

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

А.Ю. СИЗЯКОВА

**МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ДЕМОДУЛЯЦИИ  
СИГНАЛОВ ФМ2  
Лабораторная работа №10**

Методическое пособие  
по курсу «Основы построения радиосистем» для студентов,  
обучающихся по направлению «Радиотехника»

УДК

621.396

С–349

*Утверждено учебным управлением МЭИ*

*Подготовлено на кафедре радиотехнических систем*

Рецензент канд. техн. наук проф. А.К. Нарышкин.

**С 349 Сизякова А.Ю.**

Методы формирования и демодуляции сигналов ФМ2: Методическое пособие. — М.: Издательство МЭИ, 2006. — 20 с.

Изложены вопросы теории и имитационного компьютерного моделирования приемопередатчика сигнала ФМ2. Рассматривается один из способов формирования сигнала ФМ2 и изучаются вопросы демодуляции этого сигнала в присутствии помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума. Анализируется влияние статической остаточной ошибки в системе фазовой автоподстройки на качество демодуляции.

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере, рассчитана на одно четырехчасовое занятие. Приведены контрольные вопросы и порядок выполнения работы.

Для студентов, обучающихся по направлению "Радиотехника".

---

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                    | 2  |
| 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФМ СИГНАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ.....  | 2  |
| 1.1. Обобщенная схема системы связи, использующей ФМ сигналы..... | 2  |
| 1.2. Схема модулятора сигналов ФМ2.....                           | 4  |
| 1.3. Модель канала с шумом .....                                  | 5  |
| 1.4. Модель демодулятора сигнала ФМ2.....                         | 5  |
| 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ .....                            | 7  |
| 2.1. Модель системы связи в SYSTEM VIEW .....                     | 7  |
| 2.2. Модель демодулятора.....                                     | 8  |
| 2.3. Понятие глаз-диаграммы и ее характеристики .....             | 10 |
| 3. ДОМАШНЯЯ ПОДГОТОВКА .....                                      | 11 |
| 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....                                      | 12 |
| 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.....                                        | 12 |
| 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ .....                              | 13 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                                    | 14 |

## ВВЕДЕНИЕ

В лабораторной работе рассматриваются методы цифровой модуляции, которые используются в современных системах связи.

Цель работы — изучить способы формирования и демодуляции двоичного сигнала с фазовой манипуляцией (ФМ2), познакомиться с глаз-диаграммами, изучить влияние шума и расфазирования генераторов приемника и передатчика на характеристики сигнала и на ошибки демодуляции.

### 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФМ СИГНАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

#### 1.1. ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ФМ СИГНАЛЫ

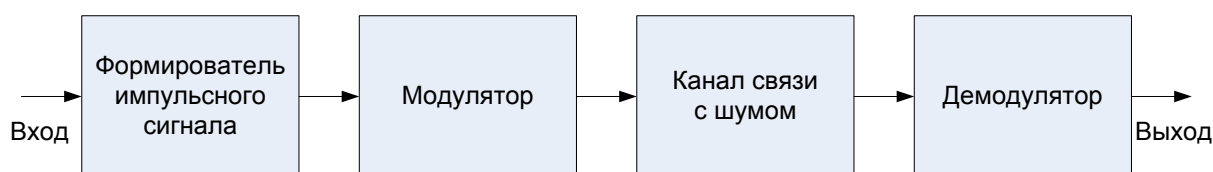
В настоящее время широко применяется передача цифровой информации по радиоканалу (например, числовые данные, аналоговые сообщения — звук, изображения, телеметрия — в цифровой форме, команды управления). Это объясняется высокой помехо-

устойчивостью цифровой передачи, возможностью маскировки (защиты) информации и т.д. К объективным недостаткам цифровых систем относится неизбежное расширение полосы частот, занимаемой радиосигналом.

Одним из важных вопросов при решении перечисленных задач является выбор методов модуляции. В лабораторной работе рассматривается сигнал с модуляцией ФМ2, получивший широкое распространение в системах передачи (рис. 1).

Будем считать, что на вход системы связи подается цифровое сообщение в формате логических двоичных нуля и единицы. Для передачи цифровое сообщение необходимо преобразовать в импульсные электрические сигналы длительностью  $\tau_{\text{дв}}$ , что выполняется в "Формирователе импульсного сигнала". Следующий этап преобразования – модуляция. Этот этап необходим для придания сигналу свойств, совместимых с характеристиками канала передачи энергии (радиоканала). При модуляции импульсы прямоугольной формы модулируют несущее колебание (или просто несущую) по амплитуде, частоте или фазе.

В рассматриваемом случае несущая модулируется по фазе, а амплитуда и частота несущего колебания остаются неизменными.



**Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы связи с ФМ**

Сигнал на выходе модулятора называют манипулированным, поскольку модулирующее колебание имеет вид прямоугольных импульсов с двумя уровнями (условимся считать эти уровни единичными  $+1$  и  $-1$ ), и в результате модуляции начальная фаза радиоимпульса приобретает одно из двух значений:  $+\Delta\theta$  или  $-\Delta\theta$ .

В лабораторной работе рассматриваются двоичные сигналы с фазовой манипуляцией. Общепринятое сокращение для этих сигналов такое: ФМ2 или BPSK – Binary Phase Shift Keying. При двоичной манипуляции ФМ2 на выходе модулятора формируется один из двух сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  длительностью  $\tau_{\text{дв}}$ . Как правило, сигналы  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  являются противоположными, при этом разность начальных фаз этих сигналов равна  $2\Delta\theta = \pi$ . Мгновенные значения сигналов можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= S_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right); \\ s_2(t) &= S_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Далее манипулированный сигнал поступает в канал связи, где сигнал ослабляется при распространении по радиоканалу, а также искажается шумами и помехами.

Искаженный и ослабленный сигнал поступает на вход приемного устройства. В усилительно-преобразовательной части приемника (на рис. 1 не показана) сигнал частично восстанавливается, частично освобождается от искажений и поступает на демодулятор. Задача демодулятора – сформировать на выходе импульсный электрический сигнал, совпадающий с сигналом на входе модулятора. Из-за наличия искажений процесс демодуляции сопровождается ошибками. Для уменьшения этих ошибок используют наилучшие (их называют оптимальными) схемы приемника.

Далее импульсный сигнал с выхода демодулятора преобразуется в вид, удобный получателю, не обязательно такой же, какой был на входе формирователя. Например, этот сигнал может быть записан на цифровой носитель информации для дальнейшей обработки в отложенном времени.

## 1.2. СХЕМА МОДУЛЯТОРА СИГНАЛОВ ФМ2

Обозначим последовательность прямоугольных импульсов на входе модулятора (выше условились считать эти уровни единичными  $+1$  и  $-1$ ) как  $D(t)$ . Эта последовательность прямоугольных импульсов фиксированной длительности  $\tau_{\text{дв}}$  со случайным чередованием уровней  $+1$  и  $-1$ . Реализация функции  $D(t)$  приведена на рис. 2.

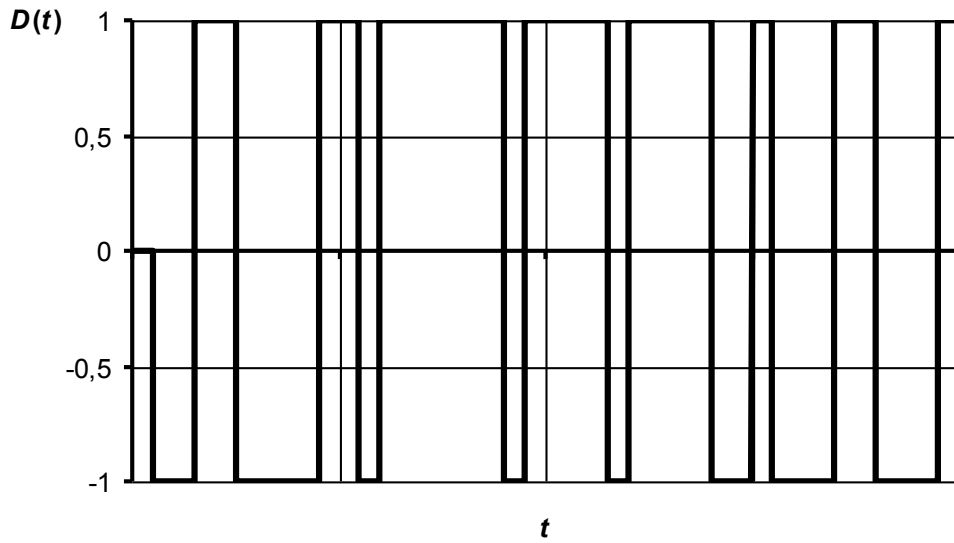


Рис. 2. Реализация функции  $D(t)$

С учетом новых обозначений запишем сигнал  $s_i(t)$  на выходе модулятора в следующем виде:

$$\begin{aligned} s_i(t) &= S_0 \cos\left(\omega_0 t + D(t) \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= S_0 \left[ \cos(\omega_0 t) \cos\left(D(t) \frac{\pi}{2}\right) - \sin(\omega_0 t) \sin\left(D(t) \frac{\pi}{2}\right) \right] = \\ &= -S_0 D(t) \sin(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (2)$$

Отметим, что сигнал  $s_i(t)$  рассматривается на интервале  $(i - 1) \tau_{\text{дв}} \leq t < i \tau_{\text{дв}}$ , где  $i$  – номер периода или такта. Из (2) видно, что если  $D(t)$  на рассматриваемом такте имеет значение  $+1$ , то на выходе модулятора формируется сигнал

$$s_i(t) = -S_0 \sin(\omega_0 t) = S_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Иначе, если  $D(t)$  на рассматриваемом такте имеет значение  $-1$ , то на выходе модулятора формируется сигнал

$$s_i(t) = S_0 \sin(\omega_0 t) = S_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Эти сигналы имеют одинаковые амплитуды, частоты и являются противоположными, как и было отмечено в п. 1.1. Так, мы получили математическую модель модулятора сигнала ФМ2. Графическая модель модулятора ФМ2 приведена на рис. 3.

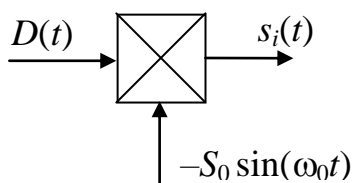


Рис. 3. Модель модулятора ФМ2

### 1.3. МОДЕЛЬ КАНАЛА С ШУМОМ

При распространении в свободном пространстве сигнал искажается. В нашей модели будет учтен только принципиально неустранимый внутренний белый шум приемника  $n(t)$ , который является аддитивной помехой. Затухание сигнала не учитывается. Поэтому выражение для сигнала на входе демодулятора имеет вид

$$y(t) = s_i(t) + n(t). \quad (3)$$

Модель канала приведена на рис. 4.

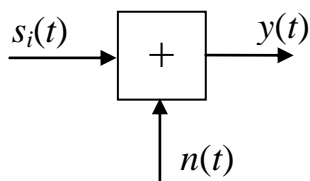


Рис. 4. Модель канала

### 1.4. МОДЕЛЬ ДЕМОДУЛЯТОРА СИГНАЛА ФМ2

Основной задачей, возлагаемой на демодулятор, является восстановление импульсной последовательности на входе модулятора, которую мы обозначили  $D(t)$ . Ясно, что из-за ошибок в канале сигнал на входе демодулятора  $y(t)$  отличается от сигнала на выходе модулятора  $s(t)$ , поэтому на выходе демодулятора будет сформирована последовательность  $\hat{D}(t)$ , отличающаяся от исходной  $D(t)$ . Качество работы демодулятора определяют средним числом ошибочно демодулированных сигналов  $s_i(t)$  при известном числе демодулированных сигналов или вероятностью ошибки  $P_{\text{ош}}$  (в русскоязычной литературе). В англоязычных источниках вводится понятие BER – Bit Error Rate, что является другим обозначением той же вероятности ошибок.

Интуитивно понятно, что чем меньше уровень шума, тем величина  $P_{\text{ош}}$  должна быть меньше. Сформулируем условия решения задачи распознавания двоичных сигналов, которую решает демодулятор сигналов ФМ2:

- 1) считается, что все параметры сигнала  $s(t)$  точно известны в точке приема; неизвестно только, какой же из двух сигналов  $s_1(t)$  или  $s_2(t)$  на рассматриваемом такте подлежит обработке;

- 2) считается, что в приемнике точно известны моменты начала и окончания каждого сигнала;
- 3) вероятности появления сигналов  $s_1(t)$  или  $s_2(t)$  на входе приемника одинаковы (эти вероятности называются априорными – доопытными, заранее известными);
- 4) в качестве помехи рассматривается только аддитивный белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью  $N_0$ ;
- 5) приемник считается неискажающим;
- 6) реализуется посимвольный прием, то есть решение, принятое демодулятором на предыдущем такте, не влияет на его решение на следующем такте.

Потребуем от демодулятора (или различителя двоичных сигналов), чтобы алгоритм его работы минимизировал среднюю вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$ . Введем понятие корреляционного интеграла

$$\xi_l = \int_{(i-1)\tau_{\text{дв}}}^{i\tau_{\text{дв}}} y(t)s_l(t)dt. \quad (4)$$

В этом случае получаем алгоритм работы демодулятора, оптимальный по критерию минимума средней вероятности ошибки:

- 1) рассчитывается корреляционный интеграл

$$\xi_1 = \int_{(i-1)\tau_{\text{дв}}}^{i\tau_{\text{дв}}} y(t)s_1(t)dt; \quad (5)$$

- 2) случайное число  $\xi_1$  сравнивается с нулевым пороговым уровнем:  
если  $\xi_1 > 0$ , то принимается решение о передаче сигнала  $s_1(t)$ ,  
иначе — принимается решение о передаче сигнала  $s_2(t)$ .

Для создания модели демодулятора необходимо реализовать приведенные формулы и условия в виде структурной схемы. Из соотношения (5) видно, что сигнал с выхода канала  $y(t)$  умножается на опорное колебание, в качестве которого выступает сигнал  $s_1(t)$ . Результат перемножения должен быть проинтегрирован на интервале, равном длительности двоичного сигнала. В результате интегрирования произведения за длительность одного такта  $\tau_{\text{дв}}$  получается случайное число  $\xi_1$ . При работе с последовательностью сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  при их случайном чередовании на выходе интегратора формируется последовательность случайных значений корреляционного интеграла. Далее определяется знак каждого из этих случайных значений. Обратите внимание, что на выходе демодулятора на каждом такте работы формируется один отсчет, равный + 1 или – 1. Структурная схема демодулятора изображена на рис. 5.

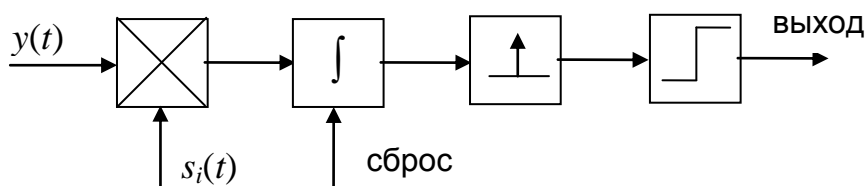


Рис. 5. Модель демодулятора

Итак, структурная схема модели системы связи представлена на рис. 3, 4, 5. Эта структура будет реализована в пакете графического программирования System View.

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

### 2.1. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СВЯЗИ В SYSTEM VIEW

При выполнении лабораторной работы изучается способ формирования и демодуляции сигналов ФМ2. Также рассматривается влияние аддитивной помехи – внутреннего шума приемника – и ошибки слежения за фазой несущей на характеристики сигналов и качество демодуляции. В работе анализируются глаз-диаграммы и количество ошибок при демодуляции.

Функциональная схема изучаемой системы изображена на рис. 6.

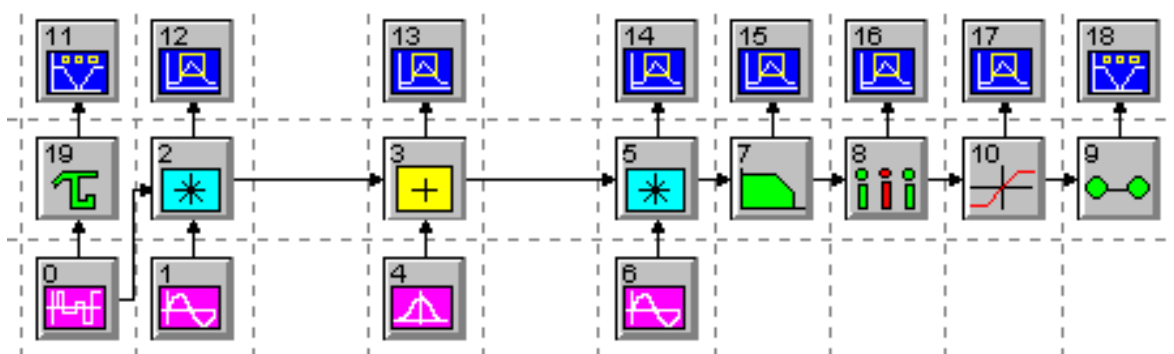


Рис. 6. Структурная схема модели системы связи с сигналами ФМ2, реализованная в пакете System View

В схеме на рис. 6 использованы следующие обозначения:

- Источник ПСП – псевдослучайной импульсной последовательности  $D(t)$  (значения +1 или -1) – элемент 0;
- Модулятор сигнала ФМ2 реализован в соответствии с моделью на рис. 3 элементами 0, 1, 2;
- Модель канала (рис. 4) реализована элементами 3, 4;
- Модель демодулятора (рис. 5) реализована элементами 5, 6, 7, 8, 9, 10.

Для наблюдения процессов в различных точках модели в схему введены анализаторы (элементы 11 – 18). На схеме представлены анализаторы двух видов: элементы 11 и 18 (отображают процессы в окне схем System View и в окне "Анализа") и элементы 12 – 17. Графики анализаторов 12 – 17 можно наблюдать только в окне "Анализа".

Параметры моделирования схемы рекомендуется установить следующими: частота моделирования 1000 Гц, длина реализации 4,095 с (число точек моделирования 4096).

Параметры элементов для схемы на рис. 6 приведены в таблице 1.



Параметры элементов

| № элемента на рис. 6   | Название библиотеки | Название группы  | Название элемента | Параметры                                                                    |
|------------------------|---------------------|------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 0                      | Source              | Noise / PN       | PN seq            | Rate = 10 Hz<br>No Levels = 2<br>Offset = 0 V                                |
| 1                      | Source              | Periodic         | Sinusoid          | Frequency = 100 Hz<br>Phase = 0                                              |
| 2                      | Multiplier          | —                | Multiplier        | —                                                                            |
| 3                      | Adder               | —                | Adder             | —                                                                            |
| 4                      | Source              | Noise / PN       | Gauss Noise       | Std Deviation = 0,5V<br>Mean = 0                                             |
| 5                      | Multiplier          | —                | Multiplier        | —                                                                            |
| 6                      | Source              | Periodic         | Sinusoid          | Frequency = 100 Hz<br>Phase = 0                                              |
| 7                      | Operator            | Filters /Systems | Linear Sys        | Design Filters = Analog Butterworth<br>No of Poles = 3<br>Low Cutoff = 10 Hz |
| 8                      | Operator            | Sample /Hold     | Decimator         | Decimate By 100                                                              |
| 9                      | Operator            | Sample /Hold     | Hold              | Hold Value = Last Sample<br>Gain = 1                                         |
| 10                     | Function            | Non Linear       | Limiter           | Input Max = $\pm 0$ V<br>Output Max = $\pm 1$ V                              |
| 19                     | Operator            | Delays           | Delay             | Delay Type:<br>Non Interpolating<br>Delay = 0,1 sec                          |
| 11, 18                 | Sink                | Graphic Display  | System View       | —                                                                            |
| 12, 13, 14, 15, 16, 17 | Sink                | Analysis /Export | Analysis          | —                                                                            |

## 2.2. МОДЕЛЬ ДЕМОДУЛЯТОРА

В соответствии с алгоритмом различения двух сигналов (стр. 9) необходимо перемножить смесь сигнала и шума с опорным колебанием, проинтегрировать результат за длительность сигнала  $T_c$ . Накопленное значение (один отсчет на  $T_c$ ) сравнивается с порогом и принимается решение о номере переданного сигнала.

В отличие от оптимального алгоритма в схеме (рис. 6) демодулятора (различителя) используется фильтр нижних частот (ФНЧ). Обозначим центральную частоту спектра входного колебания  $\omega_c$ , а частоту колебания опорного генератора  $\omega_0$ . Полоса пропускания ФНЧ выбирается из условий:

- 1) значительного ослабления колебания на частоте  $\omega_c + \omega_0$ ;
- 2) удвоенная полоса пропускания ФНЧ должна быть не меньше ширины спектра сигнала, в которой сосредоточено более 90 % мощности входного сигнала.

Далее производится выборка отсчетов напряжения на выходе ФНЧ с частотой  $(1/T_c)$ . Значения этих отсчетов сравниваются с нулевым порогом, и принимается решение о переданном символе: + 1 или – 1.

Рассмотрим подробнее НЧ колебание, из которого производятся выборки отсчетов. Если рассматривается демодуляция сигнала ФМ2 в смеси со слабым шумом и параметры ФНЧ выбраны правильно, то колебание **на входе** ФНЧ (рис. 6) представляет собой сумму искаженной шумом ПСП с амплитудой 0,5 В, частотой  $(1/T_c)$  и колебания с частотой  $(\omega_c + \omega_0)$  и амплитудой 0,5 В:

$$s_i(t) \cdot g_0(t) = -0,5 D(t) \cos(\varphi) + 0,5 D(t) \cos(2\omega_0 t + \varphi), \quad (6)$$

где  $s_i(t)$  – манипулированный сигнал ФМ2, записанный в виде (2),  $S_0 = 1\text{В}$ ;

$g_0(t)$  – опорное колебание демодулятора,  $g_0(t) = \sin(\omega_0 t + \varphi)$ ;

$\varphi$  – разность фаз принятого и опорного напряжений.

На интервале наблюдения частоты  $\omega_c$  и  $\omega_0$  считаются одинаковыми.

В силу линейности ФНЧ прохождение обеих составляющих будем рассматривать независимо. Считаем, что колебание с частотой  $2\omega_0$  сильно ослабляется в ФНЧ и на выход практически не проходит. Поэтому реакция фильтра в основном обусловлена входным колебанием в виде (ПСП + шум). Реакция фильтра на рассматриваемое воздействие представляет собой сглаженную кривую (рис. 7).

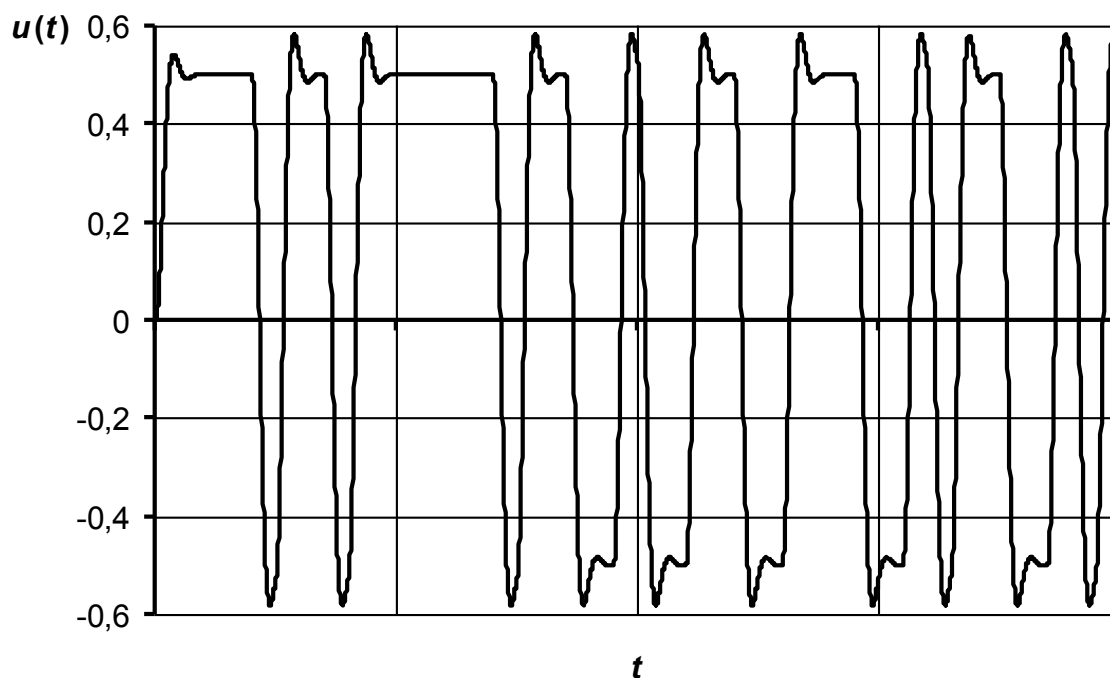


Рис. 7. Реакция ФНЧ на воздействие типа  $D(t)$

Предстоит определить, в какой момент времени и с какой частотой (или периодом) надо брать отсчет напряжения на выходе ФНЧ.

Относительно периодичности имеется ясность: с частотой смены сигналов, то есть с частотой ( $1/T_c$ ) или периодом ( $T_c$ ). В какой же момент на периоде?

Обратимся к оптимальному алгоритму. В соответствии с (5) надо брать отсчет в моменты окончания сигнала, т.е. в тактовые моменты времени  $t_k = kT_c$ . Нетрудно заметить, что при использовании реального ФНЧ требуется дополнительная задержка по отношению к окончанию такта, приблизительно равная производной ФЧХ ФНЧ в пределах полосы пропускания фильтра. Следовательно, отсчеты берутся в моменты времени, при-

ближенно рассчитываемые по формуле  $t_k = kT_c + \left. \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\Omega_{0,7}}$ ,

где  $\Omega_{0,7}$  – полоса пропускания ФНЧ по уровню  $-3$  дБ.

Для фильтра НЧ модели, изучаемой в лабораторной работе, задержка равна 30 мс.

### 2.3. ПОНЯТИЕ ГЛАЗ-ДИАГРАММЫ И ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Удобным графическим методом оценки качества цифрового сигнала на выходе демодулятора является глаз-диаграмма (рис. 8). Она представляет собой результат наложения всех возможных откликов ФНЧ на ПСП в течение промежутка времени, равного тактовому интервалу  $T_c$ . Вопросы построения глаз-диаграммы подробно изложены в [4].

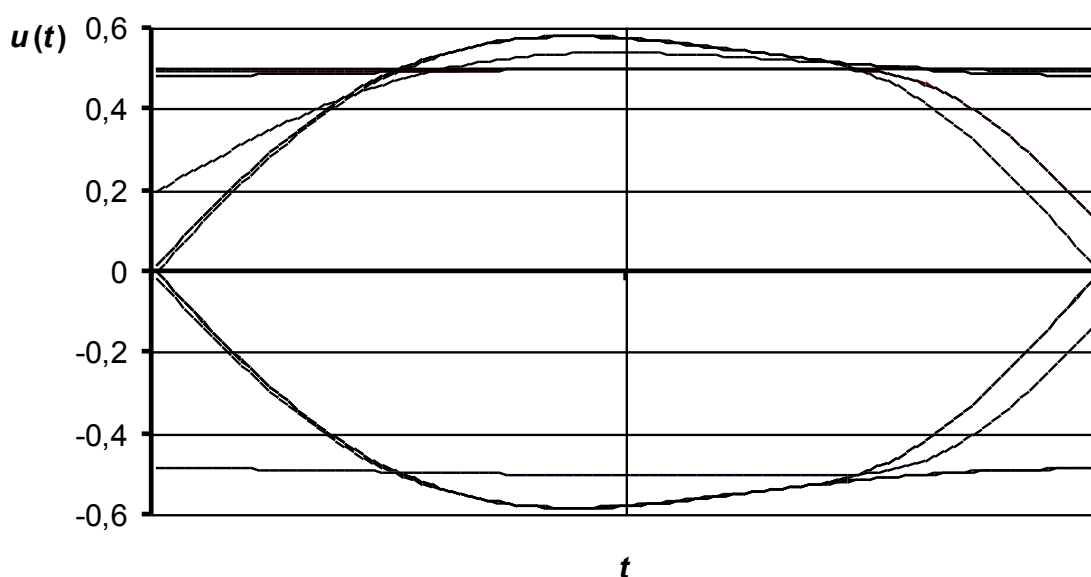


Рис. 8. Глаз-диаграмма

На рис. 8 хорошо видна область (раскрытие) глаз-диаграммы, в пределах которой должно производиться различение двухуровневого полярного сигнала. Горизонтальные линии (на рис. 8 соответствуют уровням  $-0,5$  и  $+0,5$ ) соответствуют амплитудам импульсов в отсутствие шума и искажений сигнала в ФНЧ, а вертикальная линия в центре окна — идеальному моменту взятия отсчета, по которому выносится решение.

Для безошибочного различения цифровых отсчетов необходимо, чтобы между положительным и отрицательным "веками" глаза оставалась определенная свободная область, в пределах которой и происходит распознавание сигнала.

Наличие помех приводит к сокращению этой области по сравнению с идеальным случаем. Минимальное расстояние между нулевым уровнем и краями глаз-диаграммы, наиболее близкими к нулевому уровню, служит мерой запаса помехоустойчивости. Запас уменьшается как из-за искажений формы импульса, так и вследствие неточного выбора момента взятия отсчета. Первая причина приводит к уменьшению раскрытия глаз-диаграммы, а вторая — к перемещению точки принятия решения вдоль оси времени и в итоге приводит также к уменьшению значения отсчета. Искажения, возникающие по этим двум причинам, принято подразделять на амплитудные и временные, соответствующие смещению точки принятия решения по вертикали и горизонтали.

Величина уменьшения раскрытия глаз-диаграммы по вертикали определяется межсимвольными искажениями, эхосигналами, изменениями амплитуды импульсов, погрешностями порогов решающих устройств. В результате воздействий появляется вертикальная составляющая искажений глаз-диаграммы  $\Delta h$ .

Временные искажения глаз-диаграммы  $\Delta T$ , включающие несоответствие моментов принятия решения их статическим значениям и джиттер, учитываются обычно в смещении границ глаза по горизонтали.

Указанный на глаз-диаграмме разброс фронтов представляет наложенные друг на друга максимальные искажения фронтов сигнала, которые определяются целым рядом факторов. Первый фактор — это межсимвольная интерференция. Затухание уровня сигнала и всевозможные искажения в среде передачи делают различными время нарастания и спада фронтов передаваемого сигнала. Кроме того, фронты искажаются из-за неравномерности частотной характеристики канала. Все это приводит к тому, что форма импульса на приемном конце заметно отличается от идеальной и, кроме того, зависит от последовательности передаваемых символов.

### 3. ДОМАШНЯЯ ПОДГОТОВКА

1. Прочитайте теоретический раздел настоящего описания и лекции. При необходимости обратитесь к дополнительной литературе.
2. Определите критическое значение расфазирования  $\Delta\varphi$ , при котором на выходе демодулятора всегда будут наблюдаться ошибки различения сигналов (шум отсутствует).
3. Зарисуйте переходный процесс на выходе ФНЧ в составе демодулятора. Считайте, что в качестве ФНЧ используется  $RC$ -цепь. Обоснуйте выбор постоянной времени ФНЧ.
4. Зарисуйте глаз-диаграммы на выходе ФНЧ с параметрами, выбранными в п. 3 домашней подготовки, в отсутствие шума и при  $\Delta\varphi = 0$ .
5. Зарисуйте глаз-диаграммы на выходе ФНЧ с параметрами, выбранными в п. 3 домашней подготовки, при наличии аддитивного шума и  $\Delta\varphi = 0$ .
6. Зарисуйте глаз-диаграммы на выходе ФНЧ с параметрами, выбранными в п. 3 домашней подготовки, при наличии расфазирования  $\Delta\varphi = \text{var}$  и в отсутствие шума.

## 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель работы?
2. Зарисуйте упрощенные схемы модулятора–демодулятора для сигнала ФМ2. Укажите параметры всех блоков схемы. Рассчитайте энергию сигнала на выходе модулятора.
3. Поясните схему модулятора-демодулятора для сигнала ФМ2. При каком выборе параметров блоков схемы (рис. 6) можно моделировать схему обработки сигнала ФМ2?
4. Что такое глаз-диаграмма? Как она строится?
5. Как определить величину раскрытия глаза?
6. Какую информацию можно извлечь из анализа глаз-диаграммы?
7. Поясните, как изменяется глаз-диаграмма для сигнала на выходе фильтра демодулятора при изменении  $\Delta f$  от  $0^\circ$  до наибольшего значения. Каково это значение?
8. Как рассчитать вероятность ошибки при демодуляции сигнала ФМ2? От каких величин зависит вероятность ошибки при демодуляции сигнала ФМ2?
9. Как рассчитать энергию сигнала ФМ2, входящую в формулу для расчета вероятности ошибки?
10. Какова скорость передачи данных в системе, модель которой изображена на рис. 6?
11. Можно ли по глаз-диаграмме оценить вероятность ошибки? Если можно, то как?

## 5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

5.1. Самостоятельно соберите схему модели системы связи с сигналами ФМ2 (рис. 6). Параметры элементов задайте в соответствии с табл. 1. Установите параметры моделирования: частота моделирования 1000 Гц, длина реализации 4,095 с (число точек моделирования 4096).

5.2. Проведите моделирование (используйте клавиши Run или F5). В окне анализа постройте реализацию сигнала на выходе ФНЧ.

5.3. Установите СКО (среднеквадратическое отклонение) шума, равное 0. Проведите моделирование системы. В окне анализа постройте глаз-диаграмму для сигнала на выходе ФНЧ.

Для построения глаз-диаграммы в окне анализа выберите инструмент «КАЛЬКУЛЯТОР», вкладку «Style», пункт «Time Slice», установите начальное время 30 мс, длительность глаза 100 мс.

Определите величину раскрытия глаза.

5.4. Постройте величину раскрытия глаза от СКО шума. Величину раскрытия рекомендуется оценивать по раскрытию глаза в середине окна.

*Методика построения зависимости величины раскрытия глаза от СКО шума:*

1) Задайтесь наименьшим значением СКО шума (Std Deviation = 0).

Проведите моделирование. По графику глаз-диаграммы определите ее раскрытие. Проверьте, что он равен 1В. Это значение соответствует наибольшему раскрытию глаза. Нанесите на график эту точку.

2) Определите значение СКО шума, при котором глаз закрывается.

Для этого задайте большее значение СКО шума (например, Std Deviation = 1В).

Проведите моделирование. По графику глаз-диаграммы оцените ее раскрытия. Если при этом значении СКО шума глаз еще открыт, то повторите опыт и найдите такое значение параметра источника шума **Std Deviation**, при котором раскрытие близко к нулевому значению.

Нанесите на график эту точку.

3) Для построения кривой задайте еще 3 – 4 промежуточные значения СКО шума, проведите моделирование и определите величину раскрытия глаза.

Нанесите полученные точки на график.

5.5. Постройте зависимость величины раскрытия глаза от разности фаз  $\Delta\phi$  генераторов передатчика и приемника. Для задания значения расфазирования  $\Delta\phi$  целесообразно изменять значение начальной фазы опорного колебания в приемнике (элемент 6 на рис. 6).

Для построения этой зависимости рекомендуется изменять разность фаз на постоянную величину (например, на  $15^\circ$ ) от нулевого значения до максимального, рассчитанного в домашней подготовке.

5.6. Постройте диаграммы обмена (для одного, выбранного Вами, значения раскрытия глаза (например,  $h_T = 0,5B$ ) ищется СКО шума и разность фаз  $\Delta\phi$ ; строится график, параметром которого является величина раскрытия глаза).

*Методика построения диаграммы обмена:*

1) Задайтесь значением раскрытия глаза  $h_T$ , запишите его в протокол наблюдений. Рекомендуется выбирать значение, равное половине от наибольшего.

2) Установите  $\Delta\phi = 0$ . Последовательно изменяя СКО шума, добейтесь получения реализации глаза с раскрытием  $h_T$ . Зафиксируйте СКО шума в протоколе наблюдений.

3) Установите СКО шума, равное нулю. Изменением  $\Delta\phi$  получите реализацию глаза с раскрытием  $h_T$ . Зафиксируйте  $\Delta\phi_{\text{макс}}$  в протоколе наблюдений.

4) Получите еще 3 – 4 точки диаграммы обмена для ненулевых значений СКО шума и  $\Delta\phi$ .

5) Постройте график, в качестве параметра укажите значение раскрытия глаза  $h_T$ .

6) Оцените проигрыш в отношении сигнал/шум, к которому приводит ошибка по фазе  $\Delta\phi_{\text{макс}}$ .

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО РАБОТЕ

1. Титульный лист.

2. Название и цель работы.

3. Домашняя подготовка.

4. Структурная схема системы связи, использующей модем ФМ2 с указанием параметров схемы и сигнала.

5. Протокол наблюдений с таблицами и графиками:

1) глаз-диаграммы (только рисунки) в отсутствие шума и расфазирования, **выводы**;

2) глаз-диаграммы (только рисунки) при наличии только шума и при  $\Delta\phi = 0$ , **выводы**;

- 3) глаз-диаграммы (только рисунки) при наличии только расфазирования, **выводы**;
- 4) зависимости (таблицы и графики) величины раскрытия глаза от СКО шума, **выводы**;
- 5) зависимости (таблицы и графики) величины раскрытия глаза от  $\Delta\varphi$ , **выводы**;
- 6) диаграммы обмена (таблицы и графики), **выводы**.

**Каждый график и рисунок необходимо подписать, обозначить оси и указать параметры, при которых сняты зависимости.**

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В.** Системы и сети передачи информации. – М.: Радио и связь, 2001. — 336 с.
2. **Сизякова А.Ю.** Сигналы цифровых телекоммуникационных систем. – М.: Издательство МЭИ, 1999. — 24 с.
3. **Сизякова А.Ю.** Моделирование устройств обработки сигналов в программе System View. – М.: Издательство МЭИ, 2005. — 28 с.
4. **Когновицкий Л.В., Ржига Л.О.** Межсимвольная и межканальная интерференция в СЦПИ. – М.: Издательство МЭИ, 1997. — 34 с.