ЗАДАЧА 2

Определить основные характеристики и показатели качества каналов оптических систем передачи, построенных на основе цифровых стандартов, с применением анализа глаз-диаграмм.

Целью выполнения задачи является приобретение практических навыков определения основных параметров каналов цифровых систем передачи, путем расчета и последующего анализа глаз-диаграмм цифровых сигналов на выходе линейного тракта волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП).

Исходные данные

Исходные данные к индивидуальному заданию определяются, согласно номеру учебного шифра, следующим образом.

Длина элементарного кабельного участка (ЭКУ) волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), $L_{ЭКУ}$:

$$L_{ЭКУ} = 90 + (m+n) \text{ , км,}$$

где m и n – предпоследняя и последняя цифра номера учебного шифра, соответственно, а mn – составленное из них число.

Рабочая длина волны λ выбирается, согласно таблице 2.1.

Таблица 2.1

	λ, нм
m – четное	1310
m – нечетное	1550

Мощность сигнала на выходе источника оптического излучения (одномодовый лазерный диод), P_0:

$$P_0 = 1+ 0{,}1 \cdot n, \text{ мВт}$$

Ширина спектра излучения одномодового лазерного диода, Δλ:

$$\Delta\lambda = 0{,}1 \cdot (3+|m - n|), \text{ нм}$$

Если m = n, то при определении ширины спектра излучения лазерного диода по вышеприведенной формуле принять n = 0.

Уровень чувствительности фотоприемника оптической системы передачи (ОСП), p_R:

$$p_R = -34 + 2{,}2 \cdot n, \text{ дБ}$$

Характеристики стандартного одномодового оптического волокна Corning SMF-28 со ступенчатым профилем показателя преломления (G.652) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Параметр	Ед. изм.	Значение
Затухание на λ = 1310 нм, α	дБ/км	0,34
Затухание на λ = 1550 нм, α	дБ/км	0,204
Длина волны нулевой дисперсии, λ_0	нм	1302-1321
Параметр наклона спектральной характеристики дисперсии ОВ в точке нулевой дисперсии, S_0	$\frac{пс}{нм^2 \cdot км}$	0,090
Параметр ПМД ОВ, *PMD*	$\frac{пс}{\sqrt{км}}$	0,1

Полученные исходные данные к расчету сведите в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные к расчету

Последние две цифры учебного шифра		
Длина ЭКУ	$L_{ЭКУ}$, км	
Рабочая длина волны	λ, нм	
Мощность оптического излучения лазера	P_0, мВт	
Ширина спектра излучения лазера	Δλ, нм	
Уровень чувствительности фотоприемника	p_R, дБ	

Методические указания к задаче 2

Перед выполнением задачи необходимо подробно изучить принципы измерения параметров ошибок цифровых систем передачи, методику измерения с применением глаз-диаграмм, принципы построения глазковых диаграмм, измерение параметров цифровых систем передачи по глазковой диаграмме. ~~Материалы находятся в 5,6 разделах лекций.~~

2.1. Расчет суммарных потерь ОВ на ЭКУ

Суммарные потери ОВ на ЭКУ $A_{ЭКУ}$ складываются из собственных потерь ОВ, потерь в неразъемных соединениях (соединения ОВ строительных длин оптического кабеля в оптических муфтах; на протяженных ЭКУ ВОЛП выполняются с помощью сварочного аппарата (сварные соединения)) и потерь в разъемных соединениях (оптические разъемы на оконечных устройствах – оптические кроссы, а также оптические приемо/передающие модули):

$$A_{ЭКУ} = \alpha \cdot L_{ЭКУ} + A_н + a_р \cdot N_р \text{ , дБ,} \qquad (2.1)$$

где α – коэффициент затухания ОВ на рабочей длине волны λ (табл. 2.2);

$L_{ЭКУ}$ – заданная протяженность ЭКУ;

$A_н$ – максимальное значение потерь в неразъемных соединениях;

$a_р$ – потери в разъемных соединениях;

$N_р$ – количество разъемных соединений на ЭКУ.

Для определения максимального значения потерь в неразъемных соединениях, сначала необходимо определить количество неразъемных соединений $N_н$ по формуле:

$$N_н = \frac{L_{ЭКУ}}{L_{СД}} - 1, \qquad (2.2)$$

где $L_{СД}$ – строительная длина оптического кабеля, $L_{СД}$ = 4 км.

Максимально допустимые потери в неразъемных соединениях для разных значений рабочих длин волны λ определяются по таблице 2.4.

Таблица 2.4

Длина волны λ, нм	Максимально допустимые потери в неразъемных соединениях	
	100% соединений, $a_н$, дБ	50% соединений $\overline{\alpha_н}$
1310	0,20	0,10
1550	0,10	0,05

Таким образом, как видно из таблицы 2.4, общее затухание, вносимое неразъемными соединениями, определится по формуле:

$$A_н = \frac{N_н}{2} \cdot \overline{\alpha_н} + \frac{N_н}{2} \cdot \alpha_н \text{, дБ} \qquad (2.3)$$

В рассматриваемой волоконно-оптической сети связи предполагается, что в качестве оптических разъемов используются наиболее популярные разъемы типа FC/PC, вносимое затухание которых составляет $a_р$ = 0,5 дБ. Количество разъемных соединений $N_р$ = 4, по 2 разъема на приеме и на передаче (1 на оптическом кроссе и 1 на приемопередающем модуле оптической системы передачи).

2.2 Расчет дисперсии ОВ на ЭКУ

Дисперсией ОВ называют увеличение длительности оптических импульсов при их распространении по ОВ. Неодинаковая скорость распространения отдельных составляющих оптического сигнала является основной причиной дисперсии. Одномодовые оптические ОВ характеризуются хроматической и поляризационной модовой дисперсией (ПМД). Дисперсия ОВ создает переходные помехи, приводит к межсимвольным искажениям и, как следствие, ограничивает скорость передачи в линии (длину регенерационного участка).

Данный фактор искажения учитывается путем расчета дополнительных потерь (приращения уровня помех) из-за шумов межсимвольной интерференции (ISI – Intersymbol Interference), которые включают в себя перекрестные помехи и шумы синхронизации. Потери из-за ISI определяются из следующего выражения:

$$\alpha_{ISI} = 10\lg\left\{\frac{1}{1-1,425\cdot\exp\left[-1,28\cdot\left(\frac{T_0}{T_L}\right)\right]}\right\}, \text{ дБ} \qquad (2.4)$$

где T_0 – время нарастания фронта оптического импульса на выходе источника оптического излучения от 10% до 90% его максимального значения, непосредственно связано со скоростью передачи оптического сигнала в линии:

$$T_0 = \frac{0,48}{B_L}, \text{ с} \qquad (2.5)$$

где B_L – скорость передачи оптического сигнала в линии.

В данной работе рассматривается применение блочного линейного кода оптического сигнала MBNB, где M – число символов кодовой последовательности, а N – число импульсов, необходимое для передачи:

$$B_L = \frac{N}{M}B, \text{ Мбит/с} \qquad (2.6)$$

B – скорость передачи информации, соответствующая заданному уровню цифровой иерархии. Так, например, для передачи потоков E1 и E2 плезиохронной цифровой иерархии (PDH) используется блочный линейный код 1B2B. Поток E3 PDH соответствует код 5B6B. Для уровней синхронной цифровой иерархии (SDH) STM-1 и выше условно принять 10B11B. Для стандарта Gigabit Ethernet (GE) используется блочный код 8B/10B.

T_L – время нарастания фронта оптического импульса на выходе фотоприемника ОСП от 10% до 90% его максимального значения:

$$T_L = \sqrt{T_0^{\,2} + \left(\frac{0,35}{BW_R}\right)^2 + \sigma^2{}_{ЭКУ}}\ , \text{с}, \tag{2.7}$$

где BW_R – полоса пропускания фотоприемника, Гц;

$\sigma_{ЭКУ}$ – прогнозируемое среднеквадратическое значение дисперсии на ЭКУ.

Полоса пропускания фотоприемника выбирается из условия $BW_R \geq B_L$.

Прогнозируемое среднеквадратическое значение дисперсии на ЭКУ определяется по формуле:

$$\sigma_{ЭКУ} = \sqrt{D_{ch}^2 + D_{PMD}^2}\ , \text{с}, \tag{2.8}$$

где D_{ch} и D_{PMD} – значения хроматической и поляризационной модовой дисперсии на ЭКУ, соответственно.

Прогнозируемое значение хроматической дисперсии D_{ch} на ЭКУ заданной протяженности $L_{ЭКУ}$ определяется по следующей формуле:

$$Dch = D \cdot \Delta\lambda \cdot L_{ЭКУ}\ , \text{с}, \tag{2.9}$$

где $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника (исходные данные);

D – коэффициент хроматической дисперсии на заданной рабочей длине волны λ;

$$D = \frac{S_0}{4} \cdot \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3}\right],\ \frac{пс}{нм \cdot км}, \tag{2.10}$$

S_0 – параметр наклона спектральной характеристики дисперсии ОВ в точке нулевой дисперсии, $\frac{пс}{нм^2 \cdot км}$

λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Прогнозируемое значение ПМД на ЭКУ заданной протяженности:

$$D_{PMD} = PMD \cdot \sqrt{L_{ЭКУ}}\text{, с} \qquad (2.11)$$

где *PMD* – параметр ПМД волокна, $\frac{нс}{\sqrt{км}}$.

Параметры S_0, λ_0 и *PMD* выбираются из табл. 2.2. При расчете коэффициента хроматической дисперсии, для длины волны 1310 нм принять минимальное значение длины волны нулевой дисперсии, а для длины волны 1550 нм – максимальное.

2.3 Расчет глаз-диаграммы

Рассмотренный метод расчета вероятности ошибки регенератора, представленный в первой задаче не учитывает ряд влияющих факторов:

- шумы, обусловленные дисперсионными явлениями в ОВ, частотными и фазовыми искажениями, вносимыми элементами ОЛТ, т. е. интерференционные или межсимвольные помехи;

- погрешность работы устройств выделения тактовой частоты;

- корректирующую способность регенератора.

Удобным для практики является определение вероятности ошибки с помощью экспериментального метода глаз-диаграмм (ГД), учитывающих влияние всех факторов на качество передачи. Глаз-диаграмма представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора псевдослучайной последовательности (ПСП), отображаемый на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени. Для синхронизации осциллографа используются колебания тактовой частоты, а на другой вход подается случайная последовательность импульсов, поступающая на вход УР. Период развертки выбирается равным от одного до нескольких тактовых интервалов последовательности.

Пример глаз-диаграммы представлен на рис. 2.1.

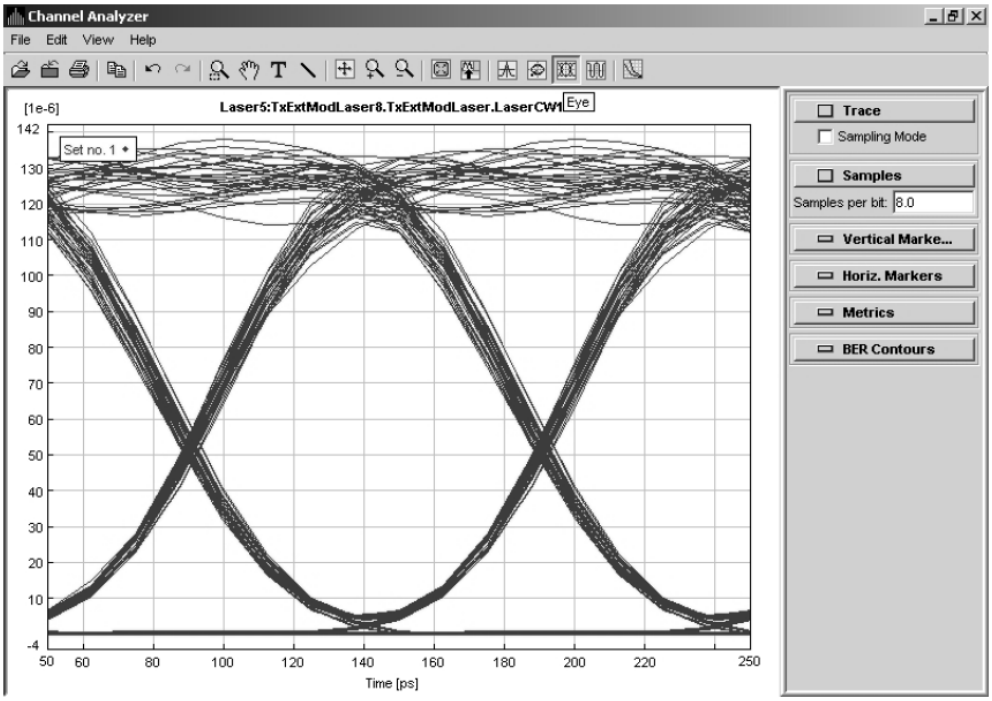


Рис. 2.1. Глаз-диаграмма, полученная с помощью анализатора канала

Для построения глаз-диаграммы предварительно необходимо определить уровень мощности на выходе источника оптического излучения, иначе говоря, перевести заданную в исходных данных мощность P_0 в дБ:

$$p_0 = 10\lg P_0, \text{ дБ}.$$

Уровень мощности оптического сигнала на выходе фотоприемника ОСП определяется суммарными потерями в ОВ на ЭКУ ВОЛП, а также суммарным значением дополнительных потерь, обусловленных дисперсией ОВ:

$$p_L = p_0 - A_{ЭКУ} - \alpha_{ISI}\ , \text{ дБ} \qquad (2.12)$$

Соответственно, мощность оптического сигнала на выходе фотоприемника ОСП:

$$P_L = 10^{0,1 \cdot p_L}$$

Для расчета помехозащищенности канала ЦСП необходимо также оценить мощность шума фотоприемника P_{noise}. На практике фотоприемные устройства высокоскоростных ОСП проектируются таким образом, чтобы логарифм отношения полосы пропускания электрического фильтра к полосе пропускания

оптического фильтра составлял не менее 2 дБ. В этом случае выполняется следующее условие по отношению сигнал/шум:

$$OSNR = 20 \cdot \lg(Q_{ном}) + 2, \text{ дБ}, \qquad (2.13)$$

где *OSNR* – оптическое отношение сигнал/шум (Optical Signal-to-Noise Ratio);

$Q_{ном}$ – номинальное значение *Q*-фактора, соответствующего нормированному коэффициенту ошибок $BER_{ном}$.

Согласно определению, уровень чувствительности фотоприемника ОСП – это минимальное значение уровня мощности оптического излучения в точке нормирования оптического тракта на приеме, при которых обеспечивается требуемое качество передачи цифрового оптического сигнала. С учетом вышесказанного, а также используя условие (2.13), максимальный уровень мощности шума фотоприемника p_{noise} можно оценить по формуле:

$$p_{noise} = p_R - 20 \cdot \lg(Q_{ном}) - 2 \text{ , дБ ,} \qquad (2.14)$$

где p_R – уровень чувствительности фотоприемника, дБ;

p_{noise} – уровень шума фотоприемника, дБ.

Номинальные значения *Q*-фактора и соответствующие им нормированные коэффициенты ошибок $BER_{ном}$ представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5.

$BER_{ном}$	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
$Q_{ном}$	5,99	6,63	6,71	7,04
Стандарт	E3	STM-1		STM-4

Очевидно, чувствительность фотоприемника и мощность шума рассчитывается как:

$$P_R = 10^{0,1 \cdot p_R} \text{ , мВт} \qquad P_{noise} = 10^{0,1 \cdot p_{noise}} \text{ , мВт}$$

Построение глаз-диаграммы осуществляется путем наложения отклика системы в предположении гауссовой формы импульса на передачу «изолиро-

ванного» логического «0» в последовательности логических «1» (например, комбинация 101 – при 3-х символьной последовательности)

$$P_{out}^{"0"}(t) = P_L \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} erf\left[\frac{(t+T)}{s_L\sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} erf\left[\frac{(t)}{s_L\sqrt{2}} \right] \right\} \qquad (2.15)$$

и отклика системы на передачу «изолированной» логической «1» в последовательности логических «0» (например, комбинация 010 – при 3-х символьной последовательности)

$$P_{out}^{"1"}(t) = P_L \cdot \left\{ \frac{1}{2} erf\left[\frac{(t+T)}{s_L\sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} erf\left[\frac{(t)}{s_L\sqrt{2}} \right] \right\}, \qquad (2.16)$$

где s_L - среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП; данная величина непосредственно связана с T_L следующим соотношением:

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}, \text{ с} \qquad (2.17)$$

T – интервал передачи битовой последовательности:

$$T = N_{symb} \cdot \tau_{05}, \text{ с}, \qquad (2.18)$$

где N_{symb} – количество символов битовой последовательности, в данном случае принять N_{symb} =3;

τ_{05} – длительность импульса на уровне 0,5 от его максимума на выходе источника оптического излучения; обратно пропорциональна скорости передачи сигнала в линии:

$$\tau_{05} = \frac{1}{B_L}, \text{ с} \qquad (2.19)$$

Выполните построение глаз-диаграммы в диапазоне (-2*T*; 2*T*). На диаграмме укажите мощность шума фотоприемника, а также, по возможности, чувствительность фотоприемника (если мощность сигнала на выходе фотоприемника P_L и чувствительность фотоприемника P_R – одного порядка). Пример построения глаз-диаграммы по результатам расчета представлен на рисунке 2.2.

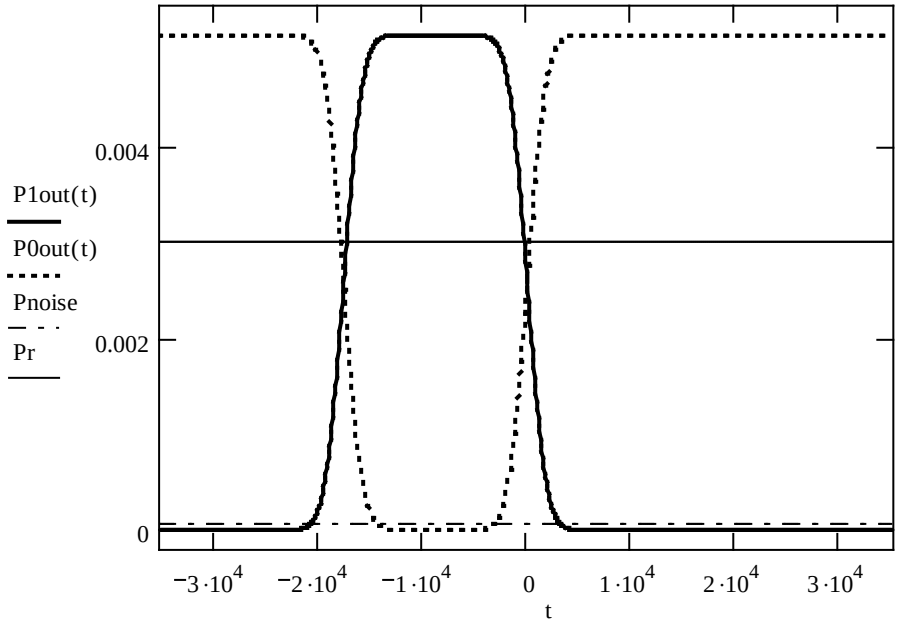


Рис. 2.2. Пример построения глаз-диаграммы

2.4. Расчет показателей качества канала цифровой оптической системы передачи

Фундаментальным показателем качества цифровых систем передачи является коэффициент ошибок BER. Работа цифровых систем передачи считается нормальной только в том случае, если BER не превышает определенное допустимое значение, соответствующее используемому сетевому стандарту.

Известна методика оценки коэффициента ошибок BER на основе определения Q-фактора. Q-фактор – это параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой СП. Существует определенная функциональная зависимость Q-фактора сигнала и измеряемого коэффициента ошибок BER. Q-фактор определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрической уровне, а именно – непосред-

ственно по глаз-диаграмме. При этом выполняется построение функции распределения состояний «1» и «0», а для этих распределений, в предположении их Гауссовой формы, оцениваются математические ожидания состояний E1 и E0 и их среднеквадратические отклонения σ_1 и σ_0 (рис. 2.3).

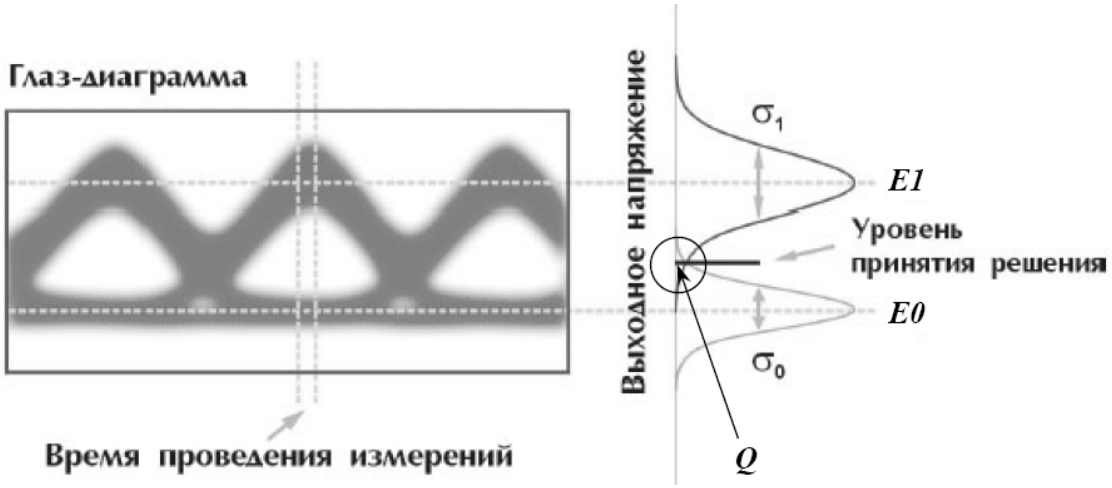


Рис. 2.3. К оценке *Q*-фактора

Предварительно, для оценки параметров распределений состояний «1» и «0», определите точку максимального раскрыва глаз-диаграммы (рис. 2.4):

$$\tau_{open} = \ln\left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_L^2}\right)}}\right] \cdot \frac{s_L^2}{T} \qquad (2.20)$$

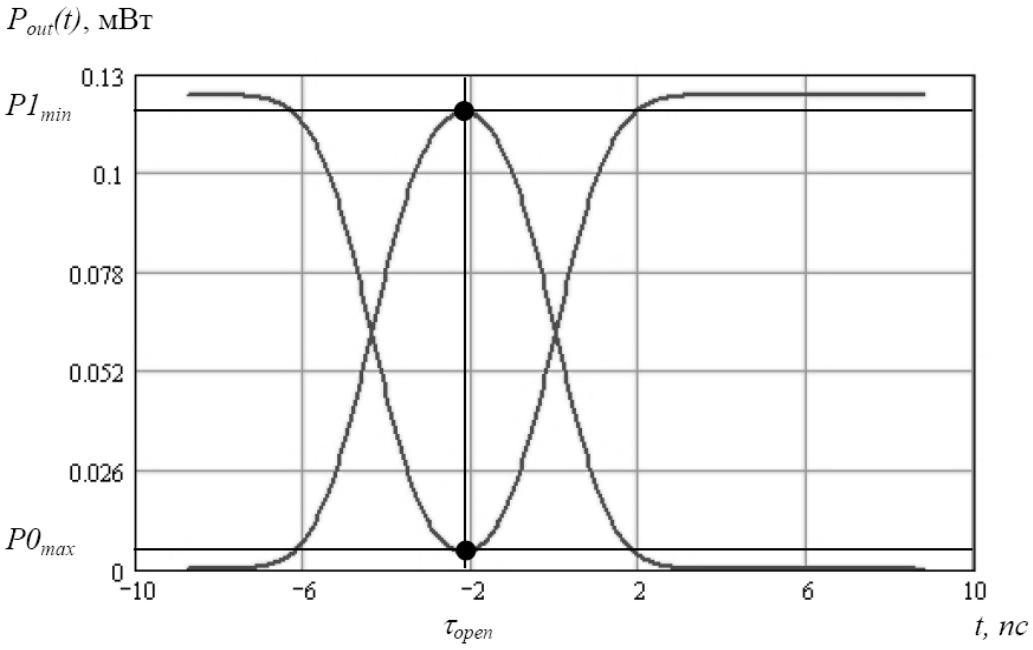


Рис. 2.4. К оценке параметров распределений состояний «1» и «0»

Рассчитайте границы раскрыва глаз-диаграммы (зоны принятия решения), соответствующие минимальной зарегистрированной мощности при передаче логической «1» $P1_{\min}$ и максимальной зарегистрированной мощности при передаче логического «0» $P0_{\max}$:

$$P1_{\min} = P_{out}^{"1"}(\tau_{open}),\ \text{мВт}$$
$$P0_{\max} = P_{out}^{"0"}(\tau_{open}),\ \text{мВт} \quad (2.21)$$

Исходя из предположения гауссова распределения состояний логической «1» и логического «0», определите характеристики распределений состояний – математическое ожидание $E1$ и $E0$:

$$E1 = \begin{cases} P_L,\ P_L \geq P_R \\ P_R,\ P_L < P_R \end{cases},\ \text{мВт} \quad (2.22)$$

$$E0 = P_{noise},\ \text{мВт} \quad (2.23)$$

и среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0, соответственно, воспользовавшись правилом «три сигма»:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{\min}}{3},\ \text{мВт} \quad (2.24)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P0_{\max}}{3},\ E0 \leq P0_{\max} \\ \frac{E0 - P0_{\max}}{3},\ E0 > P0_{\max} \end{cases},\ \text{мВт} \quad (2.25)$$

Q-фактор рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.26)$$

При этом сам коэффициент ошибок BER определяется по следующей формуле:

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (2.27)$$

где *erfc* – вспомогательная функция интеграла ошибок:

$$erfc(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \quad (2.28)$$

Необходимо отметить, что приближенная формула расчета *BER*, справедлива при значениях аргумента *erfc* больше 3, иными словами, только при выполнении условия:

$$\frac{Q}{\sqrt{2}} > 3. \quad (2.30)$$

2.5. Выполнение задания

В соответствие с п. 2.1 методических указаний, вычислите суммарные потери в ОВ на ЭКУ. Согласно п. 2.2, рассчитайте дисперсию ОВ на ЭКУ, дополнительные потери, обусловленные дисперсией, а также характеристики импульсов на выходе источника оптического излучения передающего модуля ВОЛП и выходе фотоприемника приемного модуля ВОЛП для скоростей передачи PDH E3, SDH STM-1 и STM-4, а также Gigabit Ethernet. Результаты расчета представьте в виде таблицы 2.6.

Определите энергетические характеристики оптического сигнала, согласно п. 2.3. Результаты расчета занесите в виде таблицы 2.7.

Постройте четыре глаз-диаграммы в диапазоне (-2*T*; 2*T*) для каждой из заданных скоростей передачи сигнала. На диаграмме укажите мощность шума фотоприемника, а также, по возможности, чувствительность фотоприемника (если мощность сигнала на выходе фотоприемника P_L и чувствительность фотоприемника P_R – одного порядка). Пример построения глаз-диаграммы по результатам расчета представлен на рис. 2.2.

Согласно методике п. 2.4, рассчитайте показатели качества канала исследуемых цифровых ОСП заданных стандартов. Результаты расчета занесите в таблицу 2.8. Сравните рассчитанные по глаз-диаграммам коэффициенты ошибок *BER* с номинальными допустимыми значениями $BER_{ном}$, соответствующие сетевым стандартам. Сделайте выводы о работоспособности каналов исследуемых ОСП.

Табл. 2.6.

Параметр	Ед. изм.	E3	STM-1	STM-4	GE
B	Мбит/с				
B_L	Мбит/с				
τ_{05}	пс				
T_0	пс				
s_L	пс				
T_L	пс				
D_{ch}	пс				
D_{PMD}	пс				
$\sigma_{ЭКУ}$	пс				
α_{ISI}	дБ				

Табл. 2.7.

Параметр	Ед. изм.	E3	STM-1	STM-4	GE
p_0	дБ				
P_0	мВт				
p_L	дБ				
P_L	мВт				
p_R	дБ				
P_R	мВт				
p_{noise}	дБ				
P_{noise}	мВт				
T	пс				