A Standard Test Procedure for Fiber Optic Fibers, Cables, Transducers, Sensors, Connecting and Terminating Devices, and Other Fiber Optic Components (1991).
8. EIA/TIA-458-B - Standard Optical Fiber Material Classes and Preferred Sizes (4.90).
9. EIA-472 - Generic Specification for Fiber Optic Cables (3.85).
10. EIA-4920000-A - Generic Specification for Optical Waveguide Fibers (3.87).
11. EIA-492A000 - Sectional Specification for Class Ia Multimode, Graded-Index Optical Waveguide Fibers (8.87).
12. EIA/ПА-492AAAA - Detail Specification for 62.5-UM Core Diameter/125-UM Cladding Diameter Class Ia Multimode, Graded-Index Optical Waveguide Fibers (2.89).
13. EIA-492B000 - Sectional Specification for Class IV Single-Mode Optical Waveguide Fibers (5.88).
14. EIA/TIA-526-2 - OFSTR-2, Effective Transmitter Output Power Coupled into Single-Mode Fiber optic Cable (10.89).
15. EIA/TIA-587 - Fiber Optic Graphic Symbols (4.92).
16. EIA/TIA-598 – Color Coding of Fiber Optic Cables (4.92).
17. EIA, JEDEC, and TIA Standards and Engineering Publications (ежегодный каталог стандартов The Electronic Industries Association).
18. TR-T5Y-000020. - Optical Fiber and Cable.
19. TR-TSY-000761 - Chromatic Dispersion Test Sets.
20. ГОСТ Р МЭК 793-1-93 Волокна оптические. Общие технические требования.

X. Стандарты на характеристики пассивных оптических элементов

Эта группа стандартов регламентирует общие характеристики передачи пассивных элементов, а также параметры оптических соединителей и муфт.

21. ITU-T Rec. 0.671 - Transmission characteristics of passive optical components (11.96).
22. ITU-T Rec. L.36 - Single mode fiber optic connectors (10.98).
23. ITU-T Rec. L.37 - Fiber optic (non-wavelength selective) branching devices (10.98).
24. EIA/TIA-475-B - Generic Specification for Fiber Optic Connectors (8.89).
25. EIA-515000 -Generic Specification for Optical Fiber and Cable Splices (1987).
26. TR-TSY-000326. - Fiber Optic Connectors for Single Mode Optical Fibers.
27. Стандарт МЭК 874 Основные рабочие характеристики оптических разъёмов.

XI. Стандарты на характеристики оптических функциональных блоков и систем

Здесь регламентируются характеристики ОУ, интерфейсы оптических систем с ОУ и мультиплексорами SDH, оптоволоконные терминальные устройства. Имеются стандарты на проектирование ВОСП, использующих одномодовые ОВ. Регламентируются некоторые вопросы обеспечения надежности оптоэлектронных устройств и методы измерения основных параметров оборудования ВОСП.

28. ITU-T Rec. G.661 – Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical fiber amplifiers (10.98). {Рекомендация МСЭ-Т G.661 Определение и методы испытаний основных параметров волоконно-оптических усилителей. }
29. ITU-T Rec. G.662 - Generic characteristics of optical fiber amplifier devices and sub-systems (10.98). {Рекомендация МСЭ-Т G.662 Основные характеристики приборов и подсистем на базе оптических волоконных усилителей. }
30. ITU-T Rec.G-663-Application related aspects of optical fiber amplifier devices and sub-systems (10.96). {Рекомендация МСЭ-Т G.663 Аспекты применения приборов и подсистем на базе оптических волоконных усилителей. }
31. ITU-T Rec. G.681 - Functional characteristics of interoffice and long-haul line systems using optical amplifiers, including optical multiplexers (10.96). {Рекомендация МСЭ-Т G.681 Функциональные характеристики внутристанционных и линейных систем большой протяженности, использующих оптические усилители, включая оптическое мультиплексирование. }
32. ITU-T Rec. G.691 - Optical interfaces for single channel SDH systems with optical amplifiers and STM-64 systems (former G._{scs}). {Рекомендация МСЭ-Т G.691 Оптические стыки для одноканальных систем с оптическими усилителями. }
33. ITU-T Rec. G.692 - Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers (former G._{msc}) (10.98). {Рекомендация МСЭ-Т G.692 Оптические стыки для многоканальных систем с оптическими усилителями. }
34. EIA-509 - Generic Specification for Fiber Optic Terminal Devices (9.84).
35. EIA/TIA-526-3 - OFSTR-3, Fiber Optic Terminal Equipment Receiver Sensitivity and Maximum Receiver Input (10.89).
36. EIA/TIA-526-11 - OFSTR-11, Measurement of Single-Reflection Power Penalty for Fiber Optic Terminal Equipment (11.91).

37. EIA/TIA-559 - Single-Mode Fiber Optic System Transmission Design (3-89).
38. EIA/TIA-559-1 - Single-Mode Fiber Optic System Transmission Design (10.92).
39. TR-TSY-000468. - Reliability Assurance Practices for Optoelectronic Devices.
40. ГОСТ 28871-90. Аппаратура линейных трактов цифровых волоконно-оптических систем передачи. Методы измерения основных параметров.

ХII. Стандарты на оптические транспортные сети и ВОЛС

Регламентируются общие вопросы и архитектура оптических транспортных сетей, характеристики, интерфейсы и регенераторы подводных ВОЛС, а также процедура тестирования ВОЛС и цифровых ВОСП.

Общие вопросы

41. РД «Основные положения развития взаимосвязанной сети связи Российской Федерации на перспективу до 2005 года», кн. 1,2, М., 1996.
42. РД «Правила технической эксплуатации первичной сети взаимосвязанной сети связи Российской Федерации», кн. 1,2, М., 1998.
43. "Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей". Введены в действие приказом Минсвязи России от 10.08.96 г. № 92.
44. Инструкция по паспортизации волоконно-оптических линий связи с использованием ЦСП СЦИ, М., 1997.
45. ОСТ 45-119-98 Пункты регенерационные волоконно-оптических линий передачи. Общие требования безопасности.
46. ГОСТ Р 50723-94 «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий».
47. Рекомендация МСЭ-Т G.701 Словарь терминов по цифровой передаче, цифровому группообразованию и импульсно-кодовой модуляции (ИКМ).
48. Рекомендация МСЭ-Т G.702 Цифровые иерархические скорости передачи.
49. Рекомендация МСЭ-Т G.703 Физические и электрические характеристики иерархических цифровых стыков.
50. Рекомендация МСЭ-Т G.802 Взаимодействие между сетями, построенными на различных цифровых иерархиях и законах кодирования речевых сигналов.
51. Рекомендация МСЭ-Т G.955 Цифровые линейные системы, базирующиеся на иерархии 1544 кбит/с и 2048 кбит/с, на волоконно-оптических кабелях.
52. Рекомендация МСЭ-Т М.20 Концепция технической эксплуатации сетей электросвязи.
53. Рекомендация МСЭ-Т М.2100 Допустимые пределы показателей ошибок при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных цифровых трактов, участков и систем передачи.
54. Рекомендация МСЭ-Т М.2110 Ввод в эксплуатацию международных цифровых трактов, участков и систем передачи.
55. Рекомендация МСЭ-Т М.80 Главные руководящие станции.
56. Рекомендация МСЭ-Т М.90 Вспомогательные руководящие станции.
Плезиохронная и синхронная цифровые сети
57. ITU-T Rec. G.871 - Framework for Optical Networking Recommendation (Optical Transmission).

58. ITU-T Rec. G.872 - Architecture of optical transport networks (2.99).
59. ITU-T Rec. G.911 - Parameters and Calculation Methodologies for Reliability and Availability of Fiber Optic Systems (4.97).
60. ITU-T Rec. G.957 - Optical Interfaces for Equipments and Systems Relating to the SDH (7.95).
61. ITU-T Rec. G.958 - Digital Line Systems based on the SDH for Use on Optical Fiber Cables (11.94).
62. ITU-T Rec. G.959.1 - Physical Layer Aspects of Optical Networks (2.98).
63. ITU-T Rec. G.971 - General Features of Optical Fiber Submarine Cable Systems (11.96).
64. ITU-T Rec. G.972 - Definition of Terms Relevant to Optical Fiber Submarine Cable Systems (4.97).
65. ITU-T Rec. G.973 - Characteristics of Repeaterless Optical Fiber Submarine Cable Systems (11-96).
66. ITU-T Rec. G.974 - Characteristics of Regenerative Optical Fiber Submarine Cable-Systems (3.93).
67. ITU-T Rec. G.975 - Forward Error Correction for Submarine Systems Optical Line Systems for Local and Access Networks (11.96).
68. ITU-T Rec. G.976 - Test methods applicable to optical fiber submarine cable systems (4.97).
69. ITU-T Rec. G.981 - PDH Optical Line Systems for the Local Networks (1.94).
70. ITU-T Rec. G.982 - Optical Access Networks to Support Services up to the ISDN Primary Rate or Equivalent Bit Rates (11.96).
71. ITU-T Rec. G.983.1 Broadband optical access systems based on Passive Optical Network (10.98).
72. EIA/TIA-526 - Standard Test Procedures for Fiber Optic Systems (9.92).
73. EIA/TIA-526-10 - OFSTR-10, Measurement of Dispersion Power Penalty in Digital Single-Mode Systems (10.93).
74. Руководящий технический материал по применению систем и аппаратуры синхронной цифровой иерархии на сети связи Российской Федерации. ЦНИИС, 1994 г. Принято Решением ГКЭС от 5.03.94 г. № 74.
75. ОСТ 45.104-97 "Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Классификация и основные параметры".
76. Временная инструкция по эксплуатации ЦСП СЦИ, М., 1997.
77. Временные указания по проведению измерений на аппаратуре цифровых систем передачи синхронной цифровой иерархии. М., 1998.
78. ГОСТ 26886-86 "Стыки цифровых каналов передачи и групповых трактов первичной сети ЕАСС. Основные параметры".
79. ОСТ 45.90-96 "Стыки цифровых каналов и групповых трактов первичной сети взаимовязанной сети связи Российской Федерации. Методы испытания основных параметров".
80. ОСТ 45.131-98. Стык оптический систем передачи СЦИ. Методы испытаний основных параметров.
81. Рекомендация МСЭ-Т G.704 Синхронные структуры циклов для первичного и вторичного иерархических уровней. Новая редакция: Синхронные структуры

- циклов для иерархических уровней на 1544, 6312, 2048, 8448 и 44736 кбит/с.
82. Рекомендация МСЭ-Т G.707 Стык сетевого узла для синхронной цифровой иерархии.
 83. Рекомендация МСЭ-Т G.773 Комплект протоколов для Q интерфейсов для управления системами передачи.
 84. Рекомендация МСЭ-Т G.774 Информационная модель СЦИ как элемент сети.
 85. Рекомендация МСЭ-Т G.780 Словарь терминов для сетей и аппаратуры синхронной цифровой иерархии.
 86. Рекомендация МСЭ-Т G.783 Характеристики функциональных блоков аппаратуры СЦИ.
 87. Рекомендация МСЭ-Т G.784 Управление синхронной цифровой иерархией.
 88. Рекомендация МСЭ-Т G.785 Характеристики гибкого мультиплексора в СЦИ.
 89. Рекомендация МСЭ-Т G.803 Архитектуры транспортных сетей на базе СЦИ.
 90. Рекомендация МСЭ-Т G.831 Возможности управления транспортными сетями, основанными на синхронной цифровой иерархии.
 91. Рекомендация МСЭ-Т G.841 Тип и характеристики архитектуры резервирования сети СЦИ.
 92. Рекомендация МСЭ-Т G.957 Оптические стыки для аппаратуры и систем передачи, относящихся к СЦИ.
 93. Рекомендация МСЭ-Т G.958 Цифровые линейные системы, базирующиеся на СЦИ и предназначенные для работы на оптико-волоконных кабелях.
 94. Рекомендация МСЭ-Т М.2101 Допустимые пределы показателей ошибок при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных трактов СЦИ и секций мультиплексирования.
 95. Рекомендация МСЭ-Т О.181 Аппаратура оценки показателей ошибок на стыках СТМ-N.
 96. Указания по проведению измерений на аппаратуре оконечных станций, линейных и сетевых трактах цифровых систем передачи плезиохронной цифровой иерархии, М., 1997.
 97. Рекомендация МСЭ-Т О.171 Аппаратура для измерения дрожания и дрейфа фазы в цифровых системах, основанных на плезиохронной цифровой иерархии.

По системам синхронизации, управлению и технической эксплуатации

98. РТМ по построению тактовой сетевой синхронизации на цифровой сети связи Российской Федерации. ЦНИИС, 1995 г. Принято Решением ГКЭС России от 1.11.95 г. № 133.
99. Рекомендация МСЭ-Т G.706 Процедуры цикловой синхронизации и циклического контроля по избыточности (CRC), относящиеся к основным структурам циклов, определенным в Рек. G.704.
100. Рекомендация МСЭ-Т G.810 Термины и определения, относящиеся к синхронизации сетей.
101. Рекомендация МСЭ-Т G.811 Требования к хронированию на выходах первичных эталонных задающих генераторов, пригодных для обеспечения плезиохронной работы международных цифровых трактов.
102. Рекомендация МСЭ-Т G.812 Требования к хронированию на выходах ведомых

задающих генераторов, пригодных для плезиохронной работы международных цифровых трактов.

103. Рекомендация МСЭ-Т G.813 Временные характеристики хронизирующего источника аппаратуры СЦИ.
104. Рекомендация МСЭ-Т G.822 Нормы на частоту управляемых проскальзываний на международном цифровом соединении.
105. Рекомендация МСЭ-Т G.823 Нормирование дрожания и дрейфа фазы в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 кбит/с.
106. Рекомендация МСЭ-Т G.825 Нормирование дрожания и дрейфа фазы в цифровых сетях, основанных на базе СЦИ.
107. Рекомендация МСЭ-Т O.172 Аппаратура измерения фазового дрожания и дрейфа тактовых сигналов в цифровых системах, основанных на синхронной цифровой иерархии.
108. Рекомендация МСЭ-Т M.3010 Принципы организации сети управления электросвязью (TMN).
109. Рекомендация МСЭ-Т M.3200 Обзор услуг управления сети TMN.
110. Рекомендация МСЭ-Т M.3400 Функции управления сети TMN.
111. Рекомендация МСЭ-Т M.60 Термины и определения, относящиеся к технической эксплуатации.

Действующие рекомендации МСЭ-Т по ОКС №7 (Синяя и Белая книги)

112. Общее: Q.700 Введение в систему сигнализации №7 МККТТ (1993).

Подсистема передачи сообщений (МТР)

113. Q.701 Функциональное описание подсистемы передачи сообщений (МТР) системы сигнализации №7 (1993).
114. Q.702 Звено данных сигнализации (1988) Q.703 Звено сигнализации (1993).
115. Q.704 Функции и сообщения сети сигнализации (1993).
116. Q.705 Структура сети сигнализации (1993).
117. Q.706 Рабочие характеристики подсистемы передачи сообщений (1993).
118. Q.707 Испытания и техобслуживание (1988).
119. Q.708 Нумерация кодов международных пунктов сигнализации (1993).
120. Q.709 Гипотетическое эталонное соединение сигнализации (1993).

Упрощенная подсистема передачи сообщений

121. Q.710 Упрощенная версия МТР для малых систем (1988).

Подсистема управления соединением сигнализации (SCCP)

122. Q.711 Функциональное описание подсистемы управления соединением сигнализации (1993).
123. Q.712 Определение и функция сообщений SCCP (1993).
124. Q.713 Форматы и коды SCCP (1993).
125. Q.714 Процедуры подсистемы управления соединением сигнализации (1993).
126. Q.716 Рабочие характеристики подсистемы управления соединением сигнализации (1993).

Подсистема пользователя телефонии (TUP)

127. Q.721 Функциональное описание подсистемы пользователя телефонии ОКС №7 (TUP) (1988).
 128. Q.722 Основные функции телефонных сообщений и сигналов (1988).
 129. Q.723 Форматы и коды (1993).
 130. Q.724 Процедуры сигнализации (1993).
 131. Q.725 Сигнальные характеристики в телефонном приложении (1993).
- Прикладные услуги ISDN
132. Q.730 Прикладные услуги ISDN (1993).
 133. Q.731 Описание уровня 3 для прикладных услуг идентификации номера при использовании ОКС № 7.
 134. Q.731.1 Прямой набор (DDI) (1992).
 135. Q.731.3 Определение номера вызывающей линии (CUP) (1993).
 136. Q.731.4 Запрет идентификации номера вызывающей линии (CLIR) (1993).
 137. Q.731.5 Определение номера вызываемой линии (COLP) (1993).
 138. Q.731.6 Запрет идентификации номера вызываемой линии (COLR) (1993).
 139. Q.731.8 Поадресация (SUB) (1992).
 140. Q.732 Описание уровня 3 для прикладных услуг направления вызова при использовании ОКС № 7.
 141. Q.732.2 Перенаправление вызова при занятости (CFB) (1993).
 142. Q.732.3 Перенаправление вызова при неответе (CFNR) (1993).
 143. Q.732.4 Безусловное перенаправление вызова (CFU) (1993).
 144. Q.732.5 Отклонение вызова (CD) (1993).
 145. Q.733 Описание уровня 3 для прикладных услуг завершения вызова при использовании ОКС № 7.
 146. Q.733.1 Вызов с ожиданием (CW) (1992).
 147. Q.733.2 Удержание вызова (HOLD) (1993).
 148. Q.733.4 Портативность терминала (TP) (1993).
 149. Q.734 Описание уровня 3 для многосторонних прикладных услуг при использовании ОКС № 7.
 150. Q.734.1 Конференц-связь (CONF) (1993).
 151. Q.734.2 Трехсторонняя связь (3PTY) (1993).
 152. Q.735 Описание уровня 3 для прикладных услуг общих интересов при использовании ОКС № 7.
 153. Q.735.1 Замкнутая группа (CUG) (1993).
 154. Q.735.3 Многоуровневые приоритет и прерывание (MLPP) (1993).
 155. Q.737 Описание уровня 3 для прикладных услуг передачи дополнительной информации при использовании ОКС № 7.
 156. Q.737.1 Сигнализация пользователь-пользователь (UUS) (1993).

Подсистема передачи данных (DUP)

157. Q.741 Подсистема передачи данных (DUP) (опубликована как рекомендация X.61) (1988).

Управление системой сигнализации №7

158. Q.750 Обзор управления системой сигнализации №7 (1993).
159. Q.752 Контроль и измерения в сети сигнализации №7 (1993).
160. Q.753 Функции управления MRVT, SRVT и CVT системы сигнализации № 7 и описание пользователя OMASE (1993).
161. Q.754 Описание сервисных прикладных элементов (ASE) (1993).
162. Q.755 Тесты протоколов системы сигнализации №7 (1993).

Подсистемы пользователя ISDN (ISUP)

163. Q.761 Функциональное описание подсистемы пользователя ISDN ОКС №7 (1993).
164. Q.762 Основные функции сообщений и сигналов подсистемы пользователя ISDN ОКС-7 (1993).
165. Q.763 Форматы и коды подсистемы пользователя ISDN ОКС №7 (1993).
166. Q.764 Процедура сигнализации подсистемы пользователя ISDN (1993).
167. Q.766 Рабочие характеристики приложения цифровой сети интегрального обслуживания (1993).
168. Q.767 Применение подсистемы пользователя ISDN системы сигнализации №7 для международных ISDN соединений (1991).

Прикладная подсистема возможностей транзакций (TCAP)

169. Q.771 Функциональное описание возможностей транзакций (1993).
170. Q.772 Описание информационных элементов возможностей транзакций (1993).
171. Q.773 Форматы и кодирование возможностей транзакций (1993).
172. Q.774 Процедура возможностей транзакций (1993).
173. Q.775 Руководство для использования возможностей транзакций (1993).

Спецификации тестирования

174. Q.780 Общее описание спецификаций тестирования ОКС №7 (1993).
175. Q.781 Спецификации тестирования уровня 2 МТР (1993).
176. Q.782 Спецификации тестирования уровня 3 МТР (1993).
177. Q.783 Спецификации тестирования TUP (1988).
178. Q.784 Спецификация тестирования базового вызова ISUP (1991).
179. Q.784A Версия TTCN рекомендации Q.784 (1993).
180. Q.785 Спецификации протоколов тестирования ISUP для прикладных услуг (1991).

Подсистема управления соединением сигнализации

181. Q.786 Система сигнализации №7 - спецификация тестов SCCP (1993).
182. Q.787 Спецификации тестирования возможностей транзакций (ТС) (1993).

Российские материалы и документы

183. Беляев В.Н. Методологические основы тестирования ОКС / Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.
184. Беляев В.Н. Примеры установления базового соединения / Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.
185. Беляев В.Н. Реализация ОКС и ISDN на станции EWSD / Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.

186. Гольдштейн Б.С. Сигнализация в сетях связи. - М.: Радио и связь, 1997.
187. Гольдштейн Б.С. Эволюция систем сигнализации на телефонных сетях/Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.
188. ГОСТ Р 51027-97. Сеть связи цифровая с интеграцией служб. Общие требования к системе общеканальной сигнализации.
189. Дорф И.Г. Подсистема пользователя ISDN-ISUP (Q.767) / Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.
190. Дорф И.Г. Система сигнализации №7 / Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.
191. Мелик-Шахназарова Г.В., Сапарин Ю.В., Сазер А.И. Сигнализация на международных, междугородных и местных сетях связи: Учебное пособие. - Самара, 1995.
192. МККТТ. Рекомендация М.3010. Принципы построения сети управления электросвязью. Женева, 1992.
193. Национальные спецификации подсистемы OMAP. - Утверждены УЭС МС РФ 15.08.1996.
194. Ограничительный перечень протоколов сигнализации, поддерживаемых цифровыми станциями сети общего пользования. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1996.
195. Основные положения по реализации услуг интеллектуальной сети связи на базе ТфОП. - ЦНИИ связи, 1996.
196. Основные положения по структуре сети ОКС 7 для сети связи общего пользования: Руководящий технический материал. - ЦНИИС, ЛОНИИС, РУДН, 1994.
197. Основные положения развития Взаимоувязанной сети связи Российской Федерации на перспективу до 2005 года: Руководящий документ. Книги 1 - 12. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1996.
198. Основные положения системы сигнализации ОКС №7 для сети связи Российской Федерации. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1996.
199. Программа и методика испытаний подсистем ОКС №7. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
200. Программа и методика испытаний подсистемы Mobile Application Part (MAP) (Первая редакция). - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
201. Программа и методика приемочных испытаний ОКС №7 на станциях зононой, междугородной сетей: АМТСЭ, УАКЭ, ОТС. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
202. Программа и методика приемочных испытаний подсистем ОКС №7. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
203. Программа и методика тестирования услуг ЦСИС при взаимодействии абонентов ЦСИС. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
204. Проектирование цифровой городской телефонной сети: Учебное пособие/ Под ред. А.В. Рослякова. - Самара, ПГАТИ, 1998.
205. Руководящий документ по общегосударственной системе автоматизированной телефонной связи (ОГСТФС). Книга 1. - М.: Прейскурантиздат, 1988.
206. Руководящий технический материал по выделению кодов пунктов сигнализации. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
207. Руководящий технический материал по проектированию коммутационного оборудования с функциями ОКС №7 и ЦСИС. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.

208. Руководящий технический материал по расчету сети ОКС №7. - М.: ЦНТИ "Информсвязь", 1998.
209. Система сигнализации ОКС 7 : Учебное пособие/ Под ред. М.А. Жаркова. - М.: ЦНИИС, 1998.
210. Система телефонной сигнализации по общему каналу (система ОКС) / Васильченко А.И., Денисьева О.М., Жарков М.А. и др. / Под ред. М.Н. Стоянова. - М.: Связь, 1980.
211. Системный проект сети ОКС 7 ВСС РФ. Книга 1. Общие принципы построения. - ЦНИИС, ЛОНИИС, 1997.
212. Системный проект сети ОКС 7 ВСС РФ. Книга 2. Общесистемные функциональные и технические положения. - ЦНИИС, ЛОНИИС, 1997.
213. Схема опытной зоны испытаний и внедрения системы ОКС N97, услуг интегральной сети и сетей подвижной связи. Приложение В к приказу Министра связи России от 11.03.95, № 38.
214. Технические спецификации взаимодействия с системами сигнализации национальной сети России, включая специфические национальные процедуры и сообщения. - Утверждены МС РФ 21.10.1994 г.
215. Технические спецификации на подсистему возможностей транзакций (ТС) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 21.10.1994 г.
216. Технические спецификации на подсистему передачи сообщений (МТР) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
217. Технические спецификации на подсистему пользователя ISDN (ISUP) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
218. Технические спецификации на подсистему управления соединением сигнализации (SCCP) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
219. Технические спецификации на тестовые процедуры на подсистему возможностей транзакций (ТС) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
220. Технические спецификации на тестовые процедуры на подсистему передачи сообщений (МТР) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
221. Технические спецификации на тестовые процедуры на подсистему пользователя ISDN (ISUP) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
222. Технические спецификации на тестовые процедуры на подсистему управления соединением сигнализации (SCCP) для национальной сети России. - Утверждены МС РФ 28.12.1994 г.
223. Технические спецификации протокола INAP системы сигнализации ОКС №7 для сети связи России (INAP-R). - М.: МС РФ, 1997.
224. Харитоновна Е.П. Существующие системы сигнализации. Национальные особенности СС7: Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМ-СЕТ, 1996.
225. Цифровая коммутационная система EWSD: Учебное пособие. – Самара: СМТС, 1997.

226. Чекмарева Е.В. Особенности системы сигнализации №7 для сетей подвижной связи. Подсистема MAP: Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.
227. Шварц М. Сети связи: Протоколы, моделирование и анализ. Ч. 1 и 2. - М.: Наука, 1992.
228. Шнепс-Шнеппе М.А. Интеллектуальная сеть: основные понятия, услуги IN CSI использование SS7 в протоколе INAP: Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1997.
229. Шнепс-Шнеппе М.А. Интеллектуальные сети: Материалы курсов "Новые технологии связи". - М.: НТЦ КОМСЕТ, 1996.

XIII. Стандарты на конструкцию, прокладку и защиту ОК и других элементов ВОЛС

Регламентируются различные методы прокладки ОК (наземные, подземные и воздушные: в том числе с размещением ОК в грозотросе), защиты закапываемого в землю ОК, стыковки отдельных участков ВОЛС и методы измерения параметров кабеля ВОЛС под нагрузкой.

230. ITU-T Rec. L.10 - Optical fiber cables for duct, tunnel, aerial and buried application (11.88).
231. ITU-T Rec. L.12 - Optical fiber joints (7.92).
232. ITU-T Rec. L.13 - Sheath joints and organizers of optical fiber cables in the outside plant (7.92).
233. ITU-T Rec. L.14 - Measurement method to determine the tensile performance of optical fiber cables under load (7.92).
234. ITU-T Rec. L.15 - Optical local distribution networks - Factors to be considered for their construction (3.93).
235. ITU-T Rec. L.17 - Implementation of connecting customers into the public switched telephone network (PSTN) via optical fibers (6.95); App, 1 - Examples of possible applications (2.97).
236. ITU-T Rec. L.25 - Optical fiber cable network maintenance (10.96).
237. ITU-T Rec. L.26 - Optical fiber cable for aerial application (10.96).
238. ITU-T Rec. L.27 - Method of estimating the concentration of hydrogen in optical fiber cables (10.96).
239. ITU-T Rec. L.31 - Optical fiber attenuators (10.96).
240. ITU-T Rec. L.34 - Installation of Optical Fiber Ground Wire (OPGW) cable (10.98).
241. ITU-T Rec. L.35 - Installation of optical fiber cables in the access network (10.98).
242. EIA/TIA-526-14 - OFSTR-14, Optical Power Loss Measurements of Installed Multimode Fiber Cable Plant (11.90).
243. EIA/TIA-590 - Standard for Physical Location and Protection of Below-Ground Fiber Optic Cable Plant (7.91).

XIV. Стандарты на оптические инструменты и системные измерения

Рассматривается комплекс измерений по определению параметров дрожания фазы, приведены спецификации и общие требования к полевым портативным измеритель-

ным приборам и устройствам для измерения параметров ВОЛС и ВОСП. Описаны методы измерений и характеристики оптических рефлектометров, оптических измерителей мощности, стабилизированных источников излучения и других специализированных инструментов и устройств.

244. EIA/TIA-526-15 - OFSTR-15, Jitter Tolerance Measurement (2.93).
245. EIA/TIA-526-16 - OFSTR-16, Jitter Tolerance Function Measurement (2.93).
246. EIA/TIA-526-17-OFSTR-17, Output Jitter Measurement (5.93).
247. EIA/TIA-526-18 - OFSTR-18 Systematic Jitter Generation Measurement (5.93).
248. EIA/TIA-5430000 - Generic Specification: Field Portable Electronic Instruments for Optical Fiber System (3.89).
249. EIA-5460000 - Generic Specification for a Field Optical Inspection Device (9.88).
250. EIA/TIA-573 - Generic Specification for Field-Portable Fiber Optic Tools (7.93).
251. TR-TSY-000196. - Optical Time Domain Reflectometers.
252. TR-TSY-000198. - Optical Loss Test Sets.
253. TR-TSY-000264. - Optical Fiber Cleaving Tools.
254. TR-TSY-000765. - Spacing Systems for Single Mode Optical Fibers.
255. TR-TSY-000886. - Optical Power Meters.
256. TR-TSY-000887. - Stabilized Light Sources.
257. TR-TSY-001028- - Optical Continuous Wave Reflectometers.

Надёжность и метрология

258. ОСТ 45.63-96 "Обеспечение надежности средств электросвязи. Основные положения".
259. ОСТ 45.64-96 "Организация ремонта средств электросвязи. Основные положения".
260. ОСТ 45.65-96 "Методика расчета среднего времени восстановления оборудования электросвязи".
261. ОСТ 45.66-96 "Запасные части, инструменты и принадлежности средств электросвязи. Общие требования".
262. ОСТ 45.91-96 "Измерители показателей ошибок в цифровых каналах и трактах передачи. Технические требования. Методы испытаний".
263. Рекомендации по аварийно-восстановительным работам на поврежденном оптическом кабеле на базе временных оптических кабельных вставок. Утверждено Госкомсвязи России, 1997.
264. Концепция восстановления волоконно-оптических линий передачи в чрезвычайных ситуациях, ОАО «Ростелеком», М., 1998.
265. Типовая инструкция по восстановлению ВОЛП-ВЛ в чрезвычайных ситуациях, ОАО Ростелеком, М., 1999.
266. Типовая инструкция по восстановлению НРП ВОЛП в чрезвычайных ситуациях, ОАО Ростелеком, М., 1999.
267. Типовая инструкция по восстановлению системы электропитания и электрообеспечения НРП ВОЛП в чрезвычайных ситуациях, ОАО Ростелеком, М., 1999.
268. Типовая инструкция по восстановлению оптического кабеля ВОЛП в чрезвычайных ситуациях, ОАО Ростелеком, М., 1999.
269. Рекомендация МСЭ-Т G.772 Защищенные контрольные точки, предусмотрен-

ные в цифровых системах передачи.

270. Рекомендация МСЭ-Т G.775 Потеря сигнала и сигнал индикации аварийного состояния, определение дефекта и критерий устранения повреждения.
271. Рекомендация МСЭ-Т G.821 Характеристика ошибок на международном цифровом соединении, образуемом в цифровой сети, с интеграцией служб.
272. Рекомендация МСЭ-Т G.826 Показатели ошибок и нормы для цифровых международных трактов с постоянной скоростью передачи, равной или превышающей первичную скорость.
273. Рекомендация МСЭ-Т G.827 Параметры готовности и нормы для элементов международных цифровых трактов, работающих на постоянной скорости передачи, равной или превышающей первичную скорость.
274. Рекомендация МСЭ-Т G.911 Характеристики и методология расчета надежности и готовности волоконно-оптических систем.
275. Рекомендация МСЭ-Т M.2120 Процедуры обнаружения и локализации отказов цифрового тракта, участка и системы передачи.
276. Рекомендация МСЭ-Т M.2130 Эксплуатационные процедуры по локализации и устранению отказов передачи.
277. Рекомендация МСЭ-Т O.150 Основные требования для измерителей качественных показателей цифровой аппаратуры передачи.
278. Рекомендация МСЭ-Т O.151 Аппаратура для измерения показателей ошибок в цифровых системах на первичной скорости передачи и выше.
279. Рекомендация МСЭ-Т O.152 Измерительная аппаратура для скоростей передачи 64 кбит/с и $N \times 64$ кбит/с.

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Типовая методика оценки надёжности оптоволоконных систем передач

XV. Базовые термины и определения

Под *надёжностью* элемента (системы) понимают его способность выполнять заданные функции с заданным качеством в течение некоторого промежутка времени в определённых условиях. Изменение состояния элемента (системы), которое влечёт за собой потерю указанного свойства, называется *отказом*. Надёжность работы ВОСП - это свойство волоконно-оптической системы обеспечивать возможность передачи требуемой информации с заданным качеством в течение определённого промежутка времени. ВОСП в общем случае должна рассматриваться как система, состоящая из двух совместно работающих сооружений - линейного и станционного. Каждое из этих сооружений может рассматриваться как самостоятельная система. В теории надёжности используются следующие понятия:

- *отказ* - повреждение ВОСП с перерывом связи по одному, множеству или всем каналам связи;
- *неисправность* - повреждение, не вызывающее закрытия связи, характеризуемое состоянием линии, при котором значения одного или нескольких параметров не удовлетворяют заданным НТД нормам;
- *среднее время между отказами (наработка на отказ)* - среднее время между отказами, выраженное в часах;
- *среднее время восстановления связи* - среднее время перерыва связи, выраженное в часах;
- *интенсивность отказов* - среднее число отказов в единицу времени (1/ч);
- *вероятность безотказной работы* - вероятность того, что в заданный интервал времени не возникнет отказ;
- *коэффициент готовности* - вероятность нахождения линии передачи в исправном состоянии (в произвольно выбранный момент времени);
- *коэффициент простоя* - вероятность нахождения линии передачи в состоянии отказа (в произвольно выбранный момент времени).

Интервал времени от момента включения элемента (системы) до его первого отказа является случайной величиной, называемой *временем безотказной работы*. Интегральная функция распределения этой случайной величины, представляющая собой вероятность того, что время безотказной работы будет менее t , обозначается $P_{от}(t)$ и имеет смысл вероятности отказа на интервале $(0... t)$. Вероятность противоположного события - безотказной работы на этом интервале - равна $Q = 1 - P_{от}(t)$.

Удобной мерой надёжности элементов и систем является интенсивность отказов $\lambda_{от}(t)$, представляющая собой условную плотность вероятности отказа в момент времени t , при условии, что до этого момента отказов не было. Между функциями $\lambda_{от}(t)$ и $Q(t)$ существует взаимосвязь:

$$Q(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_{\text{от}}(x) \cdot dx \right]. \quad (\text{C.1})$$

В период нормальной эксплуатации (после приработки, но ещё до того, как наступит физический износ системы) интенсивность отказов примерно постоянна $\lambda_{\text{от}}(t) \cong \text{const}$, и

$$Q(t) = \exp[-\lambda_{\text{от}} \cdot t]. \quad (\text{C.2})$$

Таким образом, постоянной интенсивности отказов, характерной для периода нормальной эксплуатации, соответствует экспоненциальное уменьшение вероятности безотказной работы с течением времени. Среднее время безотказной работы находят как математическое ожидание случайной величины:

$$t_{\text{ср}} = (\lambda_{\text{от}})^{-1} \int_0^{\infty} t \cdot \exp(-\lambda_{\text{от}} \cdot t) \cdot dt. \quad (\text{C.3})$$

Оценим надёжность некоторой сложной системы, состоящей из множества разнотипных элементов. Пусть $Q_1(t)$; $Q_2(t)$; ..., $Q_n(t)$ - вероятности безотказной работы каждого элемента на интервале времени $(0...t)$, n - число элементов в системе. Если отказы отдельных элементов происходят независимо, а отказ хотя бы одного элемента ведёт к отказу всей системы (такой вид соединения элементов называется последовательным), то вероятность безотказной работы системы в целом равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных её элементов:

$$Q_{\text{sys}} = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_{\text{от},i} \cdot t) = \exp(-\Lambda_{\text{sys}} \cdot t), \quad (\text{C.4})$$

где $\Lambda_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{от},i}$ - интенсивность отказов системы; $\lambda_{\text{от},i}$ - интенсивность отказов i -го элемента. Среднее время безотказной работы системы равно

$$t_{m,\text{sys}} = \frac{1}{\Lambda_{\text{sys}}}. \quad (\text{C.5})$$

К числу основных характеристик надёжности восстанавливаемых элементов и систем относится коэффициент готовности

$$K_{\text{ред}} = \frac{t_{m,\text{sys}}}{t_{m,\text{sys}} + t_{r,\text{sys}}}, \quad (\text{C.6})$$

где $t_{r,\text{sys}}$ - среднее время восстановления элемента (системы). Коэффициент готовности соответствует вероятности того, что элемент (система) будет работоспособен в любой момент времени.

XVI. Типовой пример оценки надёжности ВОСП

На основе выражения (C.4) интенсивность отказов оптической линии передачи определяют как сумму интенсивностей отказов входящих компонентов:

$$\Lambda_{\text{sys}} = \lambda_{\text{от},\text{ак}} \cdot n_{\text{ак}} + \lambda_{\text{от},\text{пасс}} \cdot n_{\text{пасс}} + \lambda_{\text{от},\text{ОК}} \cdot L_{\text{ОК}}, \quad (\text{C.7})$$

где $\lambda_{\text{от},\text{ак}}$, $\lambda_{\text{от},\text{пасс}}$ - интенсивности отказов соответственно активных и пассивных компонентов; $n_{\text{ак}}$, $n_{\text{пасс}}$ - количество соответственно перечисленных компонентов; $\lambda_{\text{от},\text{ОК}}$ - интенсивность отказов одного километра кабеля; $L_{\text{ОК}}$ - протяженность оптической

линии передачи. Значения необходимых для расчётов параметров следует взять из табл. С.1.

Таблица С.1

Параметр	Активный компонент		Пассивный компонент		Оптический кабель (на 1 км)
	PDH	SDH	PDH	SDH	
$\lambda_{от, 1/ч}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$
$t, ч$	0,5	0,1	4,0	3,5	5,0

Рассматриваемая в данном примере ВОСП состоит из двух пассивных компонентов и оптического кабеля и не содержит активных компонентов (см. пример Приложения А), поэтому

$$\Lambda_{sys} = 3 \cdot 10^{-8} \cdot 2 + 5 \cdot 10^{-8} \cdot 40 = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Среднее время безотказной работы оптической линии передачи оказывается равным

$$t_{m,sys} = \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-6}} = 454545,45 \text{ час} \cong 51,9 \text{ лет.}$$

Вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени должна рассчитываться по формуле (С.4) для следующих промежутков времени: $t_1 = 24$ часа (сутки), $t_2 = 168$ часов (неделя), $t_3 = 720$ часов (месяц) и $t_4 = 8760$ часов (год).

Для t_1 можно записать:

$$Q_{sys,1} = \exp(-2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 24) = 0,999947;$$

для t_2 :

$$Q_{sys,2} = \exp(-2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 168) = 0,99963;$$

для t_3 :

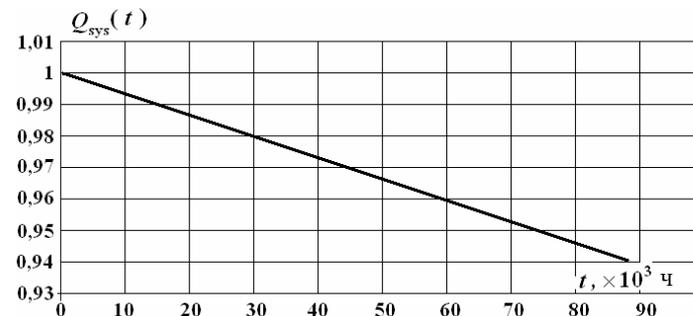
$$Q_{sys,3} = \exp(-2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 720) = 0,99842;$$

для t_4 :

$$Q_{sys,4} = \exp(-2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 8760) = 0,98091.$$

XVII. Зависимость вероятности безотказной работы оптической линии передачи от времени

Согласно представленным выше расчётам имеет место следующая зависимость:



Среднее время восстановления оптической линии передачи, рассматриваемой в настоящем примере, оказывается равным

$$t_{r,sys} = (\lambda_{от,pass} \cdot n_{pass} \cdot t_{r,pass} + \lambda_{от,OK} \cdot L_{OK} \cdot t_{r,OK}) / \Lambda_{sys} ,$$

где $t_{r,pass}$, $t_{r,OK}$ – время восстановления соответственно пассивных компонентов и оптического кабеля. В рассматриваемом примере

$$t_{r,sys} = (1 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 0,5 + 5 \cdot 10^{-8} \cdot 40 \cdot 5) / 2,2 \cdot 10^{-6} = 4,59 \text{ ч.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ D

Квантовый предел детектирования

Приведена оценка значения минимальной оптической мощности, необходимой для распознавания одного бита в цифровой системе передачи.

XVIII. Дробовой шум в идеальной системе передачи

Падающий на фотодиод стационарный световой поток генерирует пары носителей заряда как независимые случайные события. Такой процесс преобразования фотонов подчиняется статистике Пуассона [13, 37]. Если за некоторый отрезок времени на фотодиод упадет оптическая энергия, равная в среднем ε_R , то следует ожидать, что будет создано N пар носителей заряда, причем

$$N = \eta \cdot \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_\Phi} = \eta \cdot \frac{\varepsilon_R \cdot \lambda}{hc}. \quad (D.1)$$

Здесь η - конструктивный параметр фотодиода, именуемый квантовой эффективностью взаимодействия, ε_Φ - энергия фотона.

Вследствие статистической природы взаимодействия фотонов с фотопроводником истинное число пар носителей заряда, генерируемых каждым оптическим импульсом, будет изменяться вокруг среднего значения. Вероятность того, что число созданных пар носителей заряда равно k , определяется пуассоновским распределением вероятности:

$$P(k|N) = \frac{N^k}{k!} \cdot \exp(-N). \quad (D.2)$$

В этом случае среднеквадратическое отклонение от среднего значения N (дисперсия) будет также равно N . В идеальной системе связи это изменение числа генерируемых пар носителей заряда - единственный источник шума. Кроме того, в такой системе оптическая энергия принимается, а носители заряда во входной цепи приёмника генерируются только тогда, когда передается 1. Если приемник достаточно чувствителен, чтобы обнаружить единственную электронно-дырочную пару, созданную светом, то порог может быть установлен на этом уровне. И не возникнет никакой ошибки при передаче 0, поскольку в этом случае не будет приниматься никакая энергия или генерироваться какой-либо сигнал. Только когда упавшая на фотоприемник оптическая энергия, соответствующая 1, вообще не генерирует какие-либо носители заряда, тогда вместо ожидаемого числа N записывается ошибка. Дальнейшие выкладки соответствуют случаю равновероятного появления логических 0 и 1.

Воспользовавшись распределением Пуассона, находим:

$$PE = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{N^{0!} \cdot \exp(-N)}{0!} + 0 \right] = \frac{1}{2} \cdot \exp(-N). \quad (D.3)$$

Для получения $PE < 10^{-9}$ необходимо потреблять $N > 20$ штук фотонов, следовательно:

$$\varepsilon_R = \frac{N \cdot \varepsilon_\Phi}{\eta} > \frac{20 \cdot \varepsilon_\Phi}{\eta}. \quad (D.4)$$

В таком случае минимальная средняя мощность на входе фотоприемника

$$\bar{\Phi}_R = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_R \cdot B > \frac{10 \cdot \varepsilon_\Phi \cdot B}{\eta}. \quad (D.5)$$

Найденная величина характеризует абсолютный квантовый предел детектируемости. При $\eta = 1$ и $\lambda = 0,9$ мкм получаем $\varepsilon_\Phi = 1,38$ эВ и $\bar{\Phi}_R > 2,2$ пВт/(Мбит/с). Сравнение этих цифр с реальными значениями показывает, что тепловой шум усилителя приводит к ухудшению чувствительности приёмника, так что требуемый уровень принимаемой мощности оказывается почти на два порядка выше этого квантового предела. Более удобно выразить полученный результат в виде средней принимаемой энергии, приходящейся на один передаваемый бит. Если $\eta = 1$, а 0 и 1 равновероятны, то в соответствии с квантовым пределом детектирования на один бит в среднем приходится 10 принимаемых фотонов.

XIX. Оценка квантового предела при наличии теплового шума

Сравним чувствительность оптического приёмника, в котором преобладает аддитивный гауссов шум [13, 52] с идеальным квантовым пределом детектирования. Пусть усилитель приёмника имеет высокое входное сопротивление или, в случае трансимпедансного усилителя с обратной связью [34], высокие входное сопротивление и сопротивление обратной связи. Требуемая ширина полосы пропускания принимается равной половине скорости передачи данных, т.е. $\Delta f^* = B/2$. Согласно [13], справедливы выражения, характеризующие минимальный ток I_{\min} , необходимый для получения заданного отношения «сигнал/шум» S/N :

$$I > I_{\min} = S/N \cdot \sqrt{\frac{4\pi^2}{3M^2} \cdot (C \cdot V_y^*)^2 \cdot \left(\frac{B}{2}\right)^2 + \frac{(I_y^*)^2}{M^2}} \cdot \sqrt{\frac{B}{2}}, \quad (D.6)$$

где V_y^* и I_y^* - среднеквадратические плотности шумового напряжения и тока, C - входная ёмкость усилителя, M - коэффициент умножения фотодиода.

В свою очередь этот ток связан через чувствительность фотодиода $\mathfrak{R}_{\text{ФД}}$ с требуемой минимальной мощностью на входе приёмника, которая зависит от длины волны и квантовой эффективности η . Если в среднем передается одинаковое число 0 и 1, средний ток \bar{I} и средняя принимаемая мощность $\bar{\Phi}_R$ будут равны половине этих величин, т.е. $\bar{\Phi}_R = \Phi_R/2$ и $\bar{I} = I/2$. Тогда выражение (D.6) преобразуется к виду

$$\bar{I} > \bar{I}_{\min} = \frac{S/N \cdot \sqrt{B}}{2M\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2}{3} \cdot (C \cdot V_y^*)^2 \cdot B + (I_y^*)^2}. \quad (D.7)$$

На рис. D.1 приведена зависимость тока \bar{I}_{\min} от скорости передачи информации B при $S/N = 12$, соответствующая теоретическому пределу, и $M = 1$, что равносильно использованию $p-i-n$ -фотодиода.

Взяты те же значения шумовых параметров для кремниевого биполярного транзистора и кремниевого полевого транзистора: $V_y^* = 2$ нВ/ $\sqrt{\Gamma_{\text{Гц}}}$ и 4 нВ/ $\sqrt{\Gamma_{\text{Гц}}}$, а $I_y^* = 2$ пА/ $\sqrt{\Gamma_{\text{Гц}}}$ и 10 фА/ $\sqrt{\Gamma_{\text{Гц}}}$. Чтобы показать важное значение входной емкости усилителя при высоких скоростях передачи данных, в расчетах были использованы два её значения - 2 и 5 пФ. Из рисунка видно, что применение полевого транзистора имеет явные преимущества при скоростях передачи данных менее 50 Мбит/с. Для каждо-

го типа транзистора при низких скоростях передачи данных минимально необходимый ток изменяется пропорционально $B^{1/3}$. В таком случае он зависит от I_y^* и сопротивления обратной связи R_{oc} .

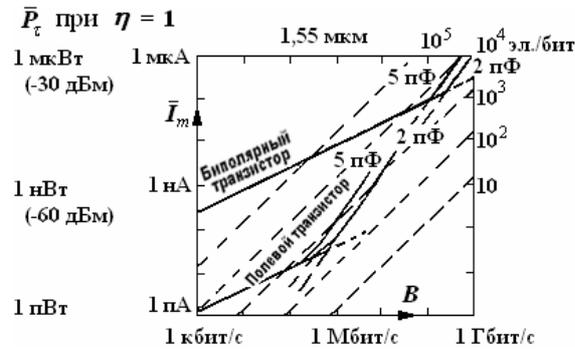


Рис. D.1. Зависимость минимального среднего тока фотодетектора, необходимого для обеспечения $PE < 10^{-9}$, от скорости передачи

Сплошные линии соответствуют приведённым в тексте шумовым параметрам кремниевых биполярного и полевого транзисторов при входных емкостях усилителей, равных 2 и 5 пФ, штриховые линии характеризуют постоянные значения числа электронов на бит. Соответствующие уровни мощности при $\eta = 1$ указаны для различных длин волн на левой стороне.

Другими словами, его следует увеличить выше указанных уровней, если входное сопротивление будет слишком мало. При высоких скоростях передачи в каждом случае значение \bar{I}_{min} изменяется пропорционально $B^{3/2}$ и зависит от V_y^* и C . Из рис. D.1 также видно, что первоначально предложенный эмпирический критерий $0,1 \dots 1$ нВт/(Мбит/с) включает в себе различные функциональные зависимости между \bar{I}_{min} и B . Пусть при $\Re_{фд} = 0,5$ А/Вт значению 1 нВт/(Мбит/с) соответствует минимальный средний ток детектора 0,5 нА/(Мбит/с), что равносильно 3100 электронов/бит. Тогда значению 0,1 нВт/(Мбит/с) будет соответствовать 310 электронов/бит.

XX. *Случай соизмеримого дробового шума с шумами от других источников*

Использование в качестве фотодетектора $p-i-n$ -фотодиода обеспечивает пренебрежимо малый дробовой шум, но не позволяет работать на высоких битовых скоростях. По этой причине преимущественно при построении аппаратуры современных средств связи применяются лавинные фотодиоды (ЛФД). Хорошие ЛФД обеспечивают коэффициент умножения $M = 20$ и более, и обычно гарантируют, что относительное влияние шума от других источников уменьшено до уровня, сравнимого или меньше уровня усиленного дробового шума. Как отмечалось выше, эта ситуация сложна для строгого анализа по причине необходимости использования различных функций распределения для дробового шума и шумов других источников, а также в том, что в этом случае результирующий уровень шума может зависеть от величины сигнала. Тем не менее существуют оценочные методики, применение которых спра-

ведливо в тех или иных технических приложениях, когда необходимо оценить «сигнал/шум» и битовую скорость передачи. Далее представлена одна из таких методик.

В случае, когда дробовой шум ЛФД и тепловой шум усилителя значительны по величине, зависимость, характеризующая минимальный средний ток, имеет вид [13, 52]

$$\bar{I}_{\min} = \frac{1}{2} \cdot I_{\min} = \frac{1}{2} \cdot p \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{q}{p^2}} \right], \quad (\text{D.8})$$

$$\text{где } p = \frac{S/N \cdot e \cdot F \cdot B}{2} \text{ и } q = \frac{S/N^2 \cdot B}{2M^2} \cdot \left[\frac{(\pi B)^2}{3} \cdot (C \cdot V_y^*) + (I_y^*)^2 \right].$$

Здесь вместо Δf использовалось значение $B/2$ и предполагалось, что R достаточно велико по сравнению со слагаемыми шума, чтобы ими можно было пренебречь. При $B = B_0 = \sqrt{3} \cdot \frac{I_y^*}{\pi C \cdot V_y^*}$ величина q/p принимает минимальное значение:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{q}{p^2} \right)_{\min} = \frac{\pi C \cdot V_y^* \cdot I_y^*}{\sqrt{3} \cdot (S/N \cdot e \cdot M \cdot F)^2}. \quad (\text{D.9})$$

При $B > B_0$ в правой части выражения (D.8) преобладает слагаемое шумового напряжения; если $B < B_0$, доминирующим становится слагаемое шумового тока. Если выполняется

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{q}{p^2} \right)_{\min} \gg 1, \quad (\text{D.10})$$

то при всех скоростях передачи цифрового сигнала дробовой шум оказывается пренебрежимо малым, и $\bar{I}_{\min} \approx \frac{1}{2} \cdot \sqrt{q}$. При $B < B_0$ будет справедливо следующее:

$$\bar{I}_{\min} \cong \frac{1}{2} \cdot \sqrt{q} = \frac{S/N \cdot I_y^* \cdot B^{1/2}}{2\sqrt{2} \cdot M}. \quad (\text{D.11})$$

Выражение (D.11) справедливо для гауссовой формы распределения теплового шума. Аналогично для $B > B_0$

$$\bar{I}_{\min} \cong \frac{1}{2} \cdot \sqrt{q} = \frac{\pi \cdot S/N \cdot C V_y^* \cdot B^{3/2}}{2\sqrt{6} \cdot M}. \quad (\text{D.12})$$

Даже когда левая часть выражения (D.10) существенно меньше 1, слагаемое шумового тока все же доминирует, если скорость передачи данных достаточно мала, чтобы обеспечить выполнение неравенства (D.10), а слагаемое шумового напряжения доминирует при больших скоростях передачи, достаточных для удовлетворения того же самого условия. Таким образом, когда имеет место:

$$B \ll B_1 = \left(\frac{I_y^*}{2 \cdot S/N \cdot e \cdot M \cdot F} \right)^2, \quad (\text{D.13})$$

то значение \bar{I}_{\min} определяется в соответствии с (D.11), а если

$$B \gg B_2 = 6 \cdot \left(\frac{S/N \cdot e \cdot M \cdot F}{\pi C V_y^*} \right)^2, \quad (\text{D.14})$$

то значение \bar{I}_{\min} определяется в соответствии с (D.12). Очевидно, что существует средняя область скоростей передачи, определяемая $B_1 < B < B_2$ при нахождении значения левой части выражения (D.10) в пределах 1. Тогда

$$\bar{I}_{\min} \cong p = \frac{S/N^2 \cdot e \cdot F \cdot B}{2}. \quad (\text{D.15})$$

В этом случае преобладающим становится умноженный дробовой шум, который может иметь не гауссово и даже не симметричное распределение. Следовательно, может стать нецелесообразным использование значения $S/N = 12$ для поддержания вероятности ошибок ниже уровня 10^{-9} . Может также стать неуместной установка уровня порога принятия решения посередине между уровнями сигналов, соответствующих 0 и 1. Очевидно, что формулы (D.11) и (D.12) являются асимптотами выражения (D.7), графики которого приведены на рис. D.2 для $M = 1$ соответственно при низких и высоких значениях скорости передачи цифрового сигнала. Увеличение коэффициента умножения больше 1 заставляет эти кривые смещаться вниз пропорционально значению M . Выражение (D.15) характеризует уменьшение предельной чувствительности, ограниченной квантовым пределом, которая была определена выше значением $S/N^2 \cdot F/20$. Если исходить из числа пар носителей заряда, генерируемых при приеме одного бита, эта чувствительность станет равной $S/N^2 \cdot F/2$, определяющей количество носителей заряда на бит. На рис. D.2 приведены графики этих трех приближенных решений уравнения (D.8) для некоторых частных примеров, где учтены шумовые параметры входных каскадов усилителя на кремниевых полевом и биполярном транзисторах со следующими параметрами:

- входной емкостью 5 пФ;
- для полевого транзистора: $I_y^* \cong 10 \text{ фА}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$ и $C V_y^* = 2 \cdot 10^{-20} \text{ С}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$;
- для биполярного: $I_y^* \cong 2 \text{ пА}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$ и $C V_y^* = 10^{-20} \text{ С}/\sqrt{\Gamma_{\text{ц}}}$;
- значения коэффициента умножения и коэффициента шума ЛФД следующее: $M = 20, F = 5$ и $M = 100, F = 4$.

Видно, что в обоих случаях применение усилителя на полевом транзисторе ограничивается влиянием дробового шума в наиболее полезной области частот, в то время как усилитель на биполярном транзисторе едва достигает предела дробового шума при невысоких коэффициентах усиления ЛФД. Во всех приведенных вычислениях предполагалась однородность спектральной плотности шума усилителя на всех частотах. Тем не менее реально величины I_y^* и V_y^* будут увеличиваться на высоких и низких частотах. Это приведет к уменьшению области частот, в пределах которой можно поддерживать режим детектирования, ограниченный дробовым шумом.

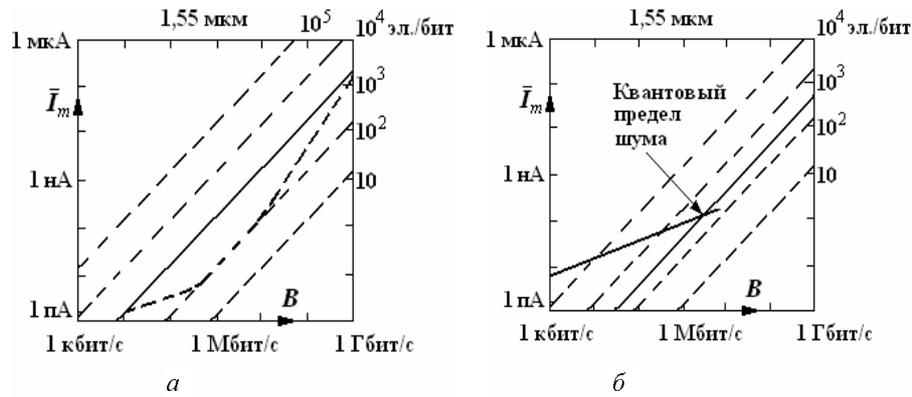


Рис. D.2. Зависимость минимального среднего тока фотодетектора от скорости передачи цифрового сигнала: а) - усилитель на полевом транзисторе, $M = 20$, $F = 5$; б) - усилитель на биполярном транзисторе, $M = 100$, $F = 4$

Предел усиления для полевого транзистора на низких частотах и предел усиления для биполярного транзистора на высоких частотах лежат за границами диапазонов, указанных на графиках.

XXI. Вопросы оптимизации оптической системы связи

При построении графиков рис. D.2 предполагалось, что система сначала имеет постоянные характеристики, а затем анализируется их зависимость от скорости передачи. На практике скорость передачи обычно определяется на ранней стадии разработки системы связи, а лишь затем требуется оптимально спроектировать приемник, удовлетворяющий этим требованиям. Выше было показано, что можно использовать входной каскад на кремниевом полевом транзисторе, если скорость передачи данных меньше 50 Мбит/с, или на кремниевом биполярном транзисторе при более высоких частотах. Далее, если необходимо использовать ЛФД, имеет место свобода выбора наиболее подходящего коэффициента умножения M . Если коэффициент шума ЛФД F подчиняется простому закону, например вида (D.6) - (D.7), можно найти оптимальное значение коэффициента умножения, которое минимизирует общий шум. Однако при определенном уровне обратного напряжения, когда развивается микроплазма, эти законы нарушаются. При этом резко возрастают темновой ток и коэффициент шума при попытке дальнейшего увеличения M . Если оптимальный коэффициент усиления не был превышен, будет иметь место порог для разрушения микроплазмы. На рис. D.3 приведена зависимость \bar{I}_{\min} от коэффициента умножения ЛФД для случая следующих конструктивных параметров: $SN = 12$, $F = M^{1/2}$, $B = 140$ Мбит/с, использование усилителя на биполярном кремниевом транзисторе с шумовыми параметрами $I_y^* \cong 2 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$ и $CV_y^* = 10^{-20} \text{ С}/\sqrt{\text{Гц}}$. При этом выражение (D.8), как функция коэффициента умножения ЛФД, принимает следующий вид:

$$\bar{I}_{\min} = \frac{S/N^2 \cdot e \cdot F \cdot B}{4} \times \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{2}{(S/N \cdot e \cdot F \cdot M)^2} \cdot \left(\frac{\pi^2}{3} \cdot (C \cdot V_y^*)^2 \cdot B + \frac{(I_y^*)^2}{B} \right)} \right\}. \quad (D.16)$$

И после подстановки числовых значений и $F = M^{1/2}$ получаем

$$\bar{I}_{\min} = 8 \cdot 10^{-10} \cdot \sqrt{M} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot M^{-3}} \right]. \quad (D.17)$$

На рис. D.3 изображен график функции в соответствии с (D.17), из которого видно, что оптимальный коэффициент умножения ЛФД $M = 32$ и $(\bar{I}_{\min})_{opt} = 11$ нА. Это должно соответствовать среднему уровню принимаемой мощности $(\bar{\Phi}_R)_{opt} = 20$ нВт или - 47 дБм, если чувствительность фотодиода в отсутствие умножения равна $\mathfrak{R}_{ФД} = 0,55$ А/Вт.

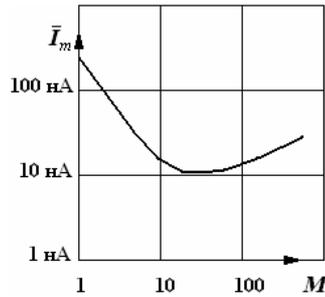


Рис. D.3. Зависимость минимального среднего тока фотодиода от коэффициента умножения ЛФД в случае усилителя на биполярном транзисторе, работающего на скорости передачи 140 Мбит/с; $F = M^{1/2}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Метод «глаз-диаграммы» при выборе режима работы системы передачи

XXII. Понятие о «глаз-диаграмме»

На практике для качественной оценки конструктивных параметров системы передачи, а именно – таких взаимосвязанных параметров, как требуемой битовой скорости типа приёмного оборудования, прежде всего типа приёмного решающего устройства (принимающего решение по энергии или амплитуде в течение заданного интервала наблюдения), с учётом эксплуатационных требований к этой конкретной ВОСП, выраженных в виде представления (описания) искажающих воздействий, может успешно применяться метод глаз-диаграммы (ГД). Данный метод заключается в графическом представлении взаимосвязи (зависимости) между чувствительностью к изменениям амплитуды (шуму) и чувствительностью к изменениям временного положения импульса (дрожанию). При этом возможен как аналитический (графический), так и экспериментальный (с использованием серии реально наблюдаемых импульсов) подход.

Ось абсцисс на ГД является осью времени, на ней откладывается длительность тактового интервала (симметрично в обе стороны от нулевого значения, рис. D.4). Ось ординат – ось значений амплитуды (мощности) импульса, значения которой откладываются в верхней полуплоскости. Построенная (или экспериментально полученная, рис. D.5) ГД для конкретно рассматриваемой системы передачи должна содержать два типа кривых. Первый характеризует передаточную функцию (или импульсную характеристику) фильтра приёмного устройства. Это либо фильтр нижних частот, либо косинусоидальный [13], косинусквадратный [32]. Второй тип – результат наложения всех возможных принимаемых импульсных последовательностей в течение промежутка времени, равного двум или более тактовым интервалам линейного сигнала. Использование фильтра нижних частот создаёт сравнительно большие помехи в соседних тактовых интервалах, так как реальный сигнал в ВОСП никогда не передаётся с идеальной синхронизацией. А это означает, что совсем небольшие эффекты уширения импульса или его дрожания будут вызывать появление значительных взаимных искажений между символами. Фильтр с косинусоидальной функцией передачи имеет значительно больший допуск на дрожание и уширение импульса, но ограничивает энергию принимаемого сигнала.

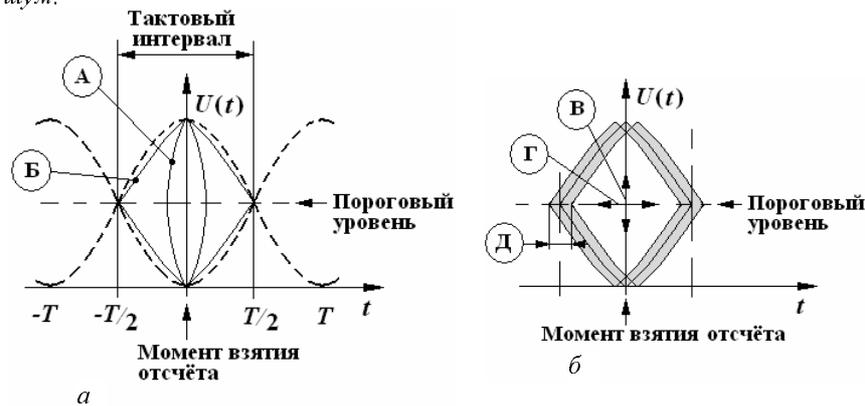
Дальнейшее даже визуальное сравнение кривых первого и второго типов показывает зону или «раскрытие», в пределах которой имеет смысл производить операцию принятия решения.

Для обеспечения безошибочной регенерации цифровой последовательности раскрыты глаз-диаграммы должны быть чистыми; это означает, что на глаз-диаграмме должна существовать некоторая зона, в пределах которой принятие решения будет надёжным. Имеющие место искажения импульсов приводят к уменьшению раскрытия глаз-диаграммы по сравнению с идеальным случаем. Минимальное расстояние между краями области принятия решения (точкой пересечения, если это уст-

ройство типа в), см. раздел 1.2) и «краями» глаз-диаграммы является мерой запаса помехоустойчивости.

XXIII. Графическое представление «глаз-диаграммы»

Как показано на рис. D.4, принимаемые на тактовом интервале колебания представляют собой результат наложения большого числа случайных импульсных последовательностей. Для увеличения энергии принятого сигнала, что необходимо для увеличения отношения «сигнал/шум» и минимизации ошибок «глаз» должен быть раскрыт как можно шире. Но при этом он должен быть достаточно узким, особенно при использовании фильтра с резким ограничением полосы пропускания, чтобы минимизировать последствия дрожаний импульсной последовательности. Фильтр с более плавным спадом характеристики передачи, такой как косинусоидальный [13, 32], позволяет шире открыть глаз, но и увеличивает возможность попадания в схему принятия решений различных помех: межсимвольных, интерференционных, и т.д. В результате для сохранения требуемого отношения «сигнал/шум» необходимы более высокие уровни мощности принимаемых сигналов. Можно полагать, что это *штраф за шум*.



А – Фильтр с косинусоидальной функцией передачи (наихудший случай); Б – Ограниченный по полюсе фильтр (наихудший случай)

В – Запас на шум; Г – Чувствительность к неточности синхронизации; Д – Изменение момента пересечения порогового уровня, что может вызвать дрожание момента взятия отсчёта

Рис. D.4. Иллюстрация метода «глаз-диаграммы». Схема ГД.

- a* – теоретическая: штриховые кривые представляют собой импульсные характеристики косинусоидального фильтра; сплошные кривые отображают совокупные эффекты наихудшей комбинаций предыдущего и последующего импульсов при приеме 0 и 1. При использовании косинусоидального фильтра «глаз» сужается лишь слегка, однако при использовании фильтра с крутым срезом частотной характеристики он становится гораздо более узким;
- б* – схематическая: для случая использования косинусоидального фильтра: показывает расширение диаграммы, обусловленное конечной длительностью импульса и дрожанием фаз

На рис. D.4 центральная вертикальная линия, проводимая, вообще говоря, через каждый тактовый интервал, соответствует идеальному моменту решения (*a, б*).

Но процесс принятия решений в современных регенераторах реально происходит в течение конечного интервала наблюдения, который должен быть короче тактового интервала для обеспечения корректности работы электронного устройства, но, безусловно, длиннее точки пересечения (крестика) в раскрые глаз-диаграммы. Горизонтальная черта «крестика» определяет порог решения (по амплитуде).

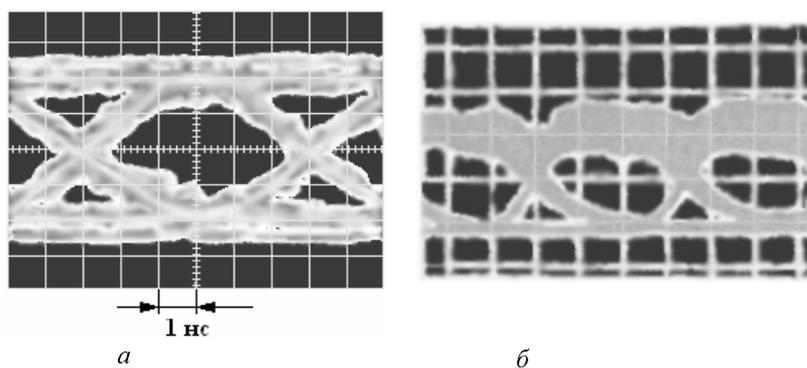


Рис. D.5. Полученная экспериментально «глаз-диаграмма»:

- а - реальная: получена наложением многих серий импульсов, искажённых действием шумов различных независимых источников, поступающих в виде случайной последовательности [53];
- б - реальная: получена наложением случайной последовательности импульсов, искажённых влиянием модового шума в оптической линии передачи с битовой скоростью 140 Мбит/с. Модовый шум вызван присутствием несогласованного разъёма [54]

Таким образом, в цифровой системе передачи возможен обмен между битовой скоростью и мощностью сигнала, что в конечном итоге связывает между собой эффекты, приводящие к падению его амплитуды и изменению временного положения импульса. В первом и самом грубом приближении – это взаимосвязь затухания и дисперсии в оптоволокне. Как было видно по результатам математического моделирования, приведённого в разделе 1.4, штраф по мощности резко увеличивается, если ошибка длительности импульса превышает определённое значение независимо от формы импульса [13]. Обычно на практике имеет место требование, состоящее в том, чтобы штраф по мощности не превышал 1 дБм независимо от формы импульса. Последнее особенно важно при построении солитонных и когерентных ВОСП [1, 20].