

8. ГЛАЗ-ДИАГРАММА

8.1. Методика измерения

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

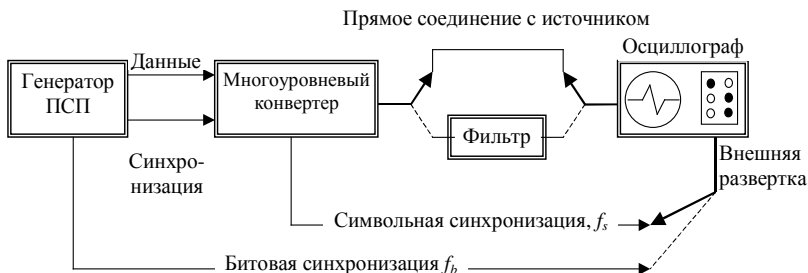
По своей структуре глаз-диаграммы являются модификацией осциллограмм, и отличаются от последних тем, что используют периодическую структуру цифрового сигнала.

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

В случае построения многоуровневых диаграмм сигнал должен проходить через многоуровневый конвертер, а синхронизация производится от символьного 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».



Построение глаз-диаграммы

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, при этом по оси ординат откладывается амплитуда сигналов, по оси абсцисс – время, соответственно.

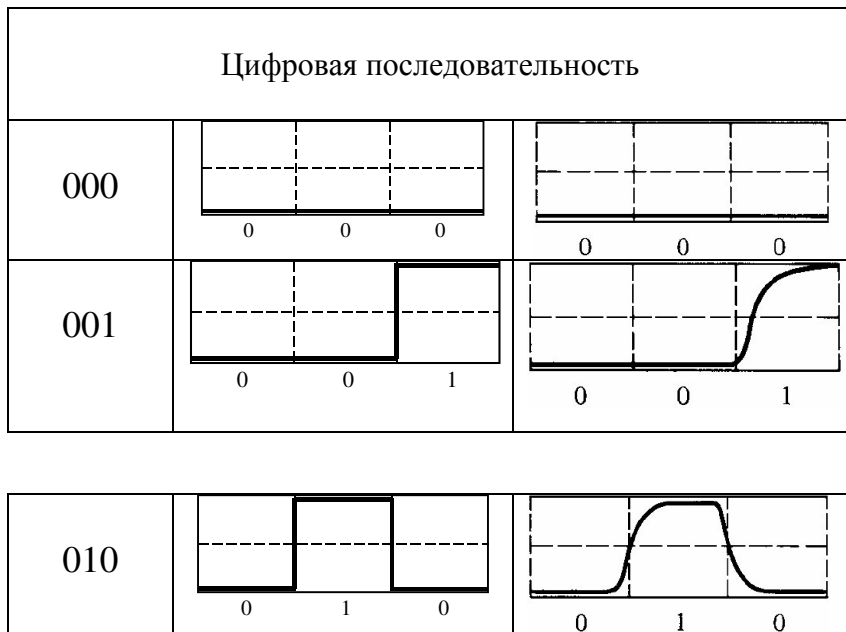
Пример формирования глаз-диаграммы непосредственно на выходе источника (а) и на выходе линейного тракта (б).

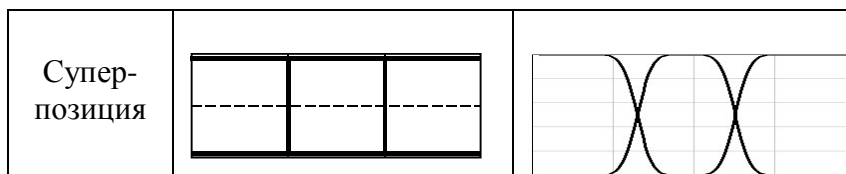
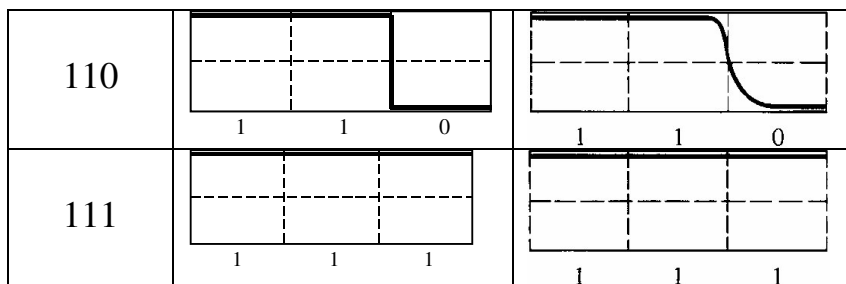
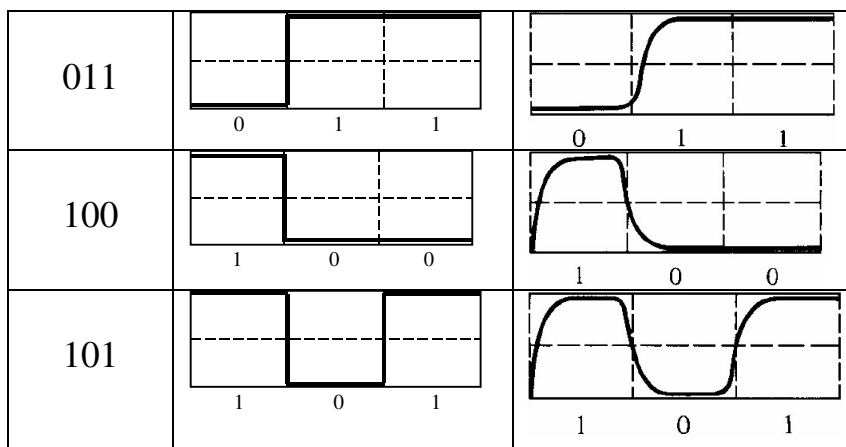
Реальная осциллограмма сигнала «разрезается» по-символьно в соответствии с тактовыми импульсами синхронизирующего генератора, а затем глаз-диаграмма «складывается» из полученных кусков.

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, спада фронта, прямоугольный импульс будет иметь форму колокола, в результате получится диаграмма более похожая на глаз.

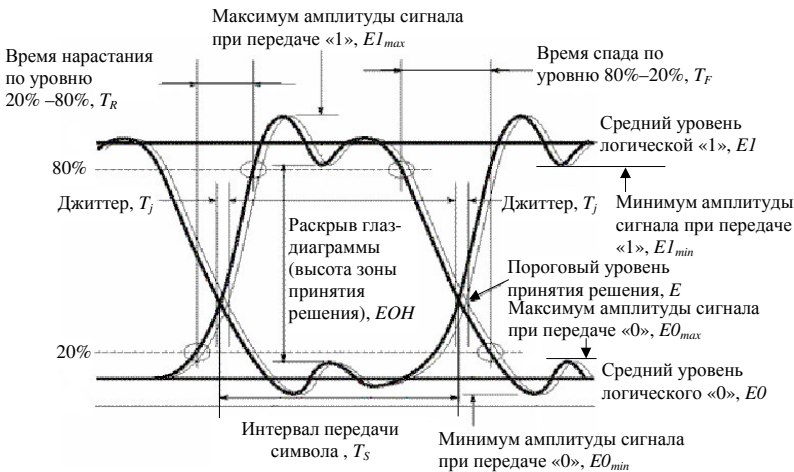
Исследование глаз-диаграмм позволяет провести детальный анализ цифрового сигнала по параметрам, непосредственно связанным с формой волнового фронта: параметра межсимвольной интерференции (ISI), джиттера передачи данных, джиттера синхронизации и других характеристик.





8.2. Идентификация глаз-диаграмм

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



Идентификация глаз-диаграммы

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 .

8.3. Измерение параметров передачи ЦСП по глаз- диаграмме

8.3.1. Глубина модуляции

Коэффициент гашения (EX – Extinction Ratio) является мерой оценки глубины модуляции источника оптического излучения передающего модуля ВОСП.

EX является одной из составляющих, определяющих протяженность линейного тракта, обеспечивающей надежные передачу и прием сигнала.

Глубина модуляции определяется как логарифм отношения средней мощности сигнала при передаче логической «1» к средней мощности сигнала при передаче логического «0»:

$$EX = 10 \lg \left(\frac{E1}{E0} \right), \text{ дБ}$$

8.3.2. Q-фактор

Фундаментальным показателем качества цифровых систем передачи является коэффициент ошибок ($K_{ош}$ или BER – Bit Error Ratio).

Современные высокоскоростные СП на магистральных ЛС разработаны для практически безошибочной работы ($BER < 10^{-15}$).

Однако для подобных ЦСП довольно трудно проводить прямые измерения BER (например, с помощью анализатора канала или измерителя коэффициента ошибок) в силу больших затрат времени.

Так, например, регистрация 10 битовых ошибок для получения BER порядка 10^{-14} при скорости передачи уровня STM-64 (10 Гбит/с) потребуются проведение измерений в течение 28 часов.

Подобный интервал измерений вполне приемлем для приемо-сдаточных испытаний, выполняемых в процессе пусконаладочных работ СП, но вряд ли может применяться при настройке оборудования или мониторинге действующих СП.

В настоящее время разработан новый подход к решению данной проблемы на основе измерения Q-фактора: базируясь на статистическом анализе физических параметров сигнала, данный метод позволяет менее чем за минуту оценить BER в диапазоне до 10^{-40} . В частности, подобный метод реализован в измерителях Q-фактора компании Asterna.

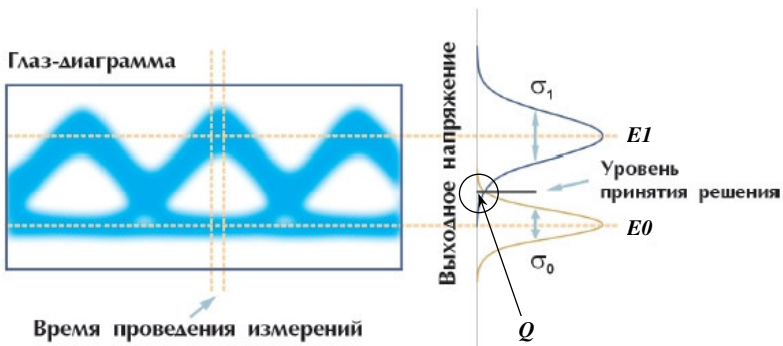
Q-фактор – это параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой СП. Существует определенная функциональная зависимость Q-фактора сигнала и измеряемого коэффициента ошибок BER.

Q-фактор определяется путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрической уровне, а именно – 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 .

Q-фактор рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0}$$



Оценка Q-фактора

При этом коэффициент ошибок пропорционален площади пересечения двух функций распределений состояний «1» и «0»:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|E - E0|}{\sigma_0} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|E1 - E|}{\sigma_1} \right)$$

где E – порог принятия решения 1/0 цифрового фото-приемника;

$erfc(x)$ – вспомогательная функция интеграла ошибки:

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

Таким образом, BER является суммой двух величин: условной вероятности принять «0» за «1» и условной вероятности принять «1» за «0».

На практике при $x > 3$ функцию $erfc(x)$ можно приближенно рассчитывать по следующей формуле:

$$erfc(x) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), x > 3.$$

В этом случае достаточно легко получить выражение, позволяющее оценить величину порога принятия решения, при которой значение BER будет минимальным:

$$E_{\min} = \frac{E1\sigma_0 + E0\sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

В этом случае E_{\min} делит «зону ошибок» на две равные части.

При этом сам коэффициент ошибок при оптимальном E_{min} можно определить по следующей формуле:

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

8.3.3. Методика измерения Q-фактора

Исходя из определения Q-фактора, основная задача при его измерении заключается в оценке функций распределения состояний «1» и «0».

Один из методов измерения Q-фактора – метод асинхронной выборки (метод гистограмм напряжения). В этом методе используется цифровой запоминающий осциллограф для построения гистограммы напряжений в центре глаз-диаграммы ($\varphi = \pi$).

Данный метод имеет несколько принципиальных ограничений. При относительно высоких скоростях передачи (более сотни Мбит/с, не говоря уже о Гбит/с) скорость выборки осциллографа, которая обычно не превышает нескольких сотен кГц, позволяет использовать лишь небольшую часть потока данных.

Существенное увеличение времени измерений может практически полностью решить указанную проблему, однако делает данный метод менее пригодным для практического использования.

Однако главным недостатком данного метода является высокая погрешность оценки Q-фактора по данным гистограммы напряжения, полученным в центре глаз-диаграммы.

В этом случае форма распределения состояний «1» и «0» может существенно отличаться от Гауссовой за счет шума во входных цепях осциллографа, фазовых вариаций сигнала и эффектов, связанных с последовательностью сигнала.

Существует модифицированный вариант данной методики, получивший название метод синхронной выборки, когда цифровой запоминающий осциллограф синхронизируется от сигнала и измерения проводятся в точке глаз-диаграммы $\varphi=0$.

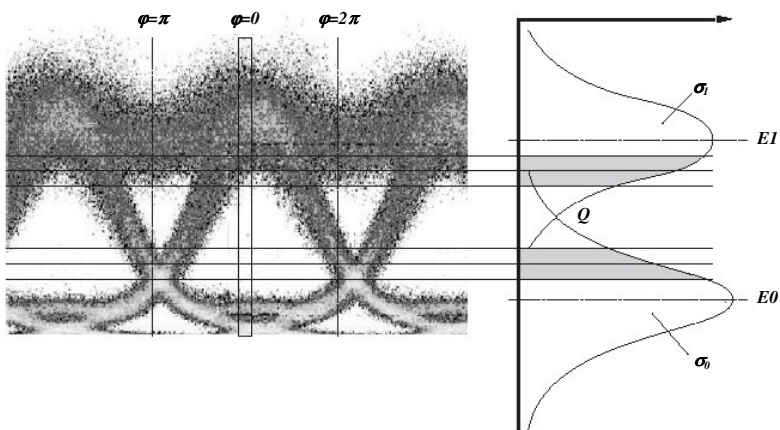
Однако, данный метод также не снимает проблемы измерений, связанной со скоростью выборки осциллографа и эффектов последовательности.

В настоящее время, наиболее точным является метод синхронной выборки с переменным порогом. Данный метод, в частности, реализован в анализаторах ONT-30/ONT-50 компании Asterna. В этом случае применяется двойная чепь принятия решений 0/1: один детектор работает с «обычным порогом», а второй – со смещенным.

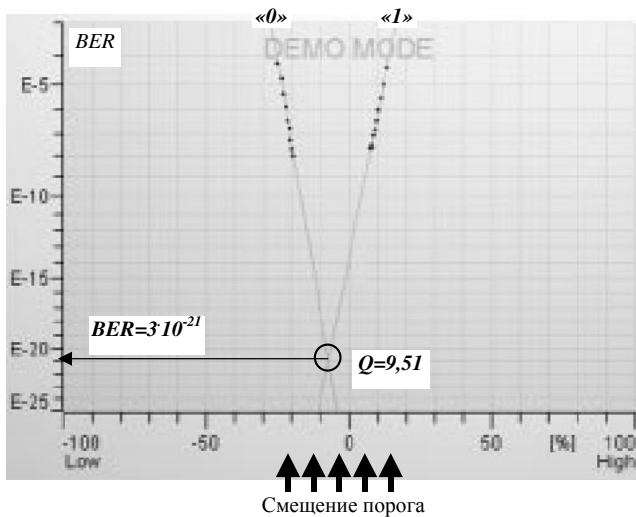
Сравнение результатов двух детекторов позволяет точно определить BER при смещенном пороге, независимо от последовательности сигнала.

Изменение порога переменного детектора сначала в области «1», затем в области «0», позволяет получить оценку формы распределений по его склонам в относительных координатах «отклонение порога/BER».

В результате переменный порог смещается в области с $BER=10^{-5} - 10^{-10}$, что значительно уменьшает время измерений до нескольких секунд. Полученные результаты аппроксимируются, затем оцениваются Q-фактор и BER.



Метод синхронной выборки с переменным порогом



Результаты измерения методом переменного порога

8.3.4 Маска глаз-диаграммы

При оценке качества передачи сигнала конкретной ЦСП заданного уровня цифровой иерархии (стандарта, спецификации) удобно использовать маску (шаблон) глаз-диаграммы.

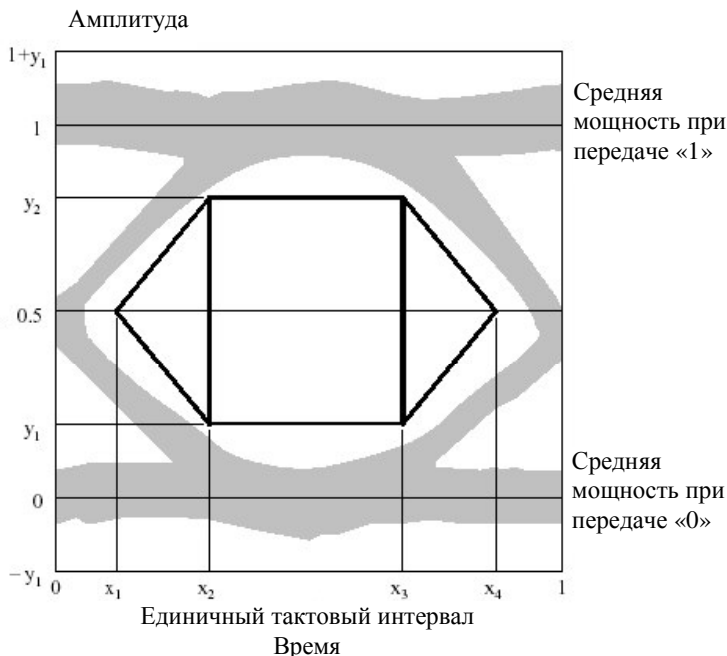
Маска глаз-диаграммы представляет собой некоторую эквивалентную зону принятия решения, границы которой строятся по заданным параметрам, соответствующим уровню тестируемой ЦСП.

Тестирование выполняется следующим образом: заданная маска накладывается на реальную, полученную в результате измерений глаз-диаграмму (большинство современных цифровых анализаторов позволяют выполнить данную операцию).

Если границы маски находятся внутри или совпадают с зоной раскрытия глаз-диаграммой, можно сделать вывод, о соответствии тестируемой ЦСП показателям качества заданного уровня цифровой иерархии (BER, джиттер).

В противном случае требуется проведение дополнительных мероприятий, уменьшающих искажения формы сигнала ЦСП при передаче по линейному тракту.

При наложении маски на полученную глаз-диаграмму также учитывается не только соответствие раскрытия глаз-диаграммы, но и ограничения на максимальные отклонения от среднего уровня.



Стандартная маска глаз-диаграммы

Параметры стандартной маски глаз-диаграммы для ЦСП SDH, согласно рекомендациям ITU-T G.957 представлены в таблице:

	x_1/x_4	x_2/x_3	y_1/y_2	x_3-x_2
STM-1	0.15/0.85	0.35/0.65	0.20/0.80	-
STM-4	0.25/0.75	0.40/0.60	0.20/0.80	-
STM-16	-	-	0.25/0.75	0.2

Значения представлены в относительных единицах: по оси Y – относительно среднего значения мощности оптического излучения при передаче логической «1», по оси

X – относительно единичного тактового интервала для соответствующего уровня SDH.

8.4. Расчет глаз-диаграммы

Предварительно определяется уровень мощности на выходе источника оптического излучения:

$$p_0 = 10 \lg \left(\frac{P_0}{10^{-3}} \right), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где P_0 – мощность на выходе источника оптического излучения.

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

$$p_L = p_0 - A_{\text{ЭКУ}} - \sum a_{\text{ш}}, \text{ дБ}. \quad (2)$$

Соответственно, мощность оптического сигнала на выходе фотоприемника ОСП:

$$P_L = 10^{0,1 \cdot p_L}, \text{ мВт}. \quad (3)$$

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:

$$OSNR = 20 \cdot \lg(Q_{ном}) + 10 \cdot \lg\left(\frac{BW_e}{BW_o}\right) = 20 \cdot \lg(Q_{ном}) + 2, \text{ дБ}, \quad (4)$$

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 (4), максимальный уровень мощности шума фотоприемника p_{noise} можно оценить по следующей формуле:

$$P_{noise} = P_R - 20 \cdot \lg(Q_{ном}) - 2, \text{ дБ}, \quad (5)$$

где P_R – уровень чувствительности фотоприемника, дБ;

P_{noise} – уровень шума фотоприемника, дБ.

Очевидно, чувствительность фотоприемника и мощность шума рассчитывается как

$$\begin{aligned} P_R &= 10^{0,1 \cdot P_R}, \text{ Вт}; \\ P_{noise} &= 10^{0,1 \cdot P_{noise}}, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (6)$$

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 3-х символьной последовательности)

$$P_{out}^{00}(t) = P_L \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\} \quad (7)$$

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

$$P_{out}^{11}(t) = P_L \cdot \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{(t+T)}{s_L \sqrt{2}} \right] - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{t}{s_L \sqrt{2}} \right) \right\}, \quad (8)$$

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

$$s_L = \frac{T_L}{2,563}, \text{ с;} \quad (9)$$

T – интервал передачи битовой последовательности:

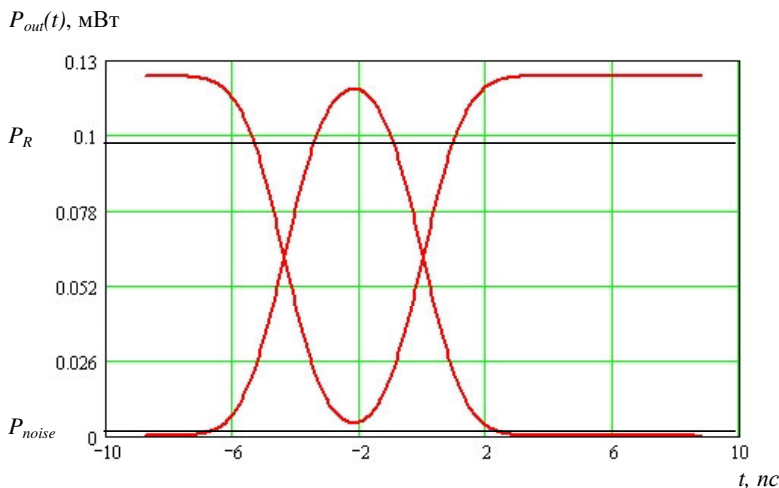
$$T = N_{\text{symp}} \cdot \tau_{05}, \text{ с,} \quad (10)$$

где N_{symp} – количество символов битовой последовательности, в данном случае принять $N_{\text{symp}}=3$;

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

$$\tau_{05} = \frac{1}{B_L}, \text{ с.} \quad (11)$$

Пример построения глаз-диаграммы по результатам расчета в диапазоне $(-2T; 2T)$ представлен на рис.



Пример построения глаз-диаграммы.

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.

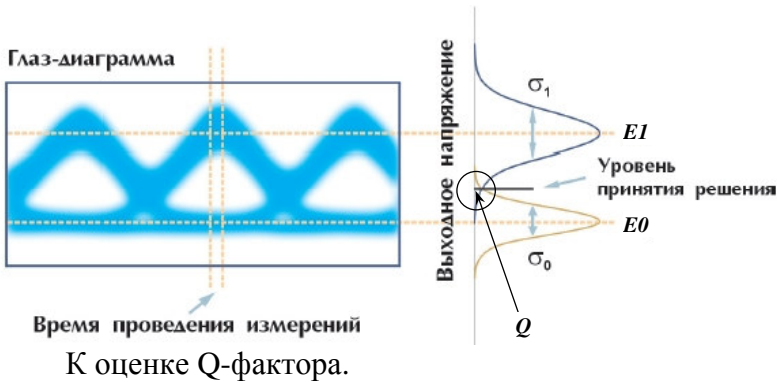
Известна методика оценки коэффициента ошибок BER на основе определения Q-фактора. Q-фактор – это параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой СП.

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 – 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 .

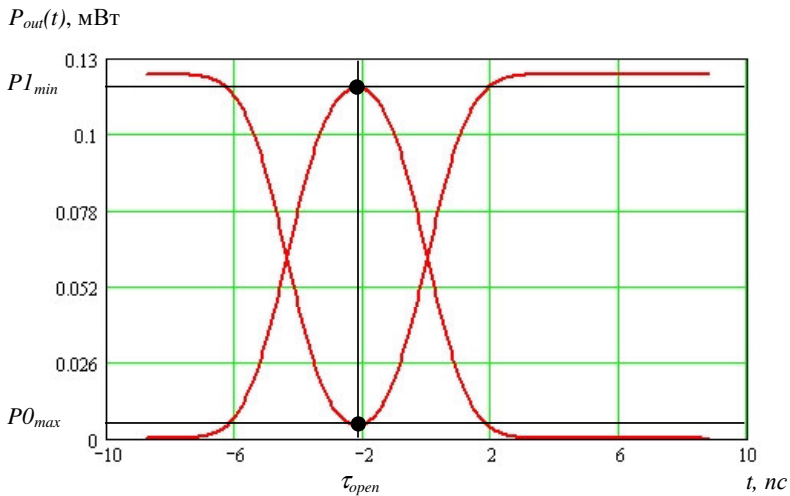


Предварительно, для оценки параметров распределений состояний «1» и «0», определяется точка максимального раскрыва глаз-диаграммы:

$$\tau_{open} = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\exp\left(\frac{T^2}{s_{out}^2}\right)}} \right] \cdot \frac{s_{out}^2}{T}, \text{ с.} \quad (12)$$

Затем определяются 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» $P0_{max}$:

$$\begin{aligned}
 P1_{min} &= P_{out}^{''1''}(\tau_{open}), \text{ мВт} \\
 P0_{max} &= P_{out}^{''0''}(\tau_{open}), \text{ мВт}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$



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

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

$$E1 = \begin{cases} P_L, & P_L \geq P_R \\ P_R, & P_L < P_R \end{cases}, \text{ мВт} \quad (14)$$

$$E0 = P_{noise}, \text{ мВт} \quad (15)$$

и среднеквадратическое отклонение σ_1 и σ_0 , соответственно, используя правило «три сигма»:

$$\sigma_1 = \frac{E1 - P1_{\min}}{3}, \text{ мВт} \quad (16)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{E0 + P0_{\max}}{3}, & E0 \leq E0_{\max} \\ \frac{E0 - P0_{\max}}{3}, & E0 > E0_{\max} \end{cases}, \text{ мВт.} \quad (17)$$

Q-фактор рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \frac{|E1 - E0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (18)$$

При этом сам коэффициент ошибок BER определяется по следующей формуле:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (19)$$

где $erfc$ – вспомогательная функция интеграла ошибки:

$$erfc(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta. \quad (20)$$

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

$$\frac{Q}{\sqrt{2}} > 3. \quad (21)$$