

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: приобрести практические навыки оценки качества передачи по каналам цифровых систем путем расчета и последующего анализа глаз-диаграммы цифровых сигналов на выходе фотоприемного устройства волоконно-оптической системы передачи.

Краткие сведения из теории

Приемные оптические модули (ПРОМ) являются важными элементами ВОСП, предназначенными для преобразования оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический, который обрабатывается далее электронными устройствами.

Основными элементами ПРОМ являются фотодетектор, преобразующий полученный оптический сигнал в электрический, и каскад электрических усилителей, усиливающих сигнал и преобразующих его в форму, пригодную для обработки.

Фотодетектор, как и источник оптического излучения, должен отвечать определенным требованиям: обладать высокой чувствительностью и быстродействием, вносить минимальные шумы в приемную систему, отличаться стабильностью рабочих характеристик, иметь небольшие размеры, быть высоконадежным и недорогим.

Среди полупроводниковых фотодетекторов наибольшее применение в ВОСП получили PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды. В основе работы фотодетектора лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). Если к полупроводнику приложить напряжение, то появится электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.

Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется полупроводниковая конструкция с *p-n*-переходом, которая называется фотодиодом.

PIN-фотодиоды. Наиболее распространены фотодетекторы на основе **кремниевых и InGaAs PIN-фотодиодов**. Пик чувствительности кремниевых фотодиодов находится в районе длины волны 900 нм, фотодиоды типа InGaAs имеют наибольшую чувствительность в диапазоне длин волн 1300–1500 нм.

Отличительной особенностью *PIN-фотодиода* является наличие *i*-слоя

(слаболегированного полупроводника n -типа) между слоями p - и n -типа (рисунок 1).

Такой i -слой называется обедненным, поскольку в нем нет свободных носителей. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, поэтому все напряжение падает на i -слой и в нем создается максимальное значение электрического поля. Но поскольку в i -слое нет свободных носителей, то в нем нет и электрического тока.

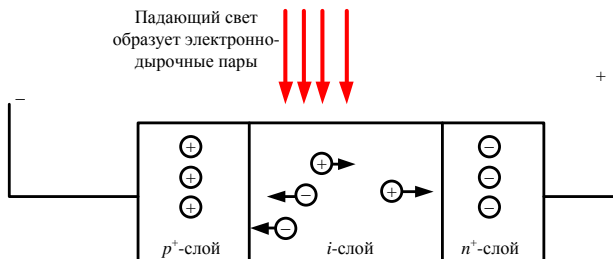


Рисунок 1 – Схема структуры p - i - n -фотодиода

При наличии падающего на i -слой излучения в нем образуются свободные электронно-дырочные пары, которые под воздействием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Электрический ток идет до тех пор, пока образуются электронно-дырочные пары, то есть пока на фотодиод падает свет. Эффективным является взаимодействие излучения только с i -слоем, поэтому его делают протяженным, а крайние слои – узкими.

На рисунке 2 показано поперечное сечение *кремниевого фотодиода*. Его основным материалом является кремний n -типа. Фотодиодные переходы, по сравнению с обычными p - n -переходами, необычны тем, что верхний слой p -типа очень тонок. Кремний имеет обедненный слой электрических зарядов вблизи p - n -перехода. Прикладывая обратное напряжение смещения на такой переход, можно изменять глубину обедненного слоя, и, как следствие, емкость обедненного слоя. С увеличением степени обеднения эта емкость уменьшается до тех пор, пока не будет достигнуто состояние полного обеднения. Обедненный слой особенно важен для характеристик фотодиода благодаря тому, что он в большей степени определяет чувствительность к световому излучению.

Пары электрон-дырка формируются, когда свет поглощается в активной области. В ней электроны отделяются и проходят в область n -типа, а дырки – в область p -типа. Это приводит к возникновению тока, генерируемого падающим светом. Такая миграция электронов и дырок в области их предпочтения называется фотогальваническим эффектом. Генерируемый ток, обычно определяемый как ток короткого замыкания, линейно зависит от света, излучаемого на активную область. Этот ток может изменяться в достаточ-

но широком диапазоне.

На рисунке 3 приведена обобщенная схема фотодетектора на основе InGaAs. Так как ширина запрещенной зоны для InP равна 1,35 эВ, p -слой и n -слой прозрачны для света с длиной волны более 0,92 мкм. Ширина запрещенной зоны для i -слоя, состоящего из материала InGaAs, равна 0,75 эВ. Эта величина соответствует длине волны отсечки 1650 нм. Следовательно, средний слой из материала InGaAs поглощает длины волн в области 1300–1600 нм.

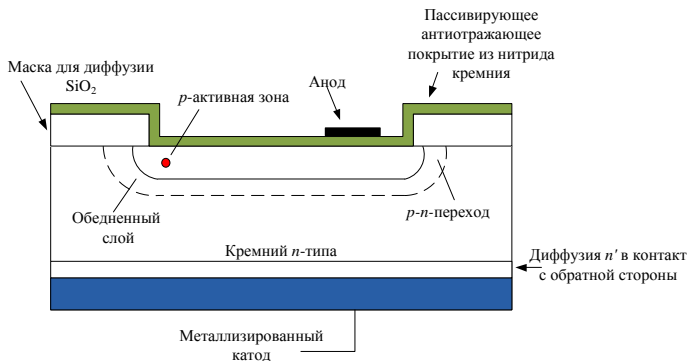


Рисунок 2 – Поперечное сечение кремниевого фотодиода

Этот тип PIN-фотодиодов имеет очень хорошие характеристики во втором и третьем окнах прозрачности.

Детекторы на основе лавинных фотодиодов (Avalanche Photo Diode – APD) представляют из себя PIN-диоды с усилением благодаря лавинному умножению в обратном смещенном p - n -переходе, за счет которого повышается его квантовая эффективность. На рисунке 4 схематически представлено поперечное сечение типичной структуры APD, сочетающей преимущества лавинного и PIN-фотодиода.

На рисунке 4 показаны зоны поглощения и умножения. Поперек зоны приложено электрическое поле, которое разделяет фотогенерируемые дырки и электроны и забрасывает один тип носителей в зону умножения. Эта зона умножения представляет собой область высокой электрической напряженности, способной обеспечить усиление внутреннему фототоку за счет ударной ионизации. Кроме того, способность данного поля к умножению носителей должна позволить достичь эффективного усиления и при напряженности поля ниже напряжения пробоя для данного диода.

Требование высоких значений внутреннего усиления накладывает достаточно жесткие ограничения на качество и однородность полупроводникового материала, поскольку коэффициент умножения экспоненциально сильно зависит от напряженности электрического поля.

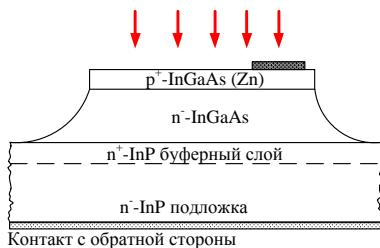


Рисунок 3 – Обобщенная схема PIN-фотодиода на основе InGaAs

Лавинному фотодиоду требуется снабжение стабильным высоким напряжением и более сложная схема смещения, что повышает стоимость и снижает надежность. Из этого следует, что PIN-фотодиоды обычно являются более предпочтительными устройствами для нормального использования. У лавинных диодов чувствительность повышена от 5 до 10 дБ, а время ответа снижено вдвое по сравнению со стандартными PIN-фотодиодами.

Такие лавинные диоды необходимы, когда у системы большие потери и она должна работать при низких отношениях уровня сигнал/шум, как в линиях связи на больших расстояниях. В таких системах экономия за счет дополнительных повторителей перевешивает недостатки.

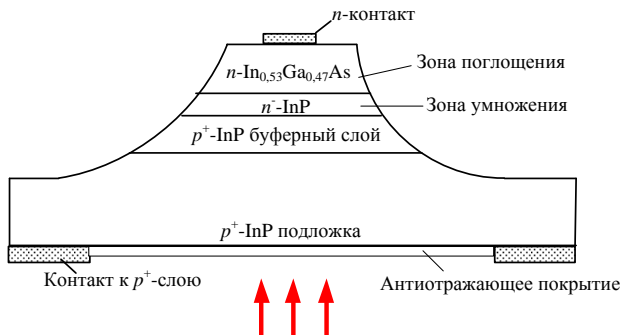


Рисунок 4 – Поперечное сечение типичной гетероструктуры лавинного фотодиода

Глаз-диаграммы применяются для оценки параметров цифровых сигналов как при проведении лабораторных (системных) измерений, так и эксплуатационных.

По своей структуре глаз-диаграммы являются модификацией осциллограмм и отличаются от последних тем, что используют периодическую структуру цифрового сигнала.

Для построения двухуровневой глаз-диаграммы битовый поток подается на осциллограф, в то время как синхронизация внешней развертки производится от битового потока с частотой f .

В случае построения многоуровневых диаграмм сигнал должен проходить через многоуровневый конвертер, а синхронизация производится от символического потока с частотой f_s .

Для калибровки глаз-диаграммы сигнал подают непосредственно на вход

осциллографа. В этом случае глаз-диаграмма имеет вид прямоугольника.

Фильтр (тестируемая система), ограничивающий полосу передаваемого сигнала, вносит существенные изменения в форму импульса, в результате диаграмма приобретает форму «глаза». Глаз-диаграммы используют периодическую структуру цифрового сигнала.

За счет внешней синхронизации развертки получаемые осциллограммы волнового фронта накладываются друг на друга с периодом одного отсчета.

В результате проведения измерений с накоплением получается глаз-диаграмма (рисунок 5), при этом по оси ординат откладывается амплитуда сигналов, по оси абсцисс – время.

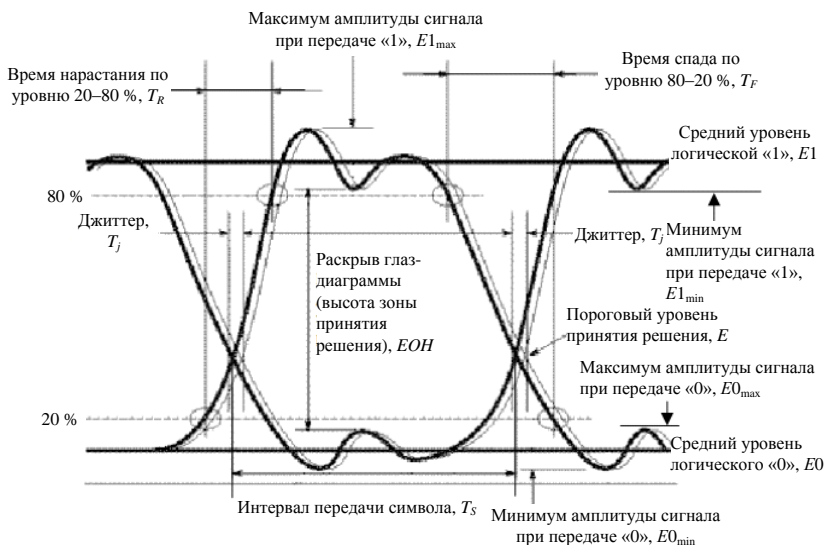


Рисунок 5 – Идентификация глаз-диаграммы

Реальная осциллограмма сигнала «разрезается» посимвольно в соответствии с тактовыми импульсами синхронизирующего генератора, а затем глаз-диаграмма «складывается» из полученных кусков.

В идеальном случае при отсутствии цепей фильтрации в результате такого сложения получится квадрат («квадратный глаз»).

Однако глаз-диаграмма реального сигнала будет значительно отличаться от квадрата, поскольку будет содержать в себе составляющие нарастания фронта сигнала и спада фронта; прямоугольный импульс будет иметь форму колокола.

Исследование глаз-диаграмм позволяет провести детальный анализ цифрового сигнала по параметрам, непосредственно связанным с формой волно-

вого фронта: параметра межсимвольной интерференции, передачи данных, синхронизации и других характеристик.

Глаз-диаграмма представляет собой результат многократного наложения битовых последовательностей с выхода генератора, отображаемый на экране осциллографа в виде диаграммы распределения амплитуды сигнала по времени (рисунок б).

Эффекты уширения импульса, а также фазовое дрожание сигнала вызывают появление взаимных искажений между символами, что приводит к пересечению глаз-диаграммы с временной осью в разные промежутки времени. Максимальная ширина области пересечения с временной осью определяется как пиковое фазовое дрожание, или джиттер передачи данных T_j . Джиттер измеряется обычно в единицах времени или как отношение к интервалу передачи символа T_j/T_s .

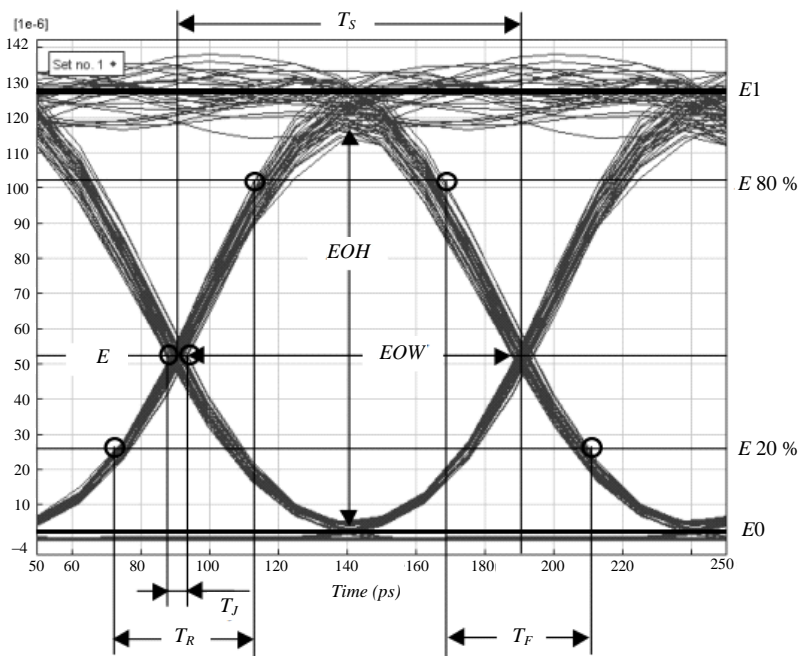


Рисунок б – Глаз-диаграмма на экране осциллографа

Эффекты уширения импульса, а также фазовое дрожание сигнала вызывают появление взаимных искажений между символами, что приводит к пересечению глаз-диаграммы с временной осью в разные промежутки времени.

Суммарные потери оптического волокна (ОВ) на заданном участке A скла-

дываются из собственных потерь ОВ и потерь в неразъемных соединениях:

$$A = \alpha L + \alpha_n N_n + \alpha_p N_p, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания ОВ на рабочей длине волны λ , дБ/км;

L – заданная протяженность кабельного участка, км;

α_n – максимальное значение потерь в неразъемном соединении на заданной рабочей длине волны λ . Для 1310 нм $\alpha_n = 0,2$ дБ, для 1550 нм $\alpha_n = 0,1$ дБ;

α_p – потери мощности сигнала в разъемных соединениях, предполагая использование оптических разъемов типа FC/PC ($\alpha_p = 0,5$ дБ);

N_p – количество разъемных соединений на участке ($N_p = 4$, т. е. по два разъемных соединения на приеме и передаче, в том числе по одному на оптическом кроссе и на приемопередающем модуле оптической системы передачи);

N_n – количество неразъемных соединений

$$N_n = \frac{L}{L_c} - 1, \quad (2)$$

где L_c – строительная длина оптического кабеля, обычно составляет 2–6 км.

Дисперсией ОВ называют увеличение длительности оптических импульсов при их распространении по ОВ. Неодинаковая скорость распространения отдельных составляющих оптического сигнала является основной причиной дисперсии. Одномодовые 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.

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 межсимвольной интерференции α_{ISI} , дБ, определяются из следующего выражения:

$$\alpha_{ISI} = 10 \lg \left[\frac{1}{1 - 1,425 \cdot \exp\left(-1,28 \frac{T_0}{T_L}\right)} \right], \quad (3)$$

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

$$T_0 = \frac{0,48}{B_L}, \quad (4)$$

B_L – скорость передачи оптического сигнала в линии, бит/с.

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

$$B_L = \frac{N}{M} B, \quad (5)$$

где B – скорость передачи информации, соответствующая заданному уровню цифровой иерархии, бит/с (таблица 1);

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

$$T_L = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{0,35}{B_L}\right)^2 + \sigma^2}, \quad (6)$$

где σ – прогнозируемое среднеквадратическое значение дисперсии на кабельный участок

$$\sigma = \sqrt{D_{ch}^2 + D_{PMD}^2}, \quad (7)$$

D_{ch} и D_{PMD} – значения хроматической и поляризационной модовой дисперсий на участке соответственно, с.

Таблица 1 – Уровни плезиохронной и синхронной цифровых иерархий

Уровень цифровой иерархии	Поток	Скорость передачи информации B , Мбит/с	Тип линейного кода
Плезиохронная цифровая иерархия (PDH)	E1	2,048	1B2B
	E2	8,448	
	E3	34,368	5B6B
Синхронная цифровая иерархия (SDH)	STM-1	155,520	10B11B

Прогнозируемое значение хроматической дисперсии (D_{ch}) на участке заданной протяженности (L) определяется по следующей формуле:

$$D_{ch} = D\Delta\lambda L, \quad (8)$$

где D – коэффициент хроматической дисперсии на заданной рабочей длине волны (λ), пс/(нм·км);

$$D = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \quad (9)$$

где S_0 – параметр наклона спектральной характеристики дисперсии ОВ в точке нулевой дисперсии, с/(нм²·км);

$\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения источника;

λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Прогнозируемое значение ПМД на ЭКУ заданной протяженности

$$D_{PMD} = PMD \sqrt{L}. \quad (10)$$

где PMD – параметр ПМД волокна, пс/ $\sqrt{\text{км}}$.

Уровень мощности на выходе источника оптического излучения, дБ

$$P_0 = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{10^{-3}}, \quad (11)$$

где P_0 – мощность на выходе источника оптического излучения, Вт.

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

$$P_L = P_0 - A - \alpha_{ISI}. \quad (12)$$

Мощность оптического сигнала на выходе фотоприемника

$$P_L = 10^{(0,1 P_L - 3)}, \quad (13)$$

где P_L – уровень мощности оптического сигнала на выходе фотоприемника, дБ.

Для расчета помехозащищенности цифрового канала необходимо вычислить уровень мощности оптического шума, создаваемого фотоприемником p_{noise} .

Фотоприемные устройства высокоскоростных ВОСП проектируются таким образом, чтобы логарифм отношения полосы пропускания электрического фильтра к полосе пропускания оптического фильтра составлял не менее 2 дБ. С учетом вышесказанного, максимальный уровень мощности шума фотоприемника, дБ,

$$P_{noise} = P_R - 20 \cdot \lg(Q) - 2, \quad (14)$$

где P_R – заданный уровень чувствительности фотоприемника, дБ;

$Q_{ном}$ – номинальное значение Q -фактора, соответствующее нормированному коэффициенту ошибок $BER_{ном}$ в цифровом канале связи (таблица 2).

Очевидно, чувствительность фотоприемника P_R и мощность шума P_{noise} рассчитываются как

$$P_R = 10^{(0,1P_R^{-3})}, \quad (15)$$

$$P_{noise} = 10^{(0,1P_{noise}^{-3})}. \quad (16)$$

Таблица 2 – Соответствие допустимых значений коэффициента битовых ошибок ($BER_{ном}$) и номинальных значений Q -фактора ($Q_{ном}$)

Стандарт	E1, E2, E3	STM-1	STM-4
$BER_{ном}$	10^{-9}	10^{-10}	10^{-12}
$Q_{ном}$	5,99	6,63	7,04

Построение глаз-диаграммы осуществляется путем наложения отклика системы в предположении гауссовой формы импульса на передачу «изолированного» логического «0» в последовательности логических «1» (например, комбинация 101 – при трехсимвольной последовательности)

$$P_{out}^0(t) = P_L \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t+T}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right] \right\} \quad (17)$$

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

$$P_{out}^1(t) = P_L \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t+T}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (18)$$

где erf – вспомогательная функция интеграла ошибок

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy;$$

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

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}; \quad (19)$$

T – интервал передачи битовой последовательности, с:

$$T = N_{symp} \tau_{05}, \quad (20)$$

N_{symp} – количество символов битовой последовательности ($N_{symp} = 3$);

τ_{05} – длительность импульса на уровне 0,5 от его максимума на выходе источника оптического излучения, обратно пропорциональна ско-

рости передачи сигнала в линии:

$$\tau_{05} = \frac{1}{B_L}. \quad (21)$$

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 системы передачи. 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 электрическом уровне, а именно – непосредственно 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 .

Предварительно для оценки параметров распределений состояний «1» и «0» определяется точка максимального раскрытия глаз-диаграммы:

$$\tau_{open} = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_L^2}\right)}} \right] \frac{s_L^2}{T}. \quad (22)$$

Значения, соответствующие минимальной зарегистрированной мощности при передаче логической «1» $P1_{min}$ и максимальной зарегистрированной мощности при передаче логического «0» $P0_{max}$ рассчитываются по следующим формулам:

$$P1_{min} = P_{out}^1(\tau_{open}), \quad (23)$$

$$P0_{max} = P_{out}^0(\tau_{open}). \quad (24)$$

Исходя из предположения Гауссова распределения состояний логической «1» и логического «0», определите характеристики распределений состояний:

– математическое ожидание $E1$ и $E0$

$$E1 = \begin{cases} P_L, P_L \geq P_R, \\ P_R, P_L < P_R, \end{cases} \quad (25)$$

$$E0 = P_{noise}; \quad (26)$$

– среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{\min}}{3}, \quad (27)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P0_{\max}}{3}, E0 \leq P0_{\max}; \\ \frac{E0 - P0_{\max}}{3}, E0 > P0_{\max} \end{cases}; \quad (28)$$

– Q -фактор

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (29)$$

При этом сам коэффициент ошибок BER определяется по следующей формуле:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right), \quad (30)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ – вспомогательная функция интеграла ошибок:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy. \quad (31)$$

В случае если $(Q/\sqrt{2}) > 3$, то можно использовать приближенную формулу расчета BER :

$$BER = \frac{1}{Q\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right). \quad (32)$$

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 Выберите и запишите исходные данные для расчета из таблицы 3 в соответствии с заданным вариантом. Из таблиц в приложении А выпишите параметры для заданных типов приемника, источника и оптического кабеля.

3 Используя формулы (1)–(2), рассчитайте суммарные потери в ОВ на заданном участке.

4 Определите значения дисперсии на заданном участке с помощью формул (3)–(10).

Таблица 3 – Исходные данные

Вариант	Длина кабельного участка L , км	Рабочая длина волны λ , нм	Тип источника	Ширина спектра излучения источника $\Delta\lambda$, нм	Тип приемника	Марка ОВ	Уровень цифровой иерархии
1	110	1310	ЛД-1300-10	2	ATAV2400	Hitachi cable G.652	E1
2	120	1550	ЛД-1550-5	4	PP-10G	OFS MC-SM 332	E2
3	130	1310	ЛД-1300-20	3	MDRI	Alcatel 6901	E3
4	100	1550	ЛД-1550-20	5	DRP2S	Corning SMF-28	STM-1
5	100	1310	ПОМ-470	10	PROM-50	Alcatel 6900	STM-1
6	150	1550	ТСД-1500	8	PROM-34	Corning SMF-28e	E1
7	160	1310	ЛД-1300-5	1,5	DRP2 43	YOFC 268WY	E2
8	200	1550	ЛД-1550-30	2	ПРОМ-367	Pure-Band	E3
9	190	1310	ПОМ-460М	8	PTAV2400	Sumitomo Electric G.652	STM-1
10	140	1550	ЛД-1550-10	1	ПРОМ-367	SF-SMF-x	E1
11	100	1310	ТСД-1300	7	ПРОМ-364	OFS MC-SM 332	E2
12	120	1550	ТСД-1500	5	PROM-155	Alcatel 6900	E3
13	170	1310	ИЛПН-360	1	MD(C)RL	Alcatel 6901	E1
14	120	1550	ЛД-1550-20	3	PTAV155C	Hitachi cable G.652	STM-1

5 Рассчитайте параметры глаз-диаграммы по формулам (11)–(21) и выполните ее построение в диапазоне $(-2T; 2T)$. 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).

6 Определите показатели качества канала цифровой передачи по формулам (22)–(32). Результаты расчета сведите в таблицу 4.

7 Сделайте вывод по результатам расчета.

Таблица 4 – Результаты расчета

Номер варианта	
Суммарные потери ОВ A , дБ	
Среднеквадратическое значение дисперсии σ , с	
Потери из-за межсимвольной интерференции α_{ISI} , дБ	
Мощность оптического сигнала на выходе фотоприемника P_L , мВт	
Мощность шума P_{noise} , мВт	
Среднеквадратическая длительность гауссова импульса на выходе фотоприемника ОСП s_L , с	
Значение точки максимального раскрыва глаз-диаграммы τ_{open} , с	
Среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0 , мВт	
Q -фактор	
Коэффициент ошибок BER	

Содержание отчета

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для выполнения расчета.
- 3 Подробные расчеты.
- 4 Глаз-диаграмма.
- 5 Вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Джиттер.
- 2 Принцип действия PIN -фотодиодов.
- 3 Назначение глаз-диаграммы.
- 4 Отличие кремниевых фотодиодов.
- 5 Потери из-за межсимвольной интерференции.
- 6 Структура PIN -фотодиода на основе InGaAs.
- 7 Отличия лавинных фотодиодов.
- 8 Дисперсия.
- 9 Принцип действия лавинных фотодиодов.
- 10 Структура PIN -фотодиодов.
- 11 Параметры глаз-диаграммы.
- 12 Назначение фотодетекторов и требования к ним.
- 13 Структура лавинных фотодиодов.
- 14 Структура кремниевых фотодиодов.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

**ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ**

Таблица А.1 – Параметры передатчиков на лазерах

Наименование	Длина волны, нм	Рабочий ток, мА	Пороговый ток, мА	Мощность, мВт
ЛД-1300-5	1310	35	10	5
ЛД-1300-10	1310	40	10	10
ЛД-1300-20	1310	60	10	20
ЛД-1300-30	1310	90	10	30
ЛД-1550-5	1550	50	15	5
ЛД-1550-10	1550	70	15	10
ЛД-1550-20	1550	100	15	20
ЛД-1550-30	1550	150	30	30

Таблица А.2 – Параметры передатчиков на диодах

Наименование	Длина волны, нм	Мощность, мВт	Рабочий ток, мА	Рабочее напря- жение, В
ТСД-1300	1270–1330	15	30–50	1,3–1,7
ТСД-1500	1510–1560	40	30–70	1–1,7
ПОМ-460М	1250–1350	20	35–70	4,5–5,5
ПОМ-470	1250–1350	4	35–70	4–5
ИЛПН-360	1250–1350	4	50–70	4,5–5,5
СЛД-1060	1057–1068	10	150–400	1,3–2
СЛД-1300	1270–1330	5	150–400	1,3–2

Таблица А.3 – Параметры приемников оптического излучения

Тип модуля	Длина волны, нм	Скорость приема, Мбит/с	Чувствительность, дБм или А/Вт	Напряжение питания, В
АТАV2400	1200–1600	800–2500	–34	4,5–5,5
РТАV155С	1200–1600	50–155	–39	4,5–5,5
РТАУ622С	1200–1600	200–622	–33	4,5–5,5
РТАV2400	1200–1600	800–2500	–24	4,5–5,5
DT200	1200–1600	10–200	–35...–32	4,75–5,46
DRP2 43	1000–1600	10–155	–50	–
DRP2S	1000–1600	622	–38	–
PP-10G	1200–1600	60–10000	–18	7,5–8,5
MD(C)RL	1200–1600	16–622	–40	4,7–5,3
MDRI	1200–1600	800–2500	–22	4,7–5,3
ПРОМ-364	1200–1570	4–320	–55	5

Окончание таблицы А.3

Тип модуля	Длина волны, нм	Скорость приема, Мбит/с	Чувствительность, дБм или А/Вт	Напряжение питания, В
ПРОМ-365	1200–1570	2500	–28	5
ПРОМ-367	1200–1570	2, 8, 34	–31	5
ПРОМ-376	1200–1570	622	–31	3,3
PROM-34	1100–1650	2, 8, 34	–39	5
PROM-155	1100–1650	155	–36	5
PROM-50	1300–1550	2, 8, 34	–43	5

Таблица А.4 – Характеристики стандартных одномодовых оптических волокон со ступенчатым профилем показателя преломления

Производитель		Alcatel		Corning		Optical Fiber Solutions	Samsung Electronics	Sumitomo Electric Industries Ltd.	Yangtze Optical Fibre and Cable	Hitachi cable	
Марка ОВ		6900	6901	SMF-28	SMF-28e	OFS MC-SM 332	SF-SMF-x	G.652	Pure-Band	YOFC 268WY	G.652
Затухание α , дБ/км	$\lambda = 1310$ нм	0,34	0,35	0,34	0,34	0,35	0,33	0,33	0,36	0,35	0,35
	$\lambda = 1550$ нм	0,24	0,22	0,20	0,20	0,22	0,19	0,19	0,22	0,21	0,21
Длина волны нулевой дисперсии λ_0 , нм		1300	1300	1302	1302	1300	1302	1312	1313	1302	1300
Параметр наклона спектральной характеристики дисперсии ОВ в точке нулевой дисперсии S_0 , пс/(нм ² ·км)		0,092	0,090	0,090	0,086	0,088	0,091	0,086	0,086	0,093	0,092
Параметр ПМД ОВ, PMD, пс/√км		0,1	0,08	0,1	0,08	0,1	0,1	0,1	0,02	0,2	0,2
Строительная длина кабеля, км		2	4	6	2	4	4	2	6	6	4