

УДК 621.376.52:004.94

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ С BFSK В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ LABVIEW

Ней Лин У, магистрант

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

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

**Аннотация.** Представлены результаты сравнительного виртуального исследования разработанной модели цифрового канала связи с BFSK в LabVIEW и модели канала с BFSK, основанной на визуальных инструментах библиотеки Modulation Toolkit.

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

В [1] представлены результаты разработки цифровой системы передачи текстовой информации через гауссовский канал связи с модуляцией BFSK в программной среде LabVIEW. Разработка осуществлена без применения стандартных элементов библиотеки LabVIEW Modulation Toolkit (MT), таких, как: "MT Detect FSK.vi", "MT Demodulate FSK.vi", "mod\_FSK Transmitter.vi", "mod\_Compute FSK samples per symbol.vi", "MT Apply IQ Impairments.vi", "MT Calculate EbN0.vi", "MT Calculate BER.vi", "mod\_Plot FSK Eye Diagram.vi". Целью данной статьи является демонстрация корректности функционирования разработанной версии модели цифрового канала связи с BFSK путём её сравнения с образцовой моделью компании National Instruments, основанной на (MT). Так как основным критерием правильной работы любой цифровой системы передачи данных является вероятность битовой ошибки BER (Bit Error), то именно этот параметр взят за основу сравнения двух моделей. Расчёт вероятности битовой ошибки BER и отношения сигнал/шум реализован, опираясь на анализ построенных глаз-диаграмм для различных помеховых ситуаций в канале связи.

В качестве демодулятора сигнала BFSK в разработанной модели применён простой некогерентный фильтровой демодулятор BFSK сигнала, классическая схема которого представлена на рисунке 1. Принцип действия основан на пиковом детектировании последовательностей радиоимпульсов, соответствующих логическим состояниям 1 и 0 передаваемого цифрового сигнала, на своих частотах. В качестве пиковых детекторов выступают диоды VD1 и VD2, которые выделяют огибающие радиоимпульсов  $U_{\text{вых1}}$  и  $U_{\text{вых2}}$ . Затем выходное напряжение детекторов представляется в виде разности  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}$ .

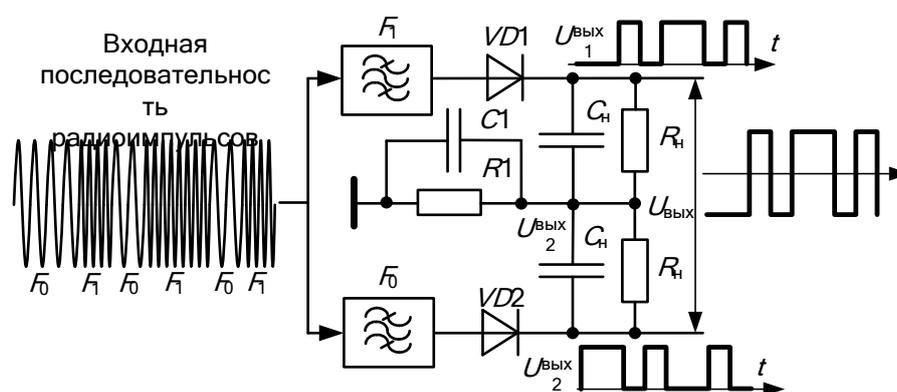
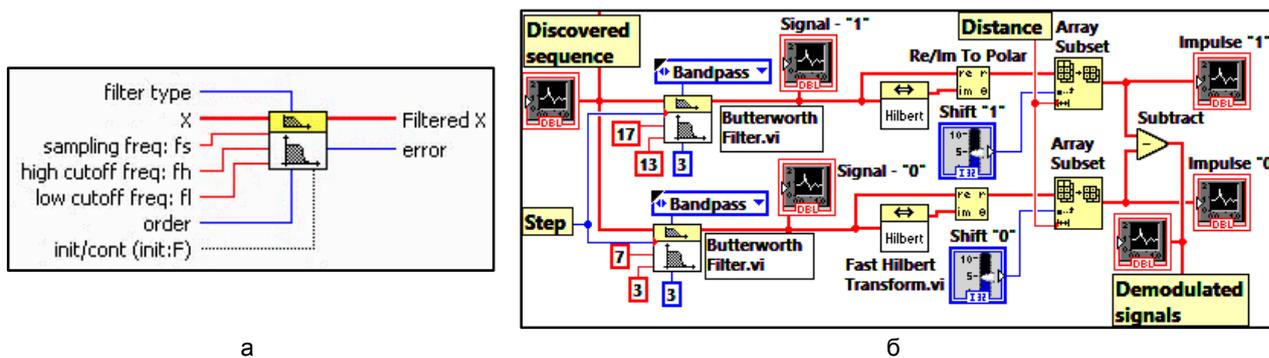


Рисунок 1 – Классический фильтровой демодулятор BFSK сигнала

В разработанной модели канала с BFSK обнаруженная на входе последовательность радиоимпульсов подается на два полосовых фильтра, основанных на ВИ «Butterworth Filter.vi» (рисунок 2). Далее выделенные в заданной полосе на частотах  $F_1$  и  $F_2$  радиоимпульсы поступают на два ВИ «Fast Hilbert Transform.vi», с помощью которых совместно с функцией «Re/Im To Polar Function» реализуется пиковое детектирование огибающих импульсов. Полученные видеоимпульсы поступают на управляемые линии задержки на основе функций «Array Subset Function» и элементов управления «Shift "1"» и «Shift "0"». Демодулированные последовательности отображаются на индикаторах «Impulse "1"» и «Impulse "0"». Окончательный результат демодуляции формируется на выходе функции «Subtract Function» и отображается на индикаторе «Demodulated signals»



а - ВИ «Butterworth Filter.vi»; б – блок-схема  
 Рисунок 2 – Разработанный демодулятор BFSK основе детекторов огибающей

Передняя панель виртуального прибора для исследования цифрового канала с модуляцией BFSK, предлагаемого компанией National Instruments в качестве примера, представлены на рисунках 3 и 4, соответственно.

Методика анализа качества приёма цифрового сигнала основана на расчёте значения Q-фактора по полученной глаз-диаграмме (рисунок 5) [2]. На рисунке 3 по вертикальной оси отложены значения частот, а не привычных амплитуд, т.к. такая форма представления глаз-диаграммы принята в образцовой модели «MT FSK Transceiver.vi», которая была найдена среди множества готовых примеров справочной системы LabVIEW.

Коэффициент ошибок BER для сигнала с BFSK в соответствии с общей схемой пропорционален площади пересечения двух функций распределения состояний цифрового сигнала, соответствующих «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  $F$  – порог принятия решения, соответствующий несущей частоте;  $F_1$  и  $F_0$  - средние уровни, соответствующие частотам логических состояний единицы и нуля передаваемого цифрового сигнала;  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  - среднеквадратические значения их отклонений от средних значений.

Параметр BER рассчитывается по глаз-диаграмме путём измерения так называемого Q-фактора. Q-фактор для цифрового сигнала определяется как отношение сигнал/шум (с/ш):

$$Q = \frac{c}{ш} = \frac{F_1 - F_0}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (2)$$

В соответствии с правилом "трёх сигм" [4] вероятность отклонения случайной величины, распределенной по нормальному закону, от своего математического ожидания на величину более  $3\sigma$ , равна нулю, где  $\sigma$  - среднеквадратическое значение отклонения. Поэтому значения  $\sigma_0$  и  $\sigma_1$  можно определить по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta U_1}{6} \text{ и } \sigma_0 = \frac{\Delta U_0}{6}. \quad (3)$$

Коэффициент ошибок BER при известном Q-факторе можно определить по формуле

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right). \quad (4)$$

Для сравнения моделей каналов цифровой связи с модуляцией BFSK, реализованных различными способами, создадим шумовые ситуации, приводящие к формированию глаз-диаграмм для сравниваемых моделей с равными значениями отношений сигнал/шум.

Рассмотрим первую шумовую ситуацию с нормированным отношением  $E_b/N_0=14$  дБ, где  $E_b$  – энергия, приходящаяся на один бит,  $N_0=2\sigma^2$  – дисперсия белого шума (как указано в справке LabVIEW для ВИ «MT Add AWGN.vi» – noise variance),  $\sigma$  – среднеквадратическое значение уровня шума.

После установки значения отношения  $E_b/N_0=14$  дБ для модели на основе MT глаз-диаграмма выглядит, как показано на рисунке 6.

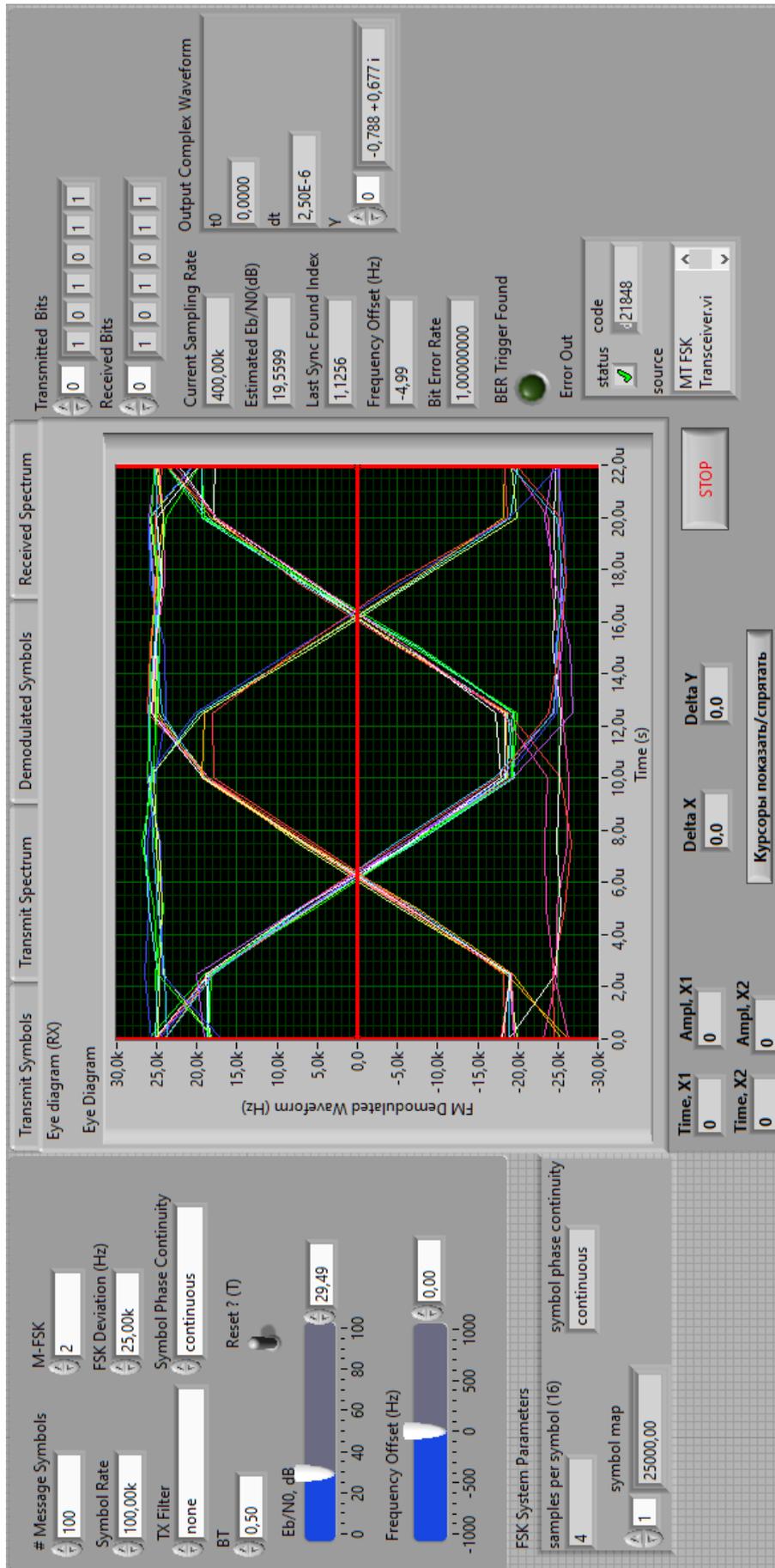


Рисунок 3 – Передняя панель прибора для образцовой модели



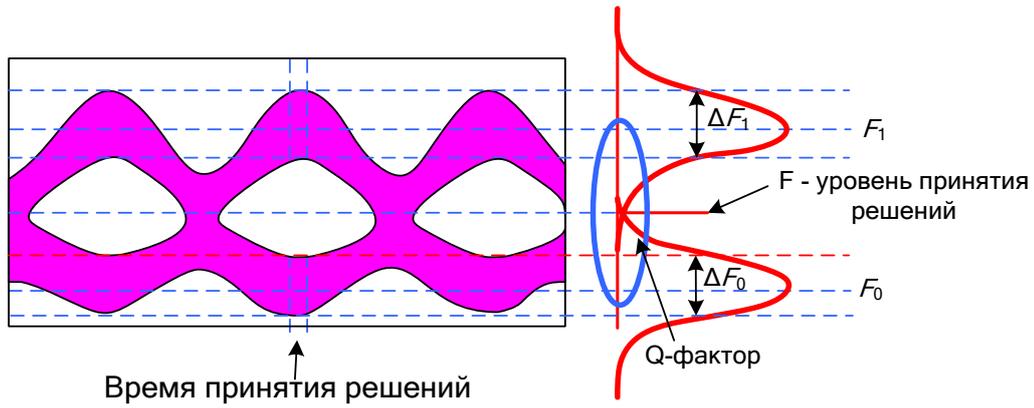


Рисунок 5 – Оценка Q-фактора

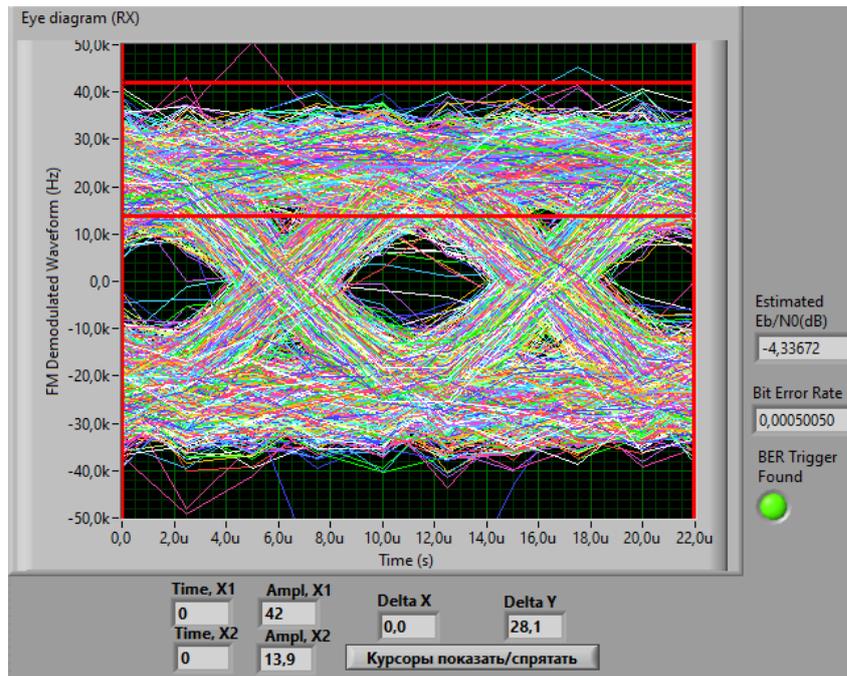


Рисунок 6 – Глаз-диаграмма образцовой модели: 14 дБ (S/N=5,338)

Ширина шумовой дорожки, как видно из рисунка 6, отображается в индикаторе “Delta Y” и составляет:  $\Delta F = \Delta F_1 = 28,1$ ; причём заметно примерное равенство  $\Delta F_0 = \Delta F_1$ .

Среднеквадратическое значения отклонения в данном случае составляет из (3):

$$\sigma = \frac{\Delta U}{6} = \frac{28,1}{6} \approx 4,683;$$

что приводит к получению значения Q-фактора и отношения S/N из (2):

$$Q = \frac{S}{N} = \frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{25 - (-25)}{28,1 + 28,1} = 5,338;$$

$$\frac{S}{N} = 20 \log(5,338) = 14,55 \text{ дБ}.$$

С помощью (4) рассчитываем BER:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{5,338}{\sqrt{2}} \right) = 4,7 \cdot 10^{-8}.$$

Текущие показания индикатора BER=0,00050050, как видно из рисунка 6 существенно отличаются от рассчитанного значения. В действительности же шумовая полоса на рисунке 6 не

учитывает имеющиеся выбросы, значительно превышающие учтённый интервал. И, если взять размер шумовой полосы, как показано на рисунке 7, то расчёты дают следующий результат:

$$\sigma = \frac{\Delta U}{6} = \frac{49,2}{6} \approx 8,2;$$

$$Q = \frac{S}{N} = \frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{25 - (-25)}{8,2 + 8,2} = 3,049;$$

$$\frac{S}{N} = 20 \log(3,049) = 9,68 \text{ дБ};$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{3,049}{\sqrt{2}}\right) = 0,001145;$$

что говорит о необходимости более тщательной оценки размера шумовой полосы на глаз-диаграмме.

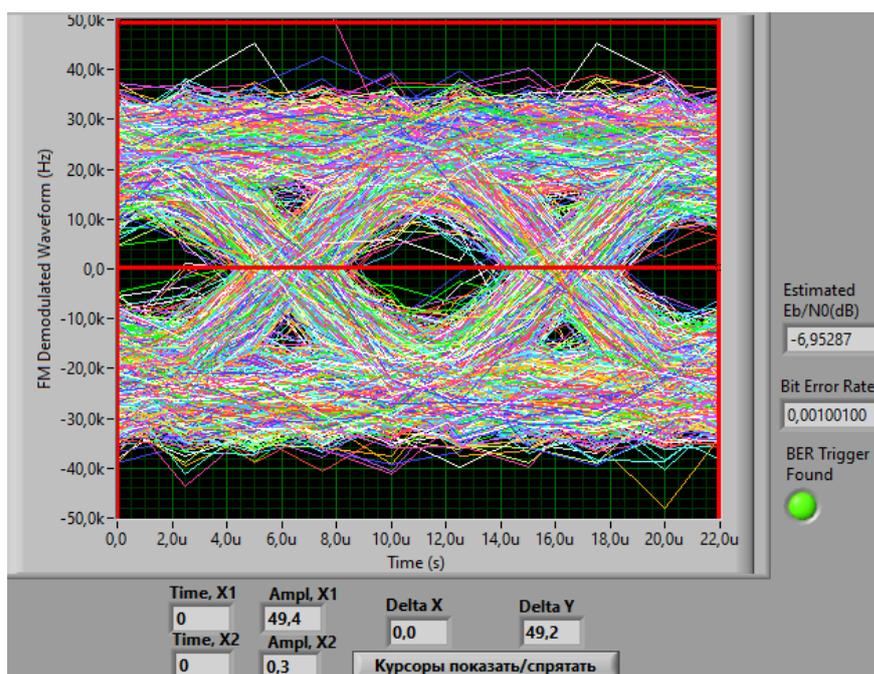


Рисунок 7 – Глаз-диаграмма образцовой модели с расширенной шумовой полосой

Для разработанной модели и значения  $\sigma=0,333$ ; что должно соответствовать значению  $S/N=3$ , глаз-диаграмма представлена на рисунке 8. По вертикальной оси на данной диаграмме отложены значения амплитуд, а не частот, так как сигналы снимаются с выходов пиковых детекторов.

С помощью курсоров по глаз-диаграмме, представленной на рисунке 8, определены значения  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_0$  для разработанной модели:  $\Delta U = \Delta U_1 = \Delta U_0 = 1,118$ .

По (3) рассчитаны примерно равные значения  $\sigma = \sigma_0 = \sigma_1$  для разработанной модели:

$$\sigma = \frac{\Delta U}{6} = \frac{1,118}{6} \approx 0,186;$$

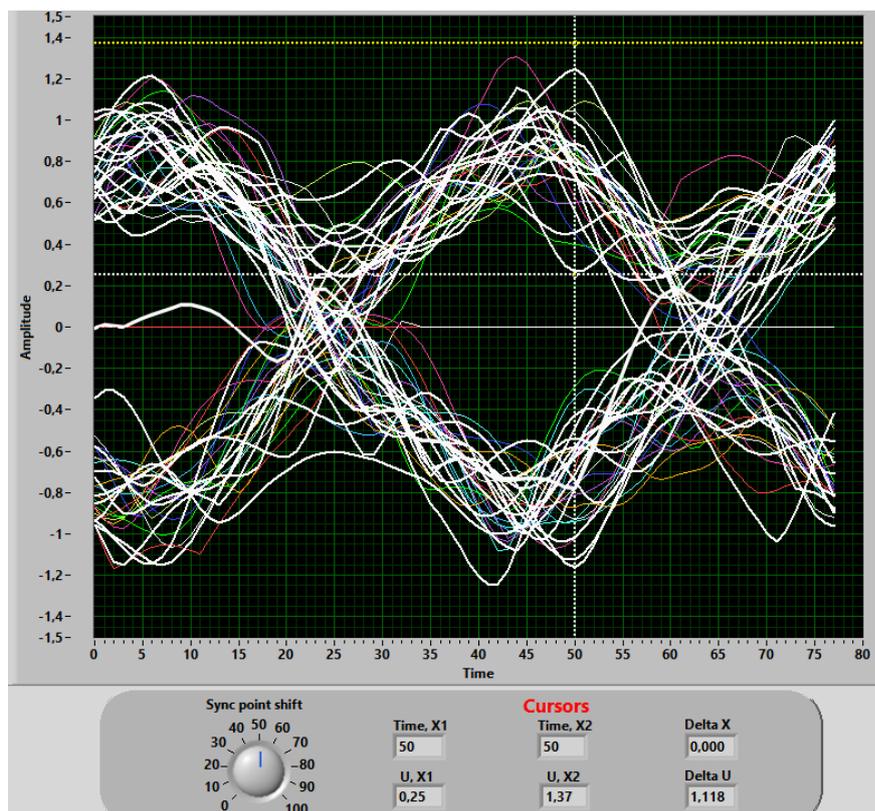
что тоже не соответствует установленному в программе модели значению среднеквадратичного отклонения.

По (2) расчёт Q-фактора и отношения  $S/N$  показывает, что:

$$Q = \frac{S}{N} = \frac{E_1 - E_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{1 - (-1)}{0,186 + 0,186} = 5,367.$$

Расчёт показателя BER по (4) также показывает заниженный результат:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{5,367}{\sqrt{2}}\right) \approx 4 \cdot 10^{-8}.$$

Рисунок 8 – Глаз-диаграмма разработанной модели:  $S/N=5,367$   $\sigma=0,33$ 

Объяснение отмеченным отклонениям может быть только одно: при анализе глаз-диаграмм не учитываются все возможные случайные показания в пределах правила “трёх сигм”. Для получения более-менее достоверных результатов необходимы два фактора: увеличить время наблюдения и увеличить многократно число передаваемых бит цифровой последовательности. В образцовой модели число бит составляло 10000, в разработанной же модели длина передаваемой последовательности ограничена числом 120. Показания измерителя BER даже для образцовой модели во всех шумовых ситуациях с течением времени хаотически изменяются от 0 BER до некоторого среднего, по-видимому, значения, что связано с числом ошибочно принятых бит при их общем числе  $n=10000$ . Т.е. даже один неверный бит даёт ошибку  $BER=1/10000=0,0001$ . При максимальной длине последовательности нулей и единиц для разработанной модели при одном неверном бите  $BER=1/120=0,00833$ .

Таким образом, как видно из расчётов, параметры сравниваемых моделей практически идентичны, что говорит о корректности разработанной модели канала цифровой связи с модуляцией BFSK.

### Выводы

Результатом проведенного виртуального эксперимента по исследованию шумовых характеристик цифрового канала связи с модуляцией BFSK является подтверждение корректности функционирования разработанной версии модели цифрового канала связи с BFSK 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 BFSK в программной среде LabVIEW / А. Е. Курочкин, Ней Лин У // 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. 251–256.
2. Бурдин, А.В. Глаз-диаграмма. Методика измерения [Текст] / А.В. Бурдин г. Самара. – ПГУТИ. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://lsits.psuti.ru/arc/msits/msits\\_9.pdf](http://lsits.psuti.ru/arc/msits/msits_9.pdf)
3. Wissam Mahjoob Osman, Khalid Hamed 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. Правило трёх сигм – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://basegroup.ru/community/glossary/3-sigma> - Дата доступа: 10.04.2025

**UDC 621.376.52:004.94**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF A MODEL OF A DIGITAL COMMUNICATION CHANNEL  
WITH BFSK IN THE LABVIEW SOFTWARE ENVIRONMENT**

Nay Lynn OO, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Minsk, Republic of Belarus

Kurochkin A.E. – Ph.D. tech. sciences,  
Associate Professor, Department of IRT

**Annotation.** The article presents the results of a comparative virtual study of the developed model of a digital communication channel with BFSK in LabVIEW and a channel model with BFSK based on the visual tools of the Modulation Toolkit library.

**Key words.** Noise immunity, error probability, AWGN, Gaussian channel, signal-to-noise ratio, eye diagram.