

УДК 621.376.52:004.94

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЯ BER ДЛЯ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ASK В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ LABVIEW

Тун Кхант, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Куручкин А.Е. – канд. техн. наук, доцент кафедры ИРТ

Аннотация. Представлены результаты расчёта вероятности ошибки BER для разработанной модели цифрового канала связи с ASK в LabVIEW. Для подтверждения корректности работы разработанной модели произведено её сравнение с моделью канала, основанной на базовых элементах библиотеки Modulation Toolkit.

Ключевые слова. Помехоустойчивость, вероятность ошибки, АБГШ, канал Гаусса, отношение сигнал/шум, глаз-диаграмма.

Вероятность битовой ошибки BER (Bit Error) служит ключевым показателем эффективности цифровых систем связи. Поэтому целью статьи является демонстрация методики расчёта отношения сигнал/шум и вероятности битовой ошибки BER по глаз-диаграмме, а также подтверждение корректности функционирования разработанной версии модели цифрового канала связи с ASK в программной среде LabVIEW [1] и её сравнение с образцовой моделью компании National Instruments, основанной на стандартных элементах библиотеки Modulation Toolkit (MT) (рисунок 1).

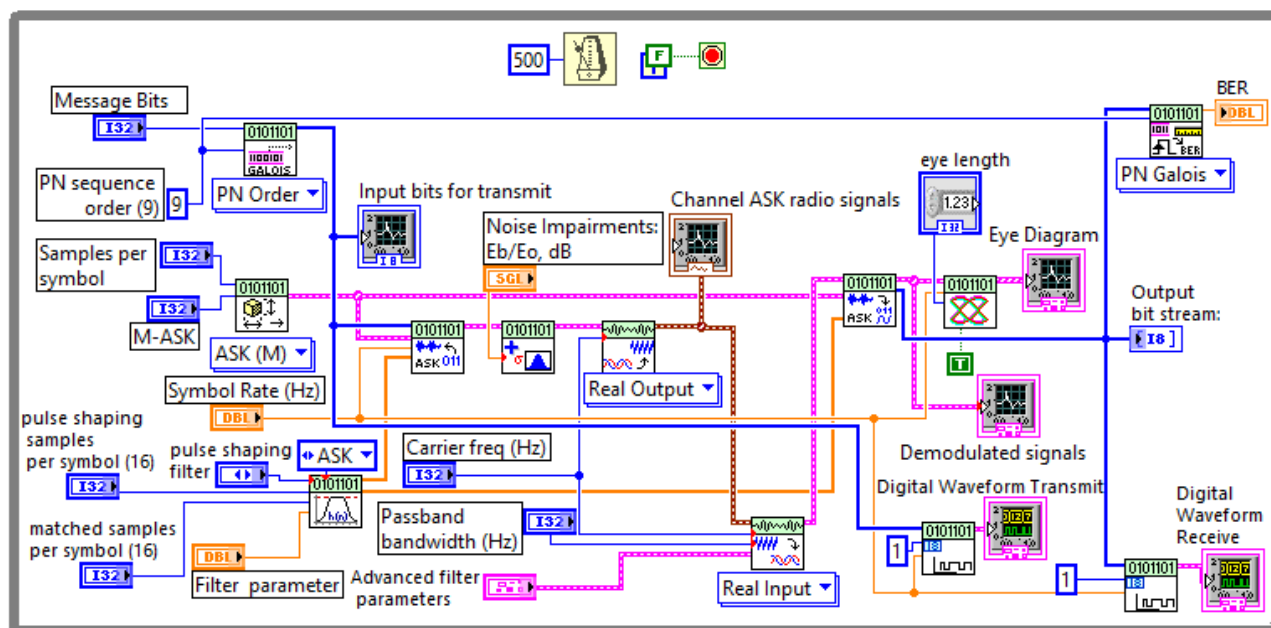


Рисунок 1 – Блок-схема канала связи с ASK на элементах библиотеки MT

Особенностью образцовой модели является наличие следующих встроенных визуальных инструментов (ВИ):

1. MT Generate Bits (Galois PN Order) – ВИ, генерирующий псевдошумовую битовую последовательность Галуа.
2. MT Generate System Parameters – ВИ формирует системные параметры для ВИ модуляции и демодуляции.
3. MT Generate Filter Coefficients – ВИ вычисляет коэффициенты фильтрации для формирующих импульсов и согласованных фильтров, применяемых ВИ цифровой модуляции и ВИ демодуляции.
4. MT Modulate ASK – ВИ принимает последовательность бит данных, выполняет ASK-модуляцию и возвращает модулированную комплексную форму сигнала.
5. MT Generate Add AWGN – ВИ генерирует аддитивный белый гауссовский шум с равномерной спектральной плотностью мощности и добавляет его к комплексной модулированной форме сигнала, ВИ формирует смесь сигнала и шума с заданным

значением $E_b/(N_0/2)$, где E_b - энергия на бит, а $\sigma^2=N_0/2$ – дисперсия белого шума, N_0 = спектральная плотность белого шума.

6. MT Upconvert Baseband (Real) – ВИ формирует повышающее частотное преобразование данных базовой полосы комплексной огибающей сигнала.
7. MT Downconvert Passband (Real) – ВИ формирует понижающее частотное преобразование комплексного базового сигнала, центрированного вокруг ненулевой центральной частоты, к центральной частоте, равной нулю.
8. MT Demodulate ASK – ВИ демодулирует ASK комплексный базовый сигнал и возвращает передискретизированную комплексную форму сигнала и демодулированный поток бит.
9. MT bit stream to Digital Graphs – ВИ формирует битовый поток для его отображения с помощью инструмента Digital Waveform Graphs в графической форме.
10. MT Format Eye Diagram (complex) – ВИ формирует глаз-диаграмму.
11. MT Calculate BER – ВИ вычисляет средний коэффициент битовых ошибок (BER) псевдошумовой последовательности бит.

Рассматриваемая методика анализа качества приёма цифрового сигнала основана на широко распространённой схеме расчёта значения сигнал/шум по глаз-диаграмме (рисунок 2) [2].

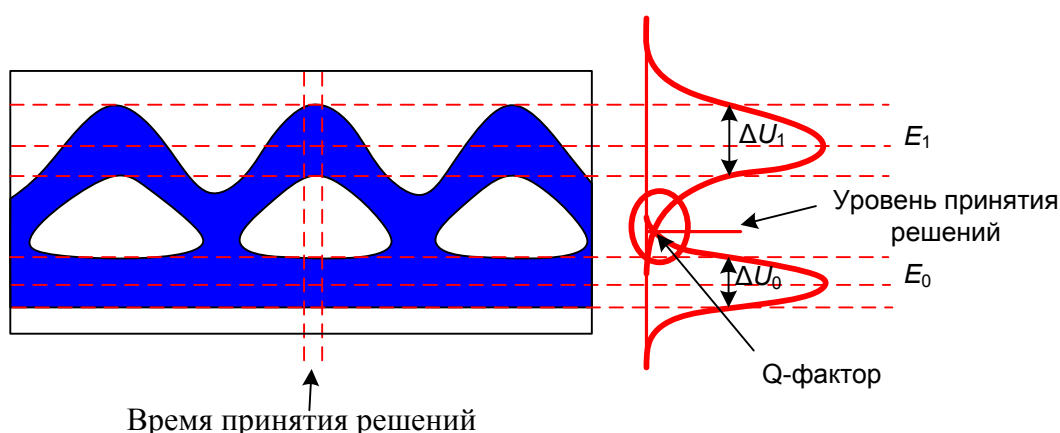


Рисунок 2 – Оценка Q-фактора [2]

Коэффициент ошибок BER для двухуровневого сигнала с ASK пропорционален площади пересечения двух функций распределения состояний цифрового сигнала «1» и «0» [3]:

$$BER = P_b = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{|U - E_0|}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{|U - E_1|}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right), \quad (1)$$

где U – порог принятия решения; E_1 и E_0 - средние уровни, соответствующие логическим состояниям единицы и нуля передаваемого цифрового сигнала; σ_1 и σ_0 - среднеквадратические значения их отклонений от средних значений.

Предполагается, что единственным источником искажений сигнала является тепловой шум. В цифровой связи используется отношение E_b/N_0 вместо отношения мощности сигнала S к мощности шума N (signal/noise - S/N), как в аналоговых системах связи. Параметр E_b/N_0 характеризует отношение сигнал-шум, приходящееся на один бит и позволяет сравнивать производительность цифровых систем на битовом уровне. Для ASK энергия бита совпадает с энергией передаваемого символа, т.к. он состоит из одного бита.

Связь между S/N и E_b/N_0 устанавливается соотношением

$$\frac{S}{N} = \frac{E_b R}{N_0 W}, \quad (3)$$

где R - скорость передачи символов; W - ширина полосы канала связи.

По глаз-диаграмме параметр BER рассчитывается путём измерения Q-фактора. Q-фактор для цифрового сигнала определяется как отношение сигнал–шум (Signal Noise Ratio) [4]:

$$Q = \text{signal to noise} = \frac{\text{mean one level} - \text{mean zero level}}{\sigma_{\text{one level}} + \sigma_{\text{zero level}}} = \frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (4)$$

На рисунке 3 поясняется определение среднеквадратического отклонения уровней сигнала $\sigma = \sigma_0 = \sigma_1$ от средних значений.

Так как вероятность того, что случайная величина, распределенная по нормальному закону, отклонится от своего математического ожидания на величину, большую, чем утроенное среднее квадратичное отклонение, практически равна нулю, то значения σ_0 и σ_1 можно определить с учётом известного правила "трёх сигм" [5] по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta U_1}{6} \text{ и } \sigma_0 = \frac{\Delta U_0}{6}. \quad (5)$$

При этом сам коэффициент ошибок BER можно определить по формуле

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right). \quad (6)$$

В (6) приближённое выражение функции $\operatorname{erfc}(x)$ справедливо только для $x > 3$. График зависимости $BER(Q)$, рассчитанной по (7) представлен на рисунке 4.

Таким образом, расчёт BER по (3) или (7) сводится к определению соответствующих отношений сигнал/шум, причём самое простое решение - это рассчитать его по глаз-диаграмме. Для сравнения моделей каналов цифровой связи, реализованных для одного и того же вида модуляции различными способами, достаточно получить для них равные значения отношения сигнал/шум на глаз-диаграмме.

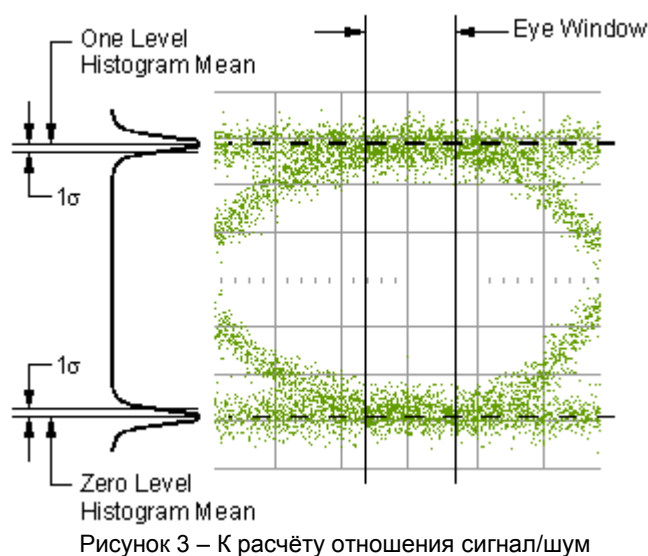


Рисунок 3 – К расчёту отношения сигнал/шум

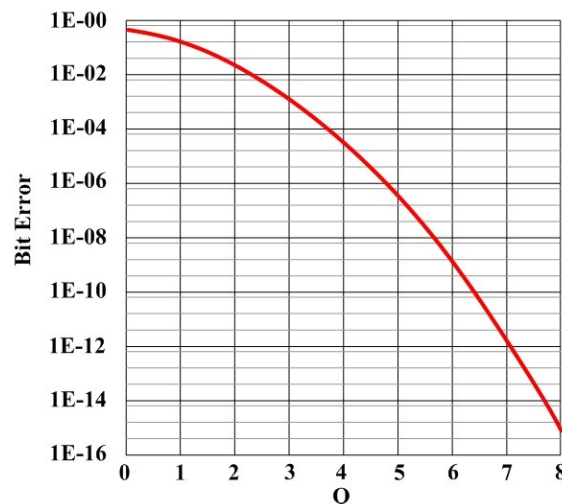


Рисунок 4 – Зависимость BER от значения Q-фактора

Алгоритм проведения сравнительного эксперимента следующий:

- 1) установка значения отношения E_b/N_0 для модели на основе МТ;
- 2) снятие показаний для ΔU_1 и ΔU_0 для модели на основе МТ по глаз-диаграмме;
- 3) расчёт σ_0 и σ_1 по (5) для модели на основе МТ по глаз-диаграмме;
- 4) расчёт Q-фактора и отношения S/N по (4) для модели на основе МТ по глаз-диаграмме;
- 5) установка необходимого значения σ для разработанной модели: $\sigma = 1/(S/N)$;
- 6) снятие показаний для ΔU_1 и ΔU_0 для разработанной модели по глаз-диаграмме;
- 7) расчёт σ_0 и σ_1 по (5) для разработанной модели по глаз-диаграмме;
- 8) расчёт Q-фактора и отношения S/N по (4) для разработанной модели по глаз-диаграмме;
- 9) сравнение рассчитанного Q-фактора для разработанной модели и модели на основе МТ;
- 10) расчёт показателя BER по (1) и (6).

Пример сравнительного расчёта для $E_b/N_0=14$ дБ:

- 1) после установки значения отношения $E_b/N_0=14$ дБ для модели на основе МТ глаз-диаграмма выглядит, как показано на рисунке 5;
- 2) с помощью курсоров сняты показания индикатора Delta Y для модели на основе МТ по глаз-диаграмме: $\Delta U = \Delta U_1 = \Delta U_0 = 0,602$;
- 3) по (5) примерно равные значения $\sigma = \sigma_0 = \sigma_1$ составили:

$$\sigma = \frac{\Delta U}{6} = \frac{0,602}{6} \approx 0,1;$$

- 4) по (4) для модели на основе МТ по глаз-диаграмме значения Q-фактора и отношения S/N составили:

$$Q = \frac{S}{N} = \frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{1-0}{0,1+0,1} = 5$$

или

$$20 \log \left(\frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \right) = 20 \log \left(\frac{1-0}{0,1+0,1} \right) = 13,9794 \text{ дБ};$$

- 5) расчёт BER по (1):

$$\begin{aligned} BER &= \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{|U - E_0|}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{|E_1 - U|}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|E_1 - U|}{\sigma \sqrt{2}} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|1-0,5|}{0,1 \sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{5}{\sqrt{2}} \right) = 2,87 \cdot 10^{-7}; \end{aligned}$$

- 6) установлено значение $\sigma = 1/Q = 1/5 = 0,2$ для разработанной модели;
7) с помощью курсоров определены значения ΔU_1 и ΔU_0 для разработанной модели по глаз-диаграмме, представленной на рисунке 6: $\Delta U = \Delta U_1 = \Delta U_0 = 1,19$;
8) по (5) рассчитаны примерно равные значения $\sigma = \sigma_0 = \sigma_1$ для разработанной модели:

$$\sigma = \frac{\Delta U}{6} = \frac{1,19}{6} \approx 0,2;$$

что соответствует установленному значению среднеквадратичного отклонения;

- 9) по (4) расчёт Q-фактора и отношения S/N для разработанной модели показал, что:

$$Q = \frac{S}{N} = \frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{1 - (-1)}{0,2 + 0,2} = 5;$$

- 10) сравнение расчёта Q-фактора для разработанной модели и модели на основе МТ показывает, что результат одинаковый: $Q=5$;
11) расчёт показателя BER по (1):

$$\begin{aligned} BER &= \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{|U - E_0|}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{|E_1 - U|}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|E_1 - U|}{\sigma \sqrt{2}} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|1-0|}{0,2 \sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{5}{\sqrt{2}} \right) = 2,87 \cdot 10^{-7}; \end{aligned}$$

по (6) для точной и приближённой формул:

$$\begin{aligned} BER &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{5}{\sqrt{2}} \right) = 2,87 \cdot 10^{-7}; \\ BER &\approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right) = \frac{1}{5\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{5^2}{2} \right) = 2,97 \cdot 10^{-7}. \end{aligned}$$

Как видно из расчёта, параметры сравниваемых моделей для $E_b/N_0=14$ дБ практически идентичны, что говорит о корректности разработанной модели канала цифровой связи с модуляцией ASK. На рисунках 7-10 представлены глаз-диаграммы моделей ещё для двух шумовых ситуаций: $E_b/N_0=12$ дБ и $E_b/N_0=10$ дБ. Показания измерителя BER для образцовой модели на основе МТ во всех

шумовых ситуациях хаотически изменяются от 0 BER до некоторого среднего, по-видимому, значения, что связано с числом ошибочно принятых бит при их общем числе $n=1000$. Т.е. даже один неверный бит даёт ошибку $BER=1/1000=0,001$. Максимальная длина последовательности нулей и единиц для разработанной модели не превышает 120 бит.

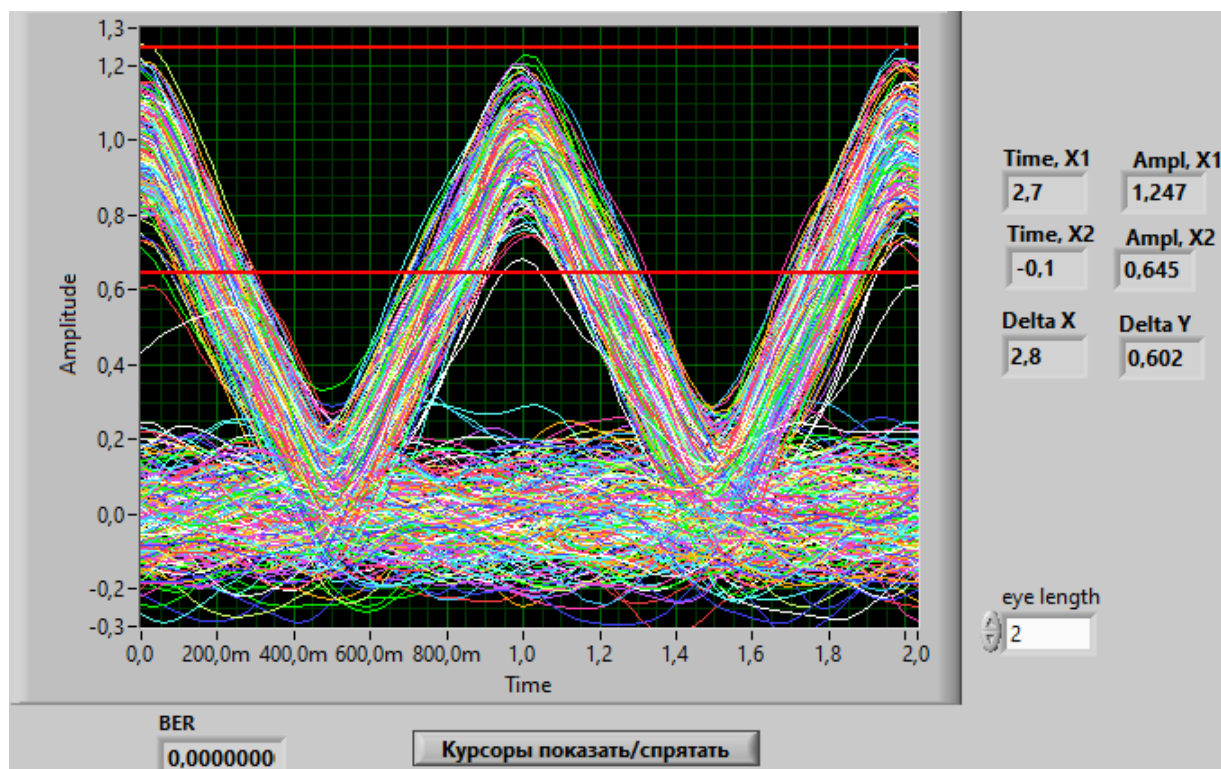


Рисунок 5 – Глаз-диаграмма для модели ASK-канала на основе МТ: $E_b/N_0=14$ дБ

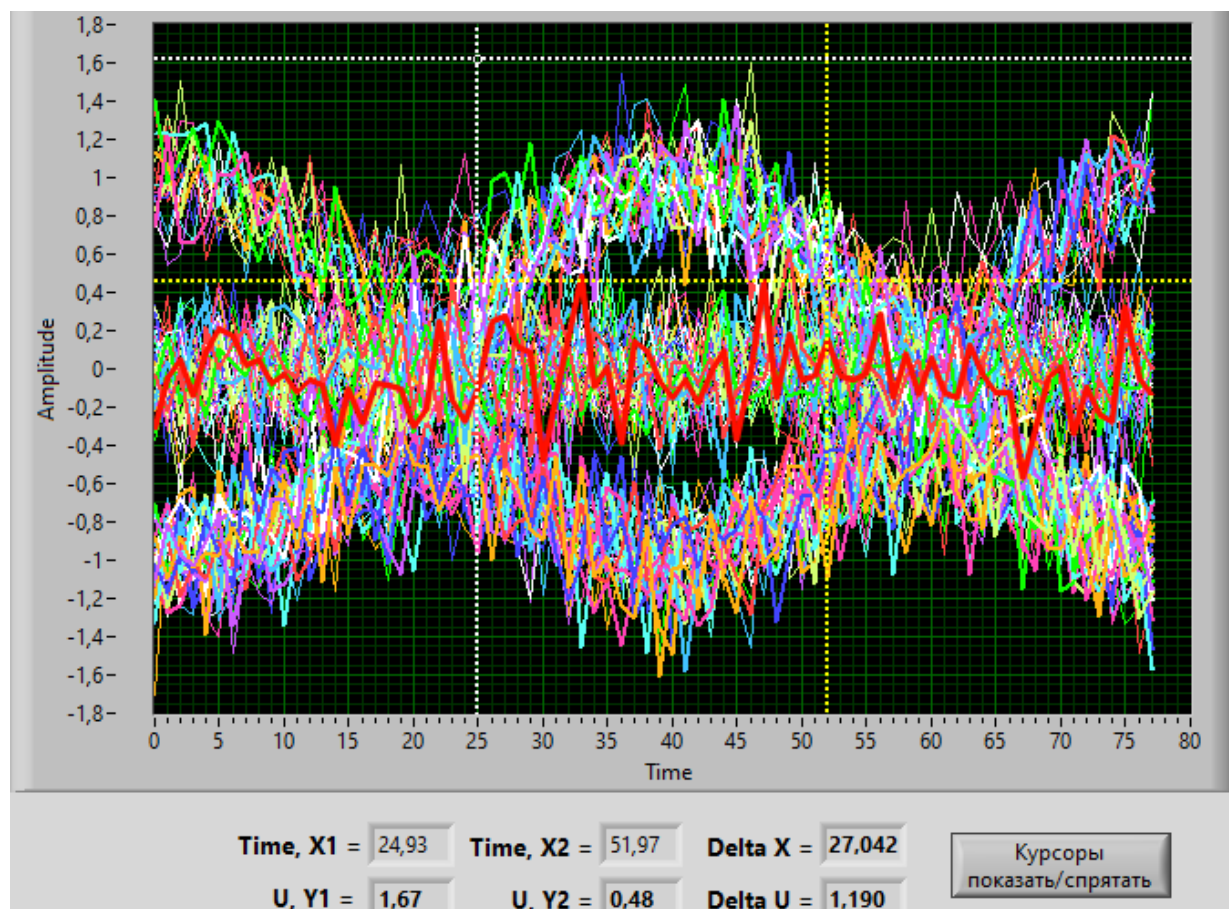


Рисунок 6 – Глаз-диаграмма для разработанной модели ASK-канала: $\sigma=0,2$

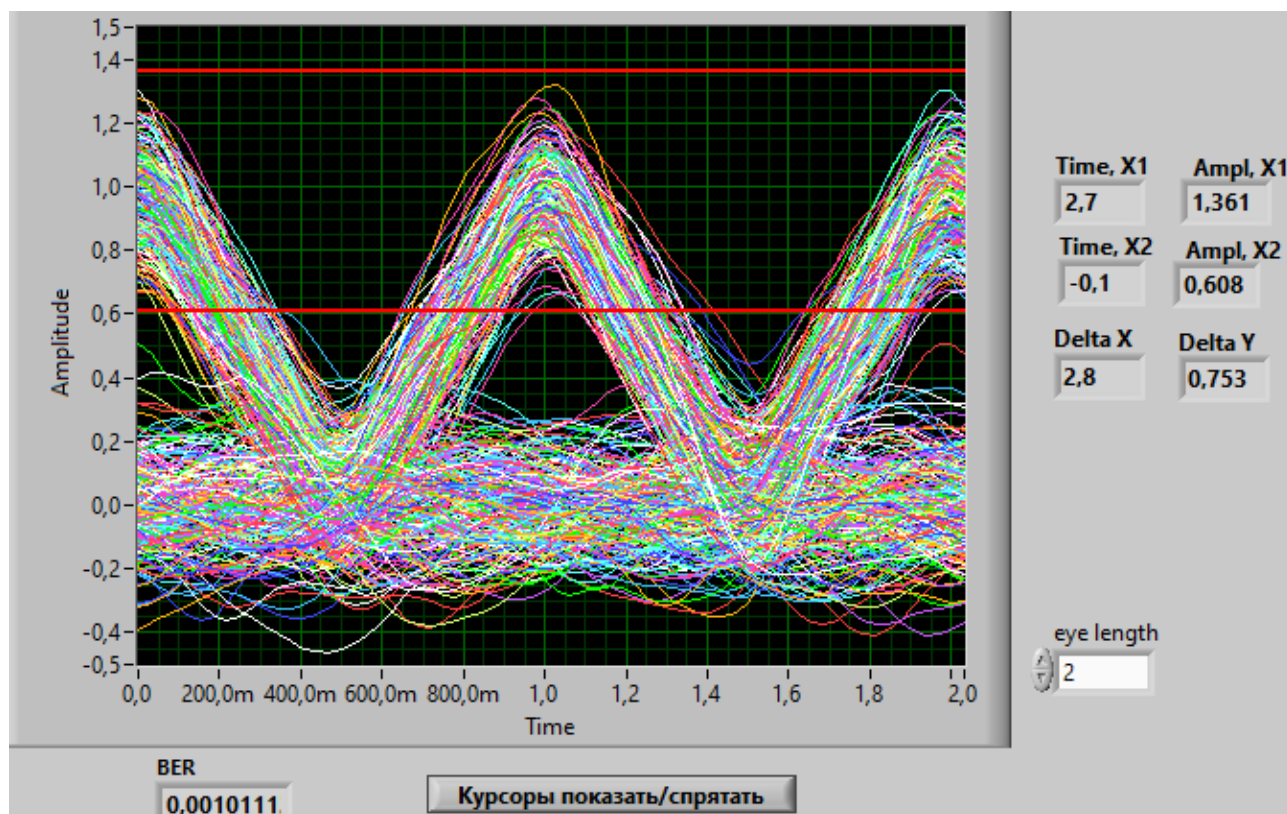


Рисунок 7 – Глаз-диаграмма для модели ASK-канала на основе МТ: $E_b/N_0=12$ дБ

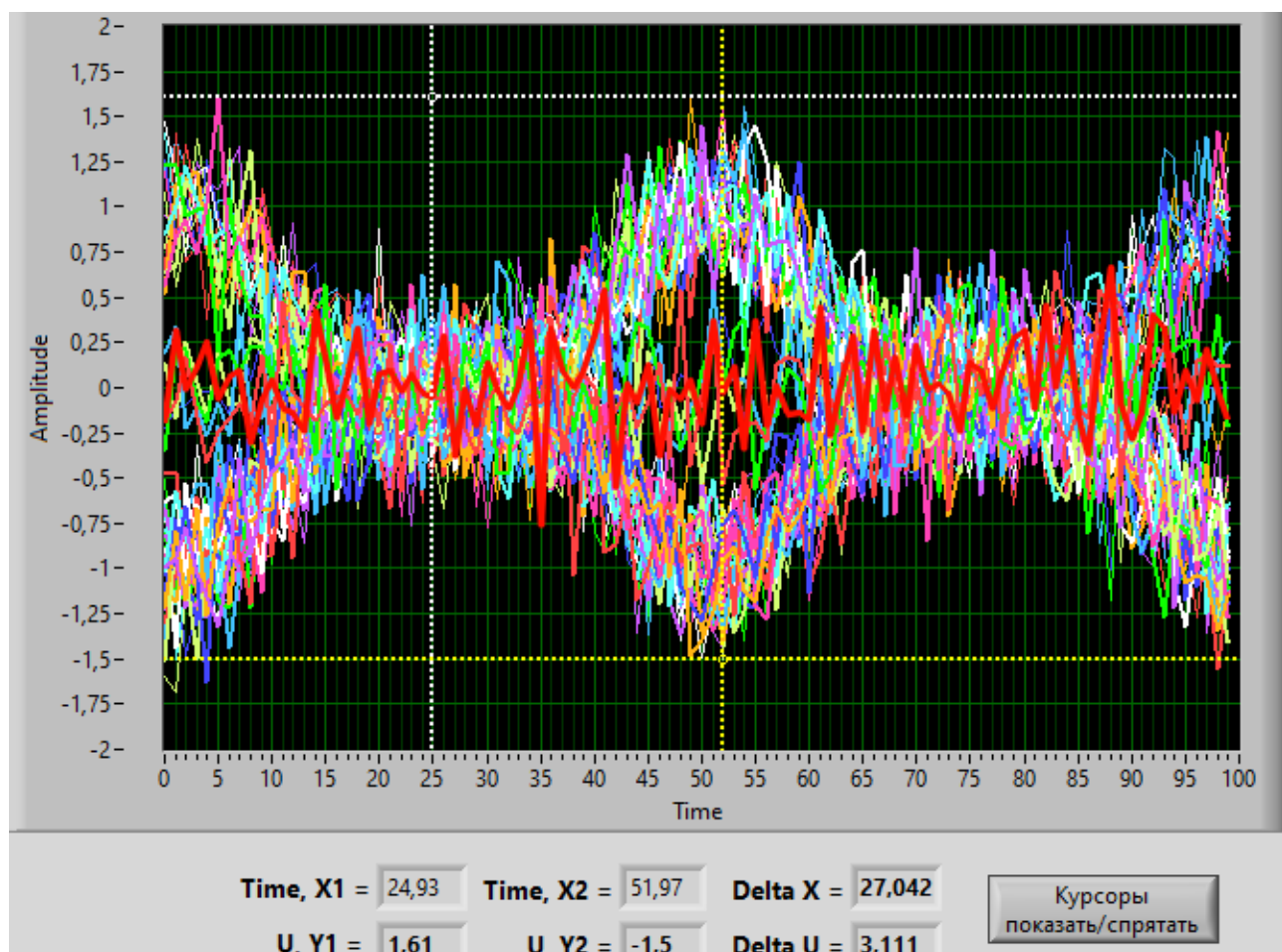


Рисунок 8 – Глаз-диаграмма для разработанной модели ASK-канала: $\sigma=0,25$

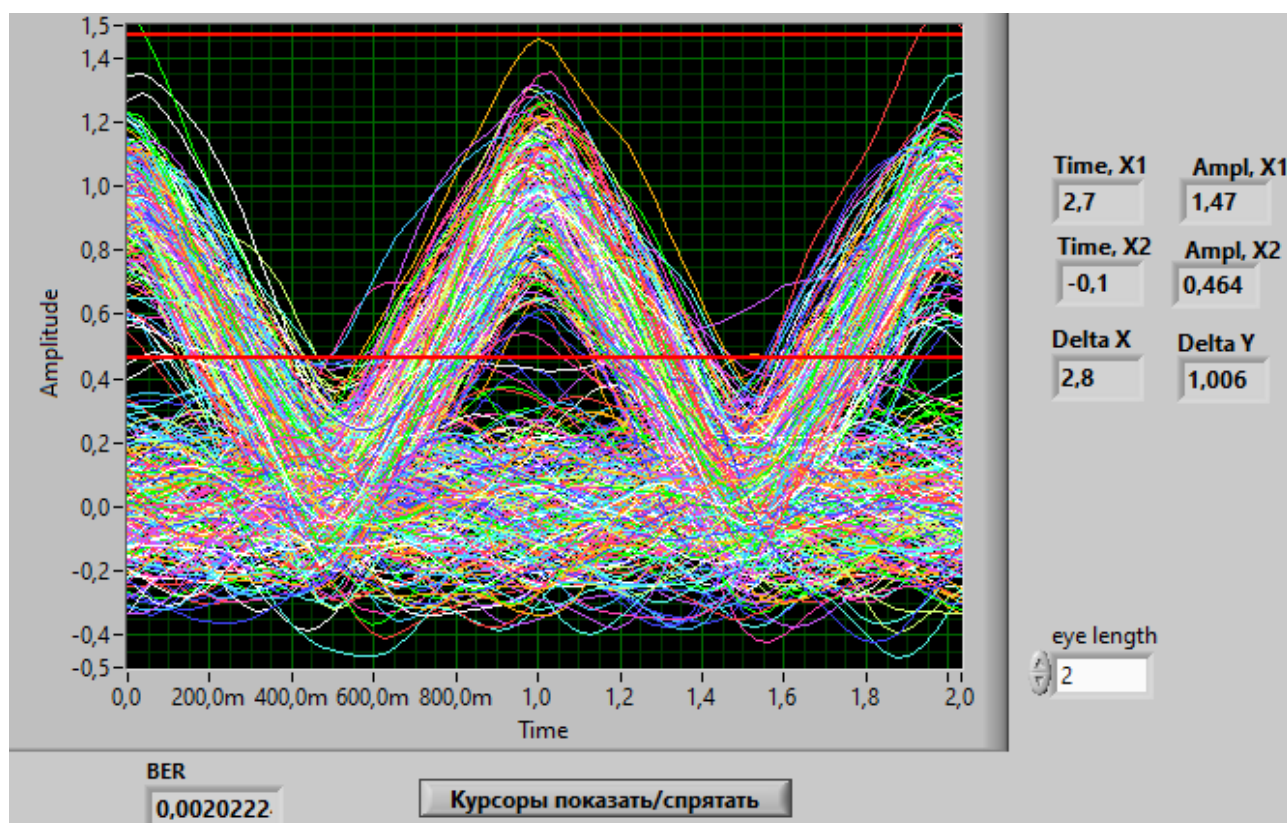


Рисунок 9 – Глаз-диаграмма для модели ASK-канала на основе MT: $E_b/N_0=10$ дБ

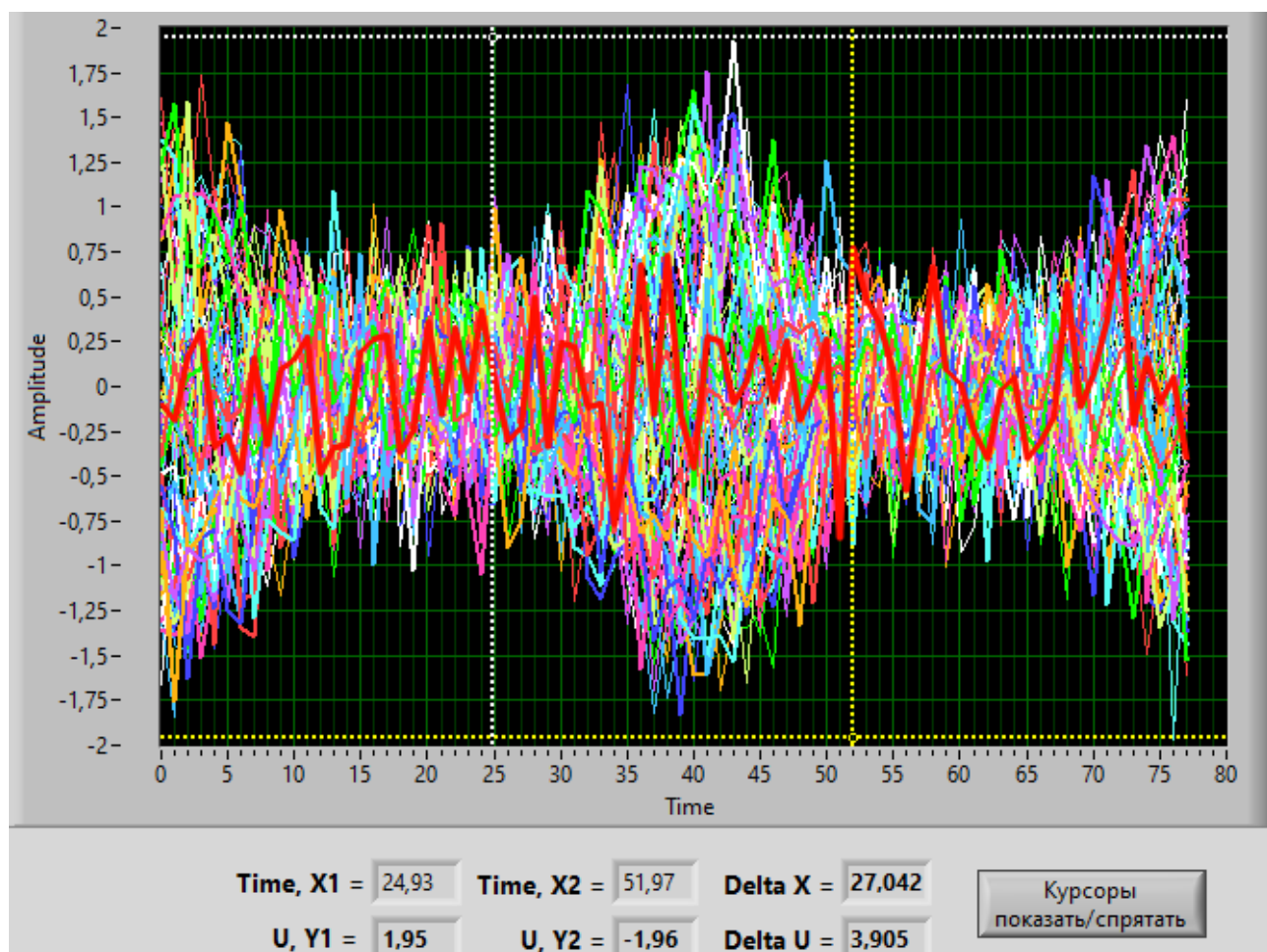


Рисунок 10 – Глаз-диаграмма для модели ASK-канала на основе MT: $\sigma=0,33$

В таблице 1 представлены результаты расчёта параметров глаз-диаграммы сравниваемых моделей для различных шумовых ситуаций.

Таблица 1 – Расчёт шумовых характеристик разработанной и образцовой моделей канала с ASK

№п/п	E_b/N_0 , дБ	$\Delta U = \Delta U_1 = \Delta U_0$		$\sigma = \sigma_1 = \sigma_0$		Q	BER
		Разработка	Образец	Разработка	Образец		
1	14	1,19	0,602	0,2	0,1	5	2,87E-7
2	12	1,555	0,753	0,26	0,126	4	3,17E-5
3	10	1,952	1,006	0,325	0,168	3	1,35E-3

Выводы

Результатом проведенного виртуального эксперимента по исследованию шумовых характеристик цифрового канала связи с модуляцией ASK является подтверждение корректности функционирования разработанной версии модели цифрового канала связи с ASK в программной среде LabVIEW. Анализ полученных глаз-диаграмм разработанной модели свидетельствует о совпадении её основных параметров с параметрами образцовой модели компании National Instruments, основанной на стандартных элементах библиотеки Modulation Toolkit

Список использованных источников:

1. Курочкин, А. Е. Разработка компьютерной модели цифрового канала связи с ASK В программной среде LabVIEW / А. Е. Курочкин, Тун Кхант // Информационные радиосистемы и радиотехнологии-2024 : материалы открытой республиканской научно-практической интернет-конференции, Минск, 21–22 ноября 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2024. – С. 257–261
2. Курочкин, А. Е. Расчёт вероятности ошибки приёма цифровых сигналов [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Е.Курочкин // Репозиторий БГУИР, 2018. – 54 с. – (Серия «Интерактивные учебные пособия»). – Режим доступа : <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/32217>
3. Wissam Mahjoob Osman, Khalid Hammed Billal, Amin Babiker Al Nabi. Bit Error Rate Performance for Optical Fiber System. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://www.hilarispublisher.com/open-access/bit-error-rate-performance-for-optical-fiber-system-2332-0796-1000250.pdf>
4. Signal-to-Noise Ratio - [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://helpfiles.keysight.com/scopes/FlexDCA-UG/Content/Topics/Eye-Mask-Mode/NRZ-Measurements/nrz_signal_to_noise.htm
5. Правило трёх сигм – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://basegroup.ru/community/glossary/3-sigma> - Дата доступа: 10.04.2025