



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)

---

Кафедра «Радиотехника и электросвязь»

# ТЕОРИЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

*Методические указания  
к лабораторным работам*

МОСКВА – 2008

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ (МИИТ)**

---

**ТЕОРИЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ,  
ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ**

Под редакцией  
профессора А.Ф. Фомина

Рекомендовано редакционно - издательским советом  
университета в качестве методических указаний

Для студентов специальности «Автоматика,  
телеинженерика и связь на железнодорожном транспорте»

Москва - 2008

УДК. 621.391 656.2  
Ф76

Фомин А Ф., Волков А. А., Горелов Г. В., Журавлёва Л. М.,  
Кузнецов С. Н. Теория передачи сигналов  
железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.  
Методические указания к лабораторным работам. // Под  
ред. А.Ф.Фомина. - М.: МИИТ, 2008. - 44с.

Работа посвящена вопросам исследования систем  
передачи дискретных сообщений при воздействии  
гауссовских и негауссовских помех при оптимальном  
приеме.

© Московский государственный университет  
путей сообщения (МИИТ), 2008

## **СОДЕРЖАНИЕ**

стр.

Введение	4
1. Цель работы	5
2. Теоретическая часть	5
3. Описание программы	25
4. Домашнее задание	29
5. Лабораторное задание	30
6. Приложения	31
7. Инструкция	33
8. Содержание отчетов	42
9. Контрольные вопросы	42
10 Список литературы	43

## **ВВЕДЕНИЕ**

Комплекс лабораторных работ представляет собой единый набор подпрограмм, моделирующих работу системы передачи дискретных сообщений при различных методах манипуляций и помехах. Подпрограммы моделируют следующие узлы (объекты) системы: 1) источник дискретных сообщений, генерирующий три типа двоичных последовательностей детерминированного вида и одну псевдослучайного вида; 2) модулятор, производящий амплитудную, частотную, фазовую и относительно фазовую манипуляции гармонического колебания; 3) линию связи с аддитивными помехами в виде гауссовских или негауссовских (с обобщенно-гауссовским распределением) помех типа белого шума; 4) демодулятор, реализующий оптимальный или асимптотически оптимальный корреляционный приемник полностью известных сигналов, 5) исследование помехоустойчивости системы передачи дискретных сигналов при различных видах манипуляции и помех.

Дополнительно к перечисленным исследованиям комплекс позволяет проводить:

1. Исследования статистических характеристик гауссовских и негауссовских случайных процессов.

2. Исследования прохождения случайных процессов через линейные и нелинейные цепи.

Информация о динамике работы исследуемого объекта выдается на экран дисплея или печатающее устройство в виде осциллограмм, гистограмм и других результатов расчета. Лабораторные работы позволяют исследовать и сравнить по помехоустойчивости различные виды модуляции, методы приема в зависимости от вида помех и соотношения сигнал-помеха.

Программа написана на языке Turbo Pascal 7.0 для ЭВМ IBM. Выполнение лабораторных работ не требует

специальных знаний языка программирования.

Указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу "Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте". Минимальный объем лабораторных работ составляет 30 часов.

**1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ** - закрепление лекционного материала и экспериментальные исследования систем передачи и оптимального приема дискретных сообщений, а также принципов реализации

цифровых методов формирования и обработки сигналов путем машинного моделирования на ЭВМ типа «IBM 80386DX».

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ [1, 2]**

Системы передачи дискретных сообщений являются одной из важнейших составных частей автоматизированных систем сбора и обработки информации, управления и массового обслуживания. Структурные схемы исследуемых систем приема и передачи дискретных сообщений с АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ сигналами приведены на рис. 1(а, б, в, г) соответственно.

В последнее время в связи с бурным развитием цифровой элементной базы в системах связи начинают широко использоваться цифровые методы формирования и обработки сигналов в условиях различных помех.

Данный комплекс лабораторных работ иллюстрирует возможности цифровых методов формирования и обработки сигналов.

### **2. 1. Алгоритм формирования дискретных АМ, ЧМ и ФМ сигналов**

Для передачи дискретных сообщений по телефонным каналам связи наиболее широко используются гармонические сигналы - переносчики с

АМ, ЧМ, ФМ. Алгоритм формирования перечисленных сигналов переносчиков на ЭВМ представляет собой вычислительный процесс по соответствующим формулам для дискретных моментов времени

$$t_h = (h-1)\Gamma_0; h=1,2,\dots,H,$$

где  $T_0$  - период опроса (дискретизации);

$H = \frac{\tau_c}{T_0}$  - количество обрабатываемых отсчетов на

длительности элементарного символа;  $\tau_c$ -длительность элементарного символа. Для ускорения работы алгоритма вычисление синусов и косинусов производится по рекуррентным формулам:

$$\sin \omega t = c * \sin \omega t_{h-1} + s * \cos \omega t_{h-1},$$

$$\cos \omega t_h = c * \cos \omega t_{h-1} + s * \sin \omega t_{h-1},$$

где  $\omega$  - частота сигнала;  $c = \cos \omega T_0$ ,  $s = \sin \omega T_0$  - коэффициенты.

Эллюры сигналов с АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ приведены на рис. 2(а, б, в, г) соответственно. При АМ, ЧМ и ФМ каждой значащей цифре выбранного кода с основанием а назначается значение своего информационного параметра (амплитуды, частоты, начальной фазы).

При ОФМ каждой цифре выбранного кода с основанием а назначается значение сдвига фазы относительно начальной фазы предыдущего символа.

## 2. 2. Алгоритм формирования дискретных ОФМ сигналов

Особенностью передающего устройства при ОФМ (по сравнению с ФМ) является наличие дополнительного устройства, которое определяет границы посылок на  $180^\circ$  в соответствии с принятым правилом. Наиболее широко

используется режим работы, при котором передатчик работает также, как и при классической ФМ, т. е. переброс фазы посылки происходит только при смене одного символа на другой (например, 1 на 0 или 0 на 1). Для этого достаточно перекодировать исходную последовательность двоичных символов  $\lambda_k$  по правилу (с помощью относительного кодера)

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{k-1} \oplus \lambda_k,$$

где  $\varepsilon_k, \varepsilon_{k-1}$  - перекодированные сигналы;  $\oplus$  - символ сложения по модулю два;  $\lambda_k$  - исходный дискретный сигнал. Устройство перекодирования в этом случае состоит из двоичного сумматора и элемента памяти, выполняющего запоминание перекодированного символа на время, равное длительности этого символа.

Естественно, что после приема переданной последовательности необходимо выполнить обратное перекодирование, чтобы вернуться к исходной цифровой последовательности. Формирование сигнала ОФМ на ЭВМ представляет собой вычислительный процесс по соответствующей формуле для дискретных моментов  $t_n$ .

## 2. 3. Спектры смодулированных и модулированных импульсных последовательностей

При передаче периодической последовательности импульсов с периодом повторения  $T = q \tau_c$  (где  $q$  - скважность импульсов,  $\tau_c$  - длительность прямоугольного импульса) определяется на основании ряда Фурье с амплитудами гармоник  $f_k$ .

$$C_k = 2U/q [\sin(\pi f_k q)/\pi f_k q], C_0 = U_0/q \quad (1)$$

Спектр видеосигналов прямоугольной формы показан на рис. 3. а Спектр видеопоследовательности

вписывается в спектр одиночного импульса, теоретически бесконечен и имеет постоянную составляющую.

Видео сигналы не могут передаваться по непрерывным каналам с частотным разделением (например по каналам тональной частоты). Для передачи таких сигналов должна использоваться какая-либо модуляция обычно синусоидальных колебаний.

Рассмотрим спектры АМ, ЧМ, ФМ сигналов гармонических несущих при прямоугольной форме периодической видеопоследовательности.

Спектр АМ сигналов представлен на рис. 3б. (где  $f_0$ - частота несущего колебания). Спектр АМ сигналов содержит несущую частоту  $f_0$  и две боковых, форма которых аналогична форме спектра модулирующей видео последовательности (см. рис. 3а).

Спектр ЧМ сигнала представлен на рис. 3в. при различных индексах модуляции  $m=f_d/F_m$ , где  $f_d=(f_1-f_0)/2$ ,  $F_m=l/2\tau_c$ ;  $q=T_0/\tau_c$  - скважность импульсов. Спектр ЧМ колебания также состоит из несущего колебания  $f_0$  и двух боковых, спектры которых отличаются от спектра модулирующей последовательности (зависит от индекса  $t$ ). Ширина спектра ЧМ колебаний зависит от основания кода:  $F=a/\tau_c$ .

Спектр ФМ колебаний представлен на рис. 3г. при различных фазовых сдвигах:  $180^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $90^\circ$ . Спектр ФМ содержит несущую частоту (кроме случая когда  $Q=180^\circ$ ) симметрично от которой располагаются боковые составляющие. Огибающая спектра имеет форму аналогичную спектру модулирующих импульсов. При  $Q=180^\circ$  в спектре ФМ отсутствует несущее колебание. Ширина спектра ФМ колебаний равна ширине спектра АМ колебаний и не зависит от сдвига фаз и основания кода  $F=l/\tau_c$ .

## 2. 4. Взаимно корреляционные функции при различных видах модуляции

Различимость сигналов (помехоустойчивость) различных дискретных сигналов при действии помех зависит не только от вида модуляции, но и от ее характеристик прежде всего функции (коэффициента) взаимной корреляции, которая определяется выражением (при дискретном времени наблюдения)

$$r_c = \sum_{h=1}^H s_0(t_h) s_1(t_h) / P_c H, \quad (2)$$

где  $P_c$  - мощность сигнала;  $H$  - число выборок на длительность символа,  $\tau_c$ . При прямоугольных импульсах и ЧМ

$$r_c(s_1, s_0) = \frac{\sin(\omega_1 - \omega_0)\tau_c}{(\omega_1 - \omega_0)\tau_c}, \quad (3)$$

где  $\omega_1, \omega_0$  - угловые частоты используемые для передачи "1" и "0" соответственно; при ФМ и ОФМ сигналах с прямоугольной огибающей

$$r_c(s_1, s_2) = \cos \Delta \theta, \quad (4)$$

где  $\Delta \theta$  - сдвиг начальной фазы между сигналами при передаче "1" и "0". Оптимальными и квазиоптимальными значениями являются:

при АМ  $(1 - r_c) = 1/2$ , при ортогональной ЧМ:  
 $(1 - r_c) = 1$ , а при противоположной ФМ:  $(1 - r_c) = 2$ ; Графики функций взаимной корреляции представлены на рис. 4.

## 2. 5. Алгоритм формирования помехи

Для формирования помехи при дискретном наблюдении сигнала производится обращение к стандартной программе датчика для получения равномерной случайной величины на интервале (0, 1). В

результате образуется совокупность равномерно распределенных чисел  $\{l_i\}$ . Затем при помощи специального вида нелинейных функциональных преобразований образуется совокупность случайных чисел  $\{n_i\}$  с требуемым одномерным законом распределения  $w_n(n)$ .

$$n_i F^{-1}(l_i), i = 1, 2, \dots,$$

где  $F^{-1}$  - функция, обратная интегральной кривой

$$F(l_i) = \int_{-\infty}^{l_i} w_n(n) dn.$$

Данный способ генерации, получивший название нелинейного преобразования, дает независимую совокупность выборок  $\{n_i\}$  типа белого шума.

В настоящей работе используется обобщенный-гауссовский закон для плотности распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений [1, с.118].

$$w_n = \frac{\nu}{\Gamma(1/\nu)} \exp \left\{ \frac{|n|^\nu}{\delta_n^\nu} \left[ \frac{\Gamma(3/\nu)}{\Gamma(1/\nu)} \right]^{\nu/2} \right\}, \quad (5)$$

где  $\delta_n^2$  - дисперсия (мощность) помехи;  $\Gamma(x)$  - гамма функция, значения которой приведены в приложении 1;  $\nu$  - параметр распределения, который может задаваться в пределах от 0,8 до 7,0. При параметре  $\nu = 2$  будем иметь гауссовский закон:

$$w_n(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_n^2}} \exp \left( \frac{-n^2}{2\delta_n^2} \right), \quad (6)$$

при  $\nu = 1$  лапласовский закон:

$$w_n 1(n) = \frac{1}{\sqrt{2\delta_n}} \exp \left[ -\frac{|n|\sqrt{2}}{\delta_n} \right]. \quad (7)$$

Соответствующие формулы функционального преобразования имеют вид:

для гауссовского закона

$$n_i = \delta_n [-2 \ln l_{2i-1}]^{1/2} \sin 2\pi l_{2i},$$

для лапласовского закона

$$n_i = \frac{\delta_n}{\sqrt{2}} \ln l_{2i-1} \sin n(l_{2i} - 0,5),$$

где  $\text{sign}(x)$ - знаковая функция ( $\text{sign}(x)=1$  при  $x \geq 0$ ,  $\text{sign}(x)=-1$  при  $x < 0$ ); для обобщенно-гауссовского закона с  $\nu = 0,8$ .

$$n_i = F_{Tab}^{-1}(l_i),$$

где  $F_{Tab}^{-1}(l_i)$  - таблично заданная обратная интегральная функция, значения которой (128 точек) хранятся в памяти ЭВМ.

## 2. 6. Алгоритм формирования аддитивной смеси сигнала и помехи

Данный алгоритм представляет собой операцию суммирования дискретных значений сигнала - переносчика и помехи

$$y(t_h) = y_h = s_h + n_h \text{ при } 0 \leq t \leq \tau_c \\ \left( h = 1, 2, 3, \dots, H = \frac{\tau_c}{T_0} \right).$$

## 2.7. Алгоритм демодуляции дискретных АМ, ЧМ и ФМ сигналов

Моделируется асимптотически оптимальный когерентный приемник полностью известных сигналов по критерию максимального правдоподобия при воздействии негауссовых помех и оптимальный когерентный приемник при гауссовых помехах

$$\hat{\lambda} = \max\{q(\lambda_i)\} = \max\left(q(s_i) - \frac{E_i}{2}\right),$$

где  $q(s_i)$ - функция взаимной корреляции сигналов между входным  $y(t_h)$  и опорным  $s_{i0}(t)$  сигналами;

$$E_i = \sum_{h=1}^H s_i^2(t_h) \approx \int_0^{T_c} s_i^2(t) dt - \text{энергия сигналов при}$$

прямоугольной форме импульса.

Последнее выражение используется при приеме АМ сигналов.

При использовании алгоритма максимального правдоподобия основной необходимой и достаточной операцией оптимального приемника полностью известных сигналов является формирование функции взаимной корреляции  $q(s_i)$  для всех дискретных сигналов  $s_i \equiv \lambda_i$ , которая при дискретном времени наблюдения и помехе с независимыми значениями определяется выражением (при соблюдении условия асимптотически оптимального приема  $s \rightarrow 0, H \rightarrow \infty$ ) [1, c.200]:

$$q(s_i) = \sum_{h=1}^H z[y(t_h)] s_{i0}(t_h), \quad (8)$$

где  $z[y(t_h)]$  - первообразный входной сигнал у  $y(t_h)$  с оператором безинерционного нелинейного преобразования (БНП): (т.к.  $s < n$ , то  $z_{ao}(y_h) = z_{ao}(n_k)$ );

$$z_{ao}(y_h) = -\frac{d}{dy_h} \ln w_n(y_h) = -\frac{d}{dn_h} \ln w_n(n_h) = z_{ao}(n), \quad (9)$$

здесь  $w_n(y)$  - одномерная плотность распределения вероятностей действующей помехи;  $s_{i0}(t)$  - набор опорных дискретных сигналов.

При воздействии белого гауссовского шума операция безинерционного преобразования имеет вид

$z[y(t_h)] = y(t_h)/\delta_n^2$  т.е. представляет собой линейный усилитель, а приемник в целом является оптимальным линейным.

При помехе с лапласовским законом распределения получим:

$$z[y(t_h)] = \sqrt{2/\delta_n^2} \operatorname{sign}[y(t_h)].$$

В этом случае БНП представляет собой жесткий ограничитель. Заметим, что при воздействии негауссовской помехи алгоритм (8) является лишь асимптотически оптимальным, т. е. при условии малого входного отношения сигнал/помеха и большого количества выборок  $H \rightarrow \infty$

Структурная схема оптимального для гауссовского белого шума и асимптотически оптимального (для негауссовского белого шума) приемника дискретных двоичных полностью известных сигналов приведена на рис. 1. (а,б,в), где обозначено СТС-система тактовой синхронизации. Из выражения (8) и рис. 1 .(а,б,в) видно, что в общем случае приемник является корреляционным нелинейным. Амплитудная характеристика БНП однозначно связана с одномерной плотностью распределения помехи в соответствии с (9). При гауссовской помехе БНП отсутствует. Если  $z_{ao}(y_h)$  не связана с ПРВ действующей помехи, то вместо подавления помехи может происходить ее усиление и ухудшение помехоустойчивости.

Примеры амплитудных характеристик БНП при  $\nu=0,8; 1,0; 5,0$ ; приведены на рис. 5. (а,б,в) соответственно.

## 2. 8. Алгоритм демодуляции ОФМ сигналов

В настоящее время известны и находят применение два основных метода приема и декодирования (демодуляции) ОФМ сигналов: 1) способ сравнения полярностей, называемый также когерентным; 2) способ сравнения фаз, называемый также автокорреляционным. Из-за сравнительной простоты технической реализации и

высокой помехоустойчивости наиболее широко используется первый способ, который и изучается в данной лабораторной работе.

Способ сравнения полярностей является когерентным (точнее квазикогерентным) и предполагает наличие синфазного (противофазного) с поступающим сигналом опорного сигнала. Такой опорный сигнал должен формироваться специальной высокочастотной системой синхронизации (ВСС), выполненной например по схеме Пистолькорса. Устройство перекодирования (относительный декодер) обычно устанавливается после решающего устройства и состоит из двоичного сумматора и элемента памяти (как и в предыдущем устройстве).

Последовательность символов  $\hat{\lambda}_j$  подвергается обратному перекодированию по правилу

$$\hat{\lambda}_j = \varepsilon_{jk} \oplus \varepsilon_{j(k-1)}.$$

Здесь  $\varepsilon_{jk}$  и  $\varepsilon_{j(k-1)}$  принятые соседние символы перекодированной последовательности.

При дискретном наблюдении и цифровой обработке ОФМ сигналов схема оптимального приемника при гауссовских помехах, преобразуется в схему асимптотически оптимального приемника при негауссовских помехах, приведенную на рис. 1г.

## 2. 9. Оценка вероятности ошибки

Вероятность ошибки в опознании элементарного символа (коэффициент ошибок)  $P_{\text{оп}}$  при оптимальном

и асимптотически оптимальном приеме полностью известных АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ двоичных дискретных равновероятных сигналов при дискретном наблюдении определяется выражением [1, с. 211]

$$P_{\text{ошAM,ЧМ,ФМ}} = V \left\{ \sqrt{P_c H \mu_0^2 (1 - r_c) / 2 \delta_n^2} \right\}, \quad (10)$$

где  $V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$  - дополнение к интегралу

вероятностей, табулированные значения для которого приведены в приложении 2;

$P_c$  - мощность сигнала, определяемая выражением

$$P_c = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H s_i^2(t_h) \approx \frac{1}{\tau_c} \int_0^{\tau_c} s_i^2(t) dt, \quad (11)$$

$r_c$  - нормированный коэффициент (функция) взаимной корреляции между сигналами;  $H$  - число выборок на длительность символа.

При экспериментальных исследованиях коэффициент ошибок определяется формулой

$$P_{\text{ош}} \approx N_{\text{ош}} / N_0, \quad (13)$$

где  $N_{\text{ош}}$  - общее число переданных символов (бит);

$N_0$  - число ошибочно принятых символов.

Для получения достоверных данных  $N_0$  должно браться как можно больше (-1000)

$\mu_{ao}^2 = \delta_n^2 \int_{-\infty}^{\infty} [z(n)]^2 w_n(n) dn$  - коэффициент, показывающий во

сколько раз увеличится отношение сигнал/помеха на выходе БНП с характеристикой преобразования мгновенных значений  $w_n(n)$ , определяемой по (9), по сравнению с отношением сигнал/помеха на выходе БНП, если помеха характеризуется одномерной симметричной относительно

нуля ПРВ  $W_n(n)$ . Коэффициент  $\mu_{ao}^2$  всегда больше или равен единице, причем,  $\mu_{ao}^2 = 1$  при гауссовской помехе;  $\mu_{ao}^2 = 2$  при лапласовской помехе;  $\mu_{ao}^2 = 4,22$  при обобщенно-гауссовской помехе с параметром  $\nu = 0,8$  [1, рис.5.136]. При рассогласовании характеристики БНП с ПРВ помехи  $\mu_{ao}^2 < 1$ .

Так при:

1) $\nu_{ORG} = 0,8$	и	$\nu_{ORG} =$	$\mu_{ao}^2 = 0,007$
2) $\nu_{ORG} = 5$	и	$\nu_{ORG} =$	$\mu_{ao}^2 = 0,23$
3) $\nu_{ORG} = 1$	и	$\nu_{ORG} =$	$\mu_{ao}^2 = 1$

Из (10) видно, что при прочих равных условиях, помехоустойчивость при негауссовских помехах может быть выше, чем при гауссовских. Это объясняется тем, что при равной дисперсии гауссовская помеха обладает большей неопределенностью (энтропией), чем негауссовская.

Структурные схемы исследуемых систем приема и передачи дискретных сообщений с АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ

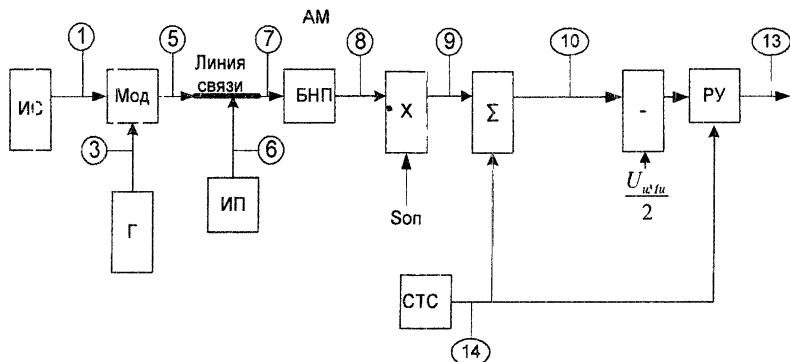


Рис. 1а. Структурная схема системы приема и передачи дискретных сообщений с АМ

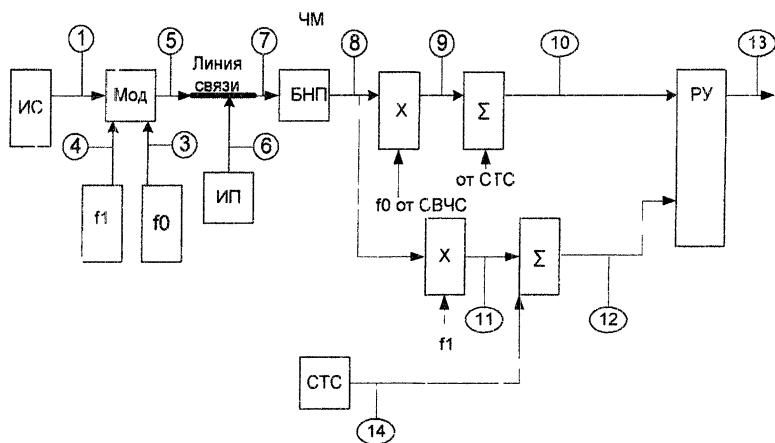


Рис. 1б. Структурная схема системы приема и передачи дискретных сообщений с ЧМ

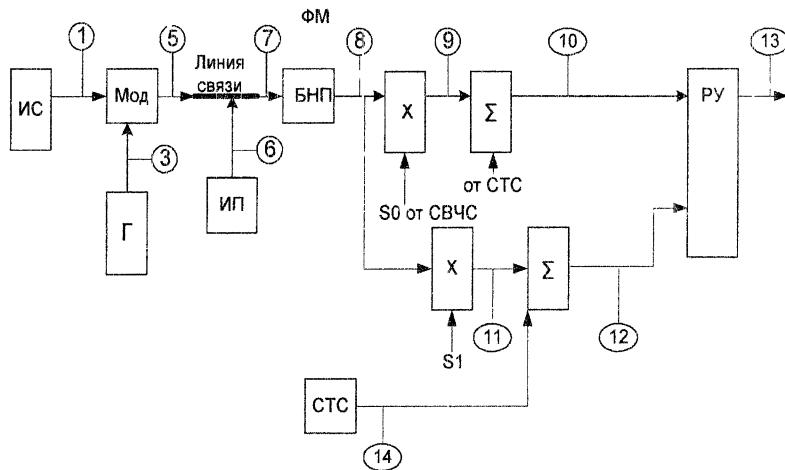


Рис. 1в. Структурная схема системы приема и передачи дискретных сообщений с ФМ

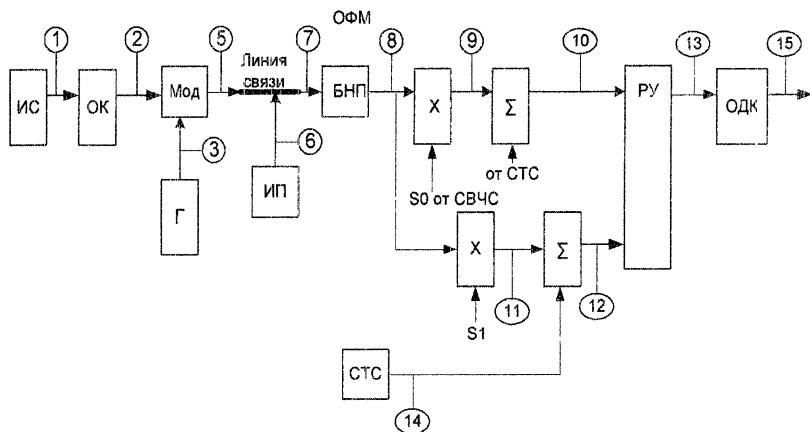


Рис. 1г. Структурная схема системы приема и передачи дискретных сообщений с ОФМ

## Эпюры сигналов с АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ

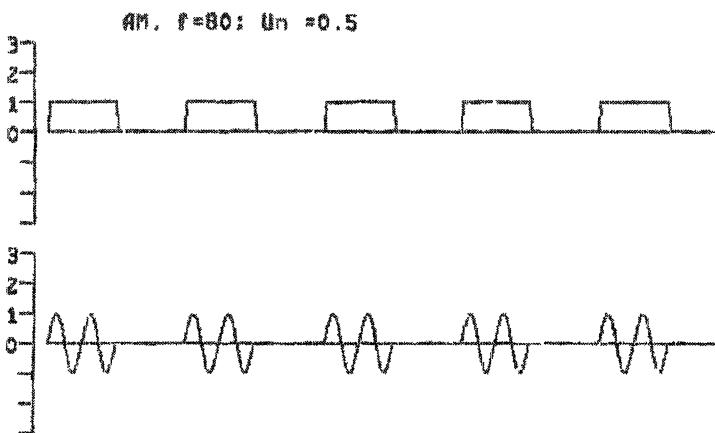


Рис. 2а. АМ с пассивной паузой

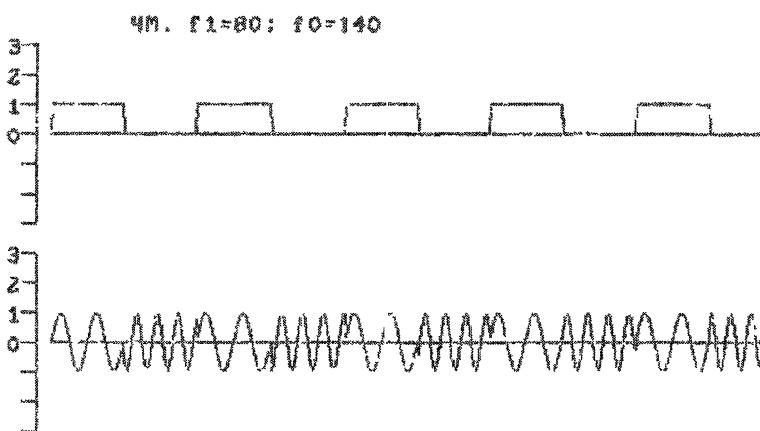


Рис. 2б. ЧМ с  $r_c = -0.2122$

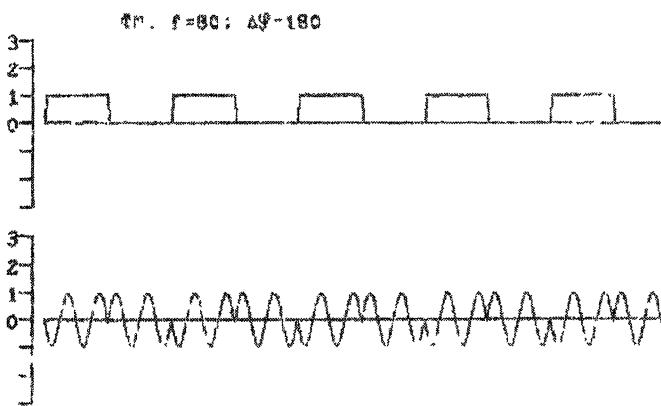


Рис. 2в ФМ с  $r_c = -1$

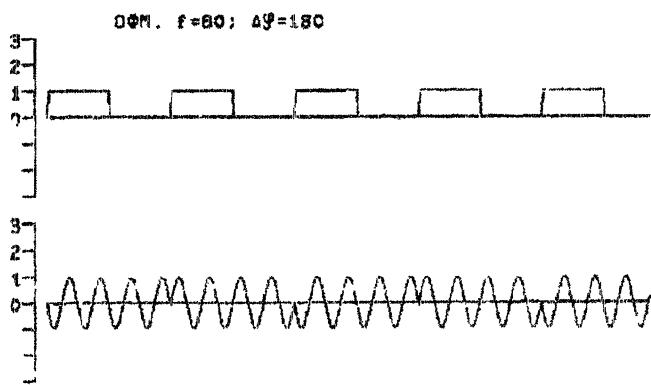


Рис. 2г. ОФМ с  $r_c = -1$

### Спектры сигналов

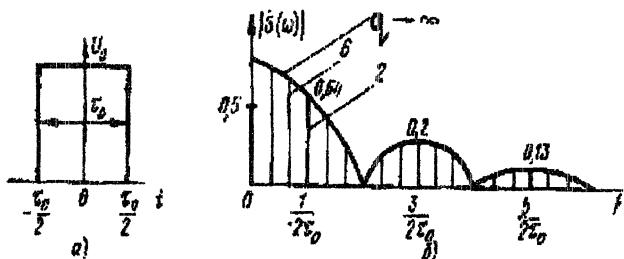


Рис. 3а. Прямоугольный видео импульс (а) и его спектральная плотность амплитуд

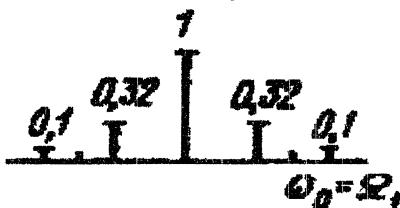


Рис. 3б. Спектр амплитудно-модулированного сигнала

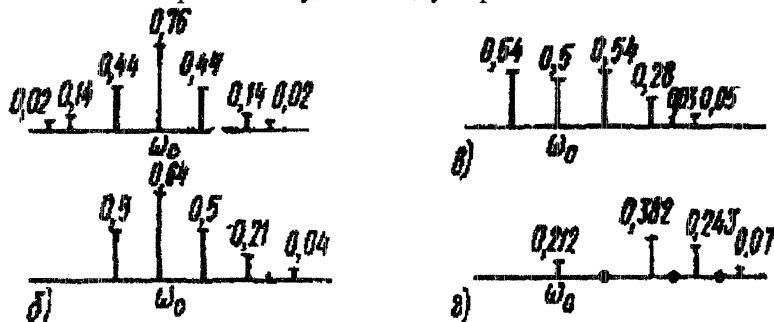


Рис. 3в. Спектры частотно-модулированных сигналов при  $m=0,8$ (а);  $1,0$ (б);  $1,2$ (в);  $3,0$ (г)

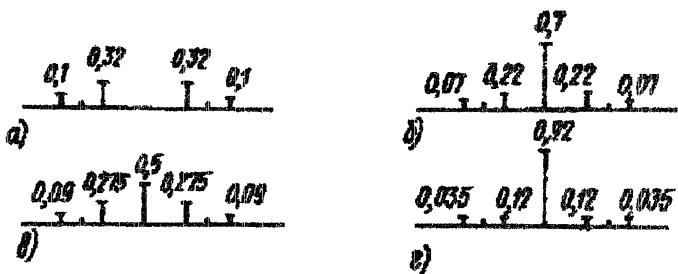


Рис. Зг. Спектры фазо-модулированных сигналов при  $\theta=180^\circ$  (а),  $90^\circ$  (б)  $120^\circ$ (в) и  $45^\circ$  (г)

Коэффициент взаимной корреляции для АМ с пассивной паузой всегда равен 0



Рис. 4а Функция взаимной корреляции при ЧМ



Рис. 4б. Функция взаимной корреляции при ЧМ

### Амплитудные характеристики БНП

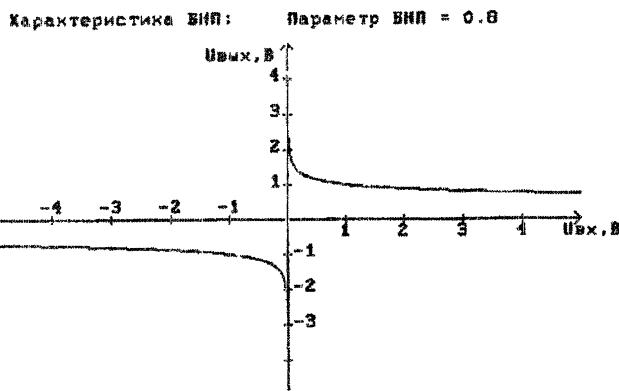


Рис. 5а. Характеристика БНП при  $\nu = 0.8$

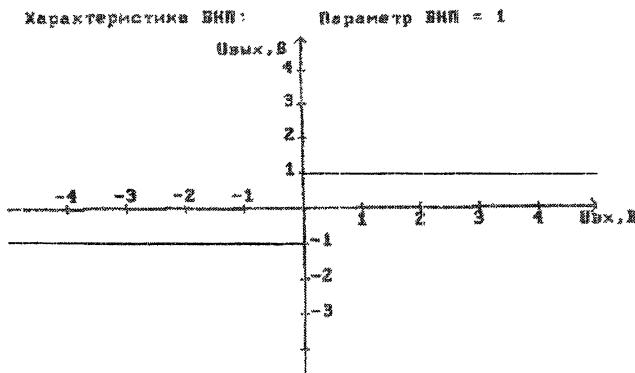


Рис. 5б. Характеристика БНП при  $v=1$

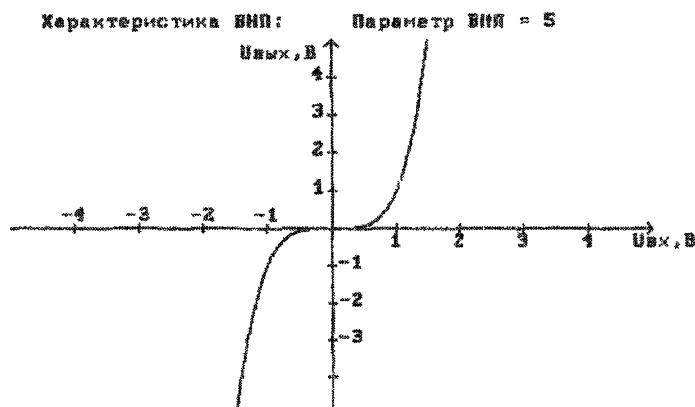


Рис. 5в. Характеристика БНП при  $v=5$

### **3. ОПИСАНИЕ ПОДПРОГРАММ**

#### **3.1. Подпрограмма источника дискретных сообщений**

Данная подпрограмма вырабатывает двоичную последовательность элементарных символов, которая может быть трех типов:

- 1) непрерывная серия из одних нулей (000...) или единиц (111...);
- 2) серия из чередующихся нулей и единиц (1010...);
- 3) псевдослучайная серия нулей и единиц.

Тип и длина последовательности задаются в исходных данных, которые запрашиваются на экране дисплея в виде соответствующих вопросов. Псевдослучайная серия нулей и единиц генерируется по рекуррентному алгоритму на основе циклического кода с образующим полиномом  $p(x)=x^5+x^2+1$ . Рекуррентная формула имеет вид

$$\lambda_k = \lambda_{k-5} \oplus \lambda_{k-3},$$

где  $\lambda_k$  - элементы двоичной псевдослучайной последовательности,  $\oplus$  - операция сложения двоичных чисел по модулю два, которая находится по правилу:  
 $1 \oplus 1 = 0 \oplus 0 = 0; 0 \oplus 1 = 1 \oplus 0 = 1$

В результате работы подпрограммы источника дискретных сообщений (ИС) на экране выдаются сформированная последовательность двоичных символов и соответствующий ей график - осциллограмма первичного видео сигнала.

#### **3.2. Подпрограмма модулятора**

Подпрограмма модулятора имитирует работу аналоговых модуляторов АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ сигналов. В результате работы подпрограммы на экран дисплея выдаются графики - осциллограммы дискретных сообщений и соответствующих им сигналов - переносчиков с АМ, ЧМ,

ФМ и ОФМ. На экран выдается также значение коэффициента корреляции сигналов  $r_c$  и ПРВ.

### 3. 3. Подпрограмма линии связи

Подпрограмма линии связи имитирует работу линии связи с аддитивными помехами. В качестве помехи может быть выбрана помеха с гауссовским, лапласовским или обобщенно-гауссовским  $\nu = \text{var}$  законами распределения с независимыми значениями.

Подпрограмма линии связи по окончании своей работы выдает на экран дисплея либо график чистого сигнала-переносчика, либо график реализации помехи, либо график реализации аддитивной смеси. На экран также может выдаться гистограмма помехи, чистого сигнала или смеси. Подпрограмма позволяет исследовать степень влияния помехи на передаваемый по линии связи сигнал  $s(t)$ , а также оценить по гистограмме плотность распределения вероятностей значений помехи  $w_n(n)$ .

### 3. 4. Подпрограмма демодулятора

Подпрограмма демодулятора имитирует работу алгоритма (8). Для обеспечения своей работы подпрограмма вызывает подпрограмму линии связи, в результате чего формируется массив входной реализации  $y_h$ , состоящий из  $N$  элементарных сигналов (символов). Данный массив обрабатывается в соответствии с алгоритмом (8). При этом подсчитывается количество ошибок путем сравнения значений, переданных от источника двоичных символов  $\lambda_k$  со значением принятых символов  $\hat{\lambda}_k$ , которые появляются на выходе решающего устройства. В процессе работы программы на экран выдаются сообщения о количестве ошибок  $N_{\text{ош}}$  и количестве переданных символов  $N$ . По окончанию своей работы подпрограммы запрашивается номер

исследуемого символа. После задания номера производится вывод на экран графиков чистого сигнала и смеси, соответствующих введенному символу. Также на экран выводятся диаграммы, показывающие процесс накопления выходных эффектов алгоритма для данного символа в соответствии с формулой (8). Задавая различные законы распределения помех, а также меняя вид исследуемого алгоритма (линейный и нелинейный), можно тем самым экспериментально исследовать помехоустойчивость алгоритмов (вероятность ошибки) и сравнить ее с теоретической при различных видах и параметрах модуляции, соотношении сигнал/помеха, виде помехи, количестве обрабатываемых выборок на элементарный сигнал и т.д. Экспериментальная оценка помехоустойчивости при этом производится по формуле

$$P_{\text{ош}} \approx N_{\text{ош}} / N$$

где  $N$  - общее число переданных элементарных символов;  
 $N_{\text{ош}}$ -число ошибочно принятых символов.

### 3. 5. Подпрограмма графика-осциллографмы

Данная подпрограмма имитирует работу обычного однолучевого и двухлучевого осциллографа и позволяет выводить на экран или печатающее устройство в виде графиков отдельные реализации исследуемых дискретных процессов первичного сигнала сообщения, сигнала-переносчика, помехи, аддитивной смеси сигнала с помехой. Подпрограмма выполнена так, что реализация исследуемого процесса выводится в автоматическом масштабе, при котором обеспечивается наиболее полное использование площади экрана дисплея. Расположение оси времени осциллографа-вертикально.

### 3.6. Подпрограмма статистической обработки случайных реализаций дискретного процесса

Подпрограмма производит расчет значений выборочного среднего и дисперсии массива дискретной реализации по формулам

$$m_n = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k n_p ,$$
$$\delta_n^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{p=1}^k (n_p - m_n)^2 ,$$

где  $n_p$  - элементы массива;  $k$  - объем массива.

Подпрограмма также строит гистограмму для данного массива. Гистограмма - это графическое изображение в виде ступенчатой кривой частоты попаданий элементов массива в равновеликие интервалы, которые покрывают в виде шкалы диапазон вариаций элементов массива.

Чтобы гистограмма позволяла выявить закономерность оцениваемого ею закона распределения  $w_n(n)$  случайной величины наилучшим образом, необходимо ширину интервалов выбрать оптимальной по формуле

$$p = \frac{(n_{\max} - n_{\min})}{\log_2 k} ,$$

где  $n_{\max}$  и  $n_{\min}$  - максимальное и минимальное значения элемента массива выборок.

Построение гистограммы на ЭВМ производится следующим образом:

1. Определяются максимальный  $n_{\max}$  и минимальный  $n_{\min}$  элементы массива методом перебора.

2. Вычисляется оптимальная ширина интервала  $p$ .
3. Определяется количество интервалов, укладываемых в диапазон  $n_{\max} - n_{\min}$
4. Подсчитывается методом перебора количество попаданий  $k_p$  элементов массива в каждый из интервалов.
5. Строится график из прямоугольников, основаниями которого являются интервалы, а высоты пропорциональны или равны количеству попаданий  $k_p$  в данный  $p$  интервал. При этом высота прямоугольников нормируется по формуле
$$L_p = \frac{k_p}{kp}$$
для того, чтобы сумма всех площадей прямоугольников гистограммы равнялась 1.

#### **4. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ**

1. Изучить теорию дискретных сигналов, случайных процессов (помех) и оптимального приема сигналов по конспекту лекций и литературе:[1,2].
2. Рассчитать ПРВ для помех с ОГЗ при  $v=0,8; 2,0; 5,0$ .
3. Нарисовать структуру АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ сигналов.
4. Рассчитать функцию корреляции для ЧМ и ФМ сигналов, данные расчета привести в таблице и построить графики.
5. Рассчитать вероятность ошибки в приеме элементарного символа при различных характеристиках сигналов и помехах, задаваемых преподавателем.
6. Разработать методику самостоятельных экспериментальных исследований по сравнительной оценке помехоустойчивости при различных методах передачи и приема сигналов и характеристиках помех.

## **5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ**

### **5.1 Примерные темы занятий**

**Занятие 1.** Знакомство с операторской работой на ЭВМ в соответствии с приведенной инструкцией.

**Занятие 2.** Исследование характеристик двоичных последовательностей сообщений (осцилограммы, спектры в зависимости от вида последовательности и длительности импульсов).

**Занятие 3.** Исследование дискретных сигналов и их характеристик (осцилограммы, корреляционные функции, спектры и гистограммы) при различных видах модуляции.

**Занятие 4.** Исследование статистических характеристик гауссовых и негауссовых процессов (помех) (осцилограммы, гистограммы для 3-х распределений и 2-х дисперсий:  $\delta_n^2 = 1:4$ )

**Занятие 5.** Исследование характеристик оптимального и асимптотически оптимального приемника (осцилограммы сигналов в различных точках схемы приемника, перемножителя, интегратора, РУ).

**Занятие 6.** Исследование характера воздействия помех на различные дискретные сигналы в линии связи. Временные диаграммы и гистограммы для аддитивной смеси полезного сигнала до и после БНП.

**Занятие 7.** Исследование прохождения случайных процессов через линейную и нелинейную цепи различного вида (осцилограммы, гистограммы)

Занятие 8. Учебно-исследовательская работа по исследованию помехоустойчивости систем передачи при различных модуляциях и ее характеристиках, а также видах и интенсивностях помех и задержке в СТС.

Занятие 9. Итоговое занятие под руководством преподавателя.

## 6.ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение № 1

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,0	1	1,18	0,9237
1,01	0,9943	1,19	0,9209
1,02	0,9888	1,20	0,9182
1,03	0,9835	1,30	0,8975
1,04	0,9784	1,35	0,8912
1,05	0,9735	1,40	0,8879
1,06	0,9687	1,45	0,8857
1,07	0,9642	1,50	0,8862
1,08	0,9597	1,55	0,8889
1,09	0,9555	1,60	0,8935
1,10	0,9514	1,65	0,9001
1,11	0,9474	1,70	0,9086
1,12	0,9436	1,75	0,9191
1,13	0,9399	1,80	0,9314
1,14	0,9364	1,85	0,9456
1,15	0,9330	1,90	0,9618
1,16	0,9229	1,95	0,9799
1,17	0,9267	2,00	1

Приложение №2

Таблица дополнения к интегралу вероятностей

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz.$$

	0	множитель		0	множитель
0,0	5.000	$10^{-1}$	5,2	9.964	$10^{-8}$
0,2	4,207	$10^{-1}$	5,4	3,332	$10^{-8}$
0,4	3,446	$10^{-1}$	5,6	1,072	$10^{-8}$
0,6	2,743	$10^{-1}$	5,8	3,316	$10^{-9}$
0,8	2,119	$10^{-1}$	6,0	9,886	$10^{-10}$
1,0	1,587	$10^{-1}$	6,2	2,823	$10^{-10}$
1,2	1,151	$10^{-2}$	6,4	7,769	$10^{-11}$
1,4	8,076	$10^{-2}$	6,6	2,055	$10^{-11}$
1,6	5,480	$10^{-2}$	6,8	5,231	$10^{-12}$
1,8	3,593	$10^{-2}$	7,0	1,280	$10^{-12}$
2,0	2,275	$10^{-2}$	7,2	3,011	$10^{-13}$
2,2	1,390	$10^{-2}$	7,4	6,809	$10^{-14}$
2,4	8,198	$10^{-3}$	7,6	1,481	$10^{-14}$
2,6	4,661	$10^{-3}$	7,8	3,095	$10^{-15}$
2,8	2,555	$10^{-3}$	8,0	6,221	$10^{-16}$
3,0	1,350	$10^{-4}$	8,2	1,202	$10^{-16}$
3,2	6,871	$10^{-4}$	8,4	2,232	$10^{-17}$
3,4	3,369	$10^{-4}$	8,6	3,986	$10^{-18}$
3,6	1,591	$10^{-4}$	8,8	6,841	$10^{-19}$
3,8	7,235	$10^{-5}$	9,0	1,129	$10^{-19}$
4,0	3,167	$10^{-5}$	9,2	1,790	$10^{-20}$
4,2	1,335	$10^{-5}$	9,4	2,728	$10^{-21}$
4,4	5,413	$10^{-6}$	9,6	3,977	$10^{-22}$
4,6	2,112	$10^{-6}$	9,8	5,629	$10^{-23}$
4,8	7,933	$10^{-7}$	10,0	7,620	$10^{-24}$
5,0	2,866	$10^{-7}$			

## **7. ИНСТРУКЦИЯ**

### **Программа "TOS":**

Программа исследует работу системы передачи дискретной информации с АМ, ЧМ, ФМ и ОФМ модуляцией, при различных характеристиках помехи.

Программа моделирует работу асимптотически оптимального приемника. Частота дискретизации наблюдения – 2 кГц.

Предусмотрено изучение осцилограмм сигнала во всех точках схемы приемника, а также статистическое определение вероятностей ошибок приема в зависимости от различных параметров.

#### **7.1 Запуск программы**

В комплект программы "TOS" входят следующие файлы:

TOS.EXE - исполняемый файл программы

TOS.MGR - основной графический файл.

TOS.FNT - графический файл со шрифтом.

TOS.PAL - графический файл с палитрой.

TOS.HLP - текстовый файл с инструкцией.

TOS.INI - выбранный тип принтера.

EGA.VGA.BGI - видеодрайвер.

Файлы должны быть размещены в том же каталоге, что и программа TOS.EXE. При отсутствии или повреждении любого файла программа не запустится.

## 7. 2. Управление программой

Экран разделен на две части: "дисплей", на котором отображается вся информация, под ним - ряд управляющих кнопок. В нижней части дисплея расположена выделенная белыми буквами строка состояния, разъясняющая текущий момент.

Программа может управляться как с клавиатурой, так и только мышью. При управлении с клавиатурой, для перемещения курсора вдоль ряда кнопок служат клавиши "стрелка вправо" и "стрелка влево".

Аналогичное действие имеют клавиши "ESC" и "F1" - "F9", соответствующие ряду управляющих кнопок.

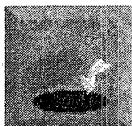
При нажатии на кнопку, в нижней части "дисплея" появляется меню выбора, в виде строки текста, разделенной прямоугольниками.

При изменении вида модуляции, при движении курсора вдоль меню на "дисплее" отображается схема СПДИ для выбранного в данный момент вида модуляции.

При выборе параметра ОГЗ или дисперсии помехи, одновременно с движением курсора вычерчивается график ПРВ помехи.

После запуска программа переходит в режим задания параметров, из которого можно перейти в режимы "Осциллограф" и "Статистика", нажав соответствующие кнопки, (или клавиши F2 и F3 соответственно).

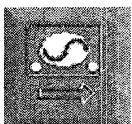
В режиме «Осциллограф» доступны следующие операции:



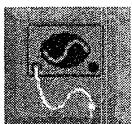
ESC - Перейти в режим задания параметров.



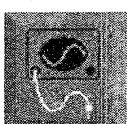
F1 - Включить инструкцию, (см. п.3,  
"Использование инструкций")



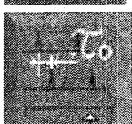
F2 - Запуск осциллографа (кнопка с фиксацией) -  
см. выше.



F3 - Подключить 1-й вход осциллографа к другой  
точке схемы (на экране отображается схема  
системы передачи)



F4 - Подключить 2-й вход.



F5 - Выбор ошибки Системы тактовой  
зации



F6 - Построение гистограммы сигнала в точках,  
к которым подключен осциллограф. Гистограмма  
строится по 5 тыс. выборок. Если строится гистограмма  
сигнала в точке 6 (Источник помехи), то на нее  
накладывается рассчитанная теоретически ПРВ помехи.

F7 - Построение спектра сигнала в точке, к которой  
подключен 1-й канал осциллографа.

## 7. 3 Использование Инструкции

После нажатия на кнопку "?" (или клавиши F1), в верхней части "дисплея" появляются три овальные кнопки: "D", "C" и "X".

Нажимая кнопки "D" и "C", или нажимая клавиши "PgUp" и "PgDn" можно листать страницы инструкции вверх и вниз. Для выхода из инструкции нужно нажать клавишу "ESC", или нажать кнопку "X".

Для каждого из режимов: задания параметров, "Осциллограф" и "Статистика" имеется своя инструкция, вызываемая нажатием "?"/F1

## 7. 4. Режим "Осциллограф"

В этом режиме программа моделирует работу двухлучевого осциллографа. Перед работой выберите две точки на схеме, к которым будете подключать входы осциллографа, (клавиши F3, F4).

После запуска осциллографа клавишей F2, осцилограмма автоматически сдвигается на ширину экрана, и останавливается (рис б.в). Для дальнейшего продвижения осцилограммы нужно нажать любую клавишу, или кнопку мыши (в любом месте, кроме кнопки "Запуск Осциллографа").

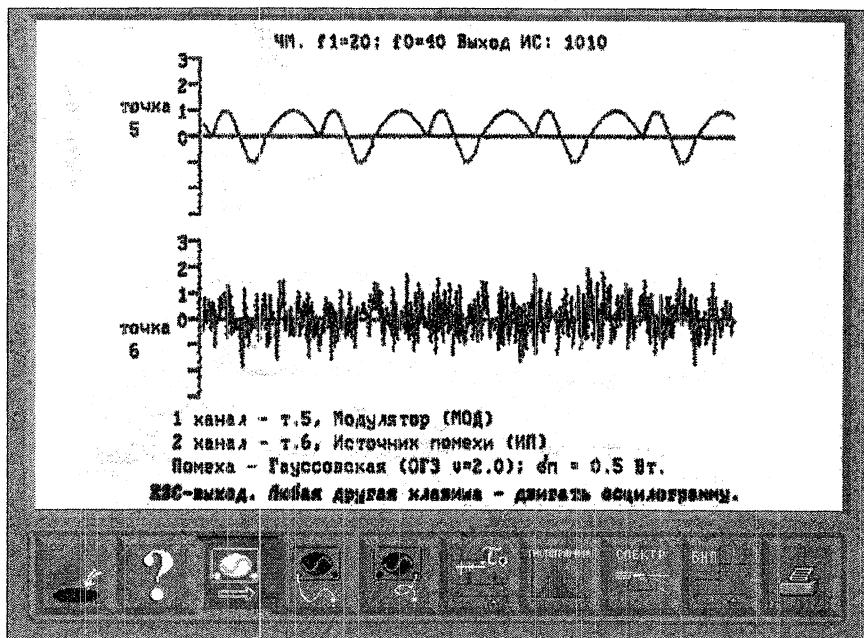


Рис. 6в.

Остановить осциллограф для перехода к другим действиям можно либо нажав клавишу ESC, либо нажав мышью кнопку "Запуск Осциллографа", которая действует, как кнопка с фиксацией.

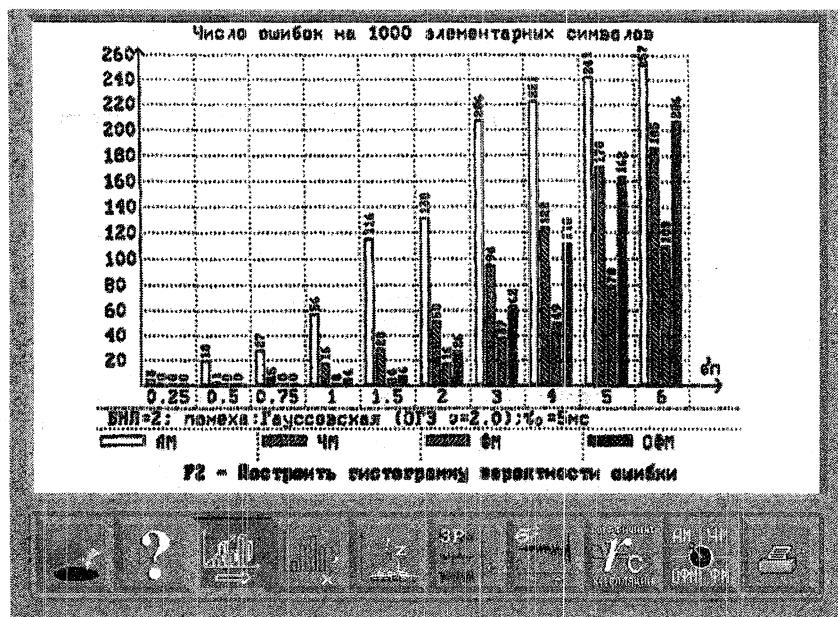


Рис. 6д. Трёхмерная гистограмма

В режиме "Статистика" доступны следующие операции:  
ESC - Перейти в режим задания параметров

F1 - Включить инструкцию, (см. п. 3, "Использование инструкции")

F2 - Приступить к построению гистограмм.

F8 - Выбор параметра и построение характеристики БНП.

F9 - Распечатать содержимое экрана, (подробнее см. в п.7.6, "Как распечатать результаты").

## 7.5. Режим "Статистика"

В этом режиме исследуются различные зависимости вероятности ошибки в приеме элементарного символа от вида и параметров модуляции, вида и дисперсии помехи, характеристики БНП. Результаты расчетов оформляются в виде гистограмм, (см. рис. 6г,6д.)

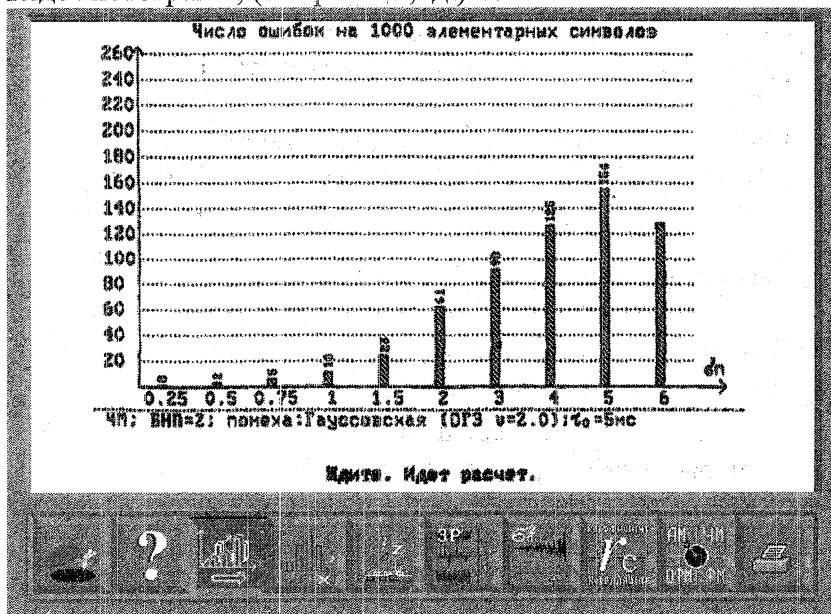


Рис. 6г. Простая гистограмма

ESC - Покинуть программу.

F1 - Включить инструкцию, (см. п.3, "Использование инструкций")

F2 - Перейти в режим "Осциллограф" (см. п.4) F3 - Перейти в режим "Статистика" (см. п.5) F4 F4 - Изменить вид модуляции.

F5 - Выбор параметров сигнала. (Частоты для АМ, разности фаз для ФМ, и т. д.)

F6 - Выбор вида последовательности элементарных символов, выдаваемых источником сигнала. Для случайной последовательности выбирается дополнительный параметр "Вероятность "1".

F7 - Выбор закона распределения помехи. Программа моделирует только помеху с Обобщенно-гауссовским ЗР. Можно выбрать его частные случаи: Лапласовское ( $v=1$ ) и Гауссовское ( $v=2$ ), а также ОГЗ с любым  $v$ : от 0,8 до 5.

F8 - Изменить вид модуляции.

F9 - Распечатать содержимое экрана, (подробнее см. в п.7.6, "Как распечатать результаты").

## 7. 6. Как распечатать результаты

В режимах "Осциллограф" и "Статистика" при нажатии клавиши F9 осуществляется печать содержимого "дисплея" таким образом, что на листе формата А4 умещаются два изображения.

Выбор типа принтера осуществляется из режима задания параметров при нажатии клавиши F9.

Можно попробовать режим печати "через Print Screen". В этом случае печать будет производиться, как при нажатии клавиши "Print Screen", но с предварительной подготовкой изображения. (Печатать таким образом можно только тогда, когда загружен драйвер graphics.com, имеющийся в комплекте ДОС).

F3 - Выбор величины, от которой будет зависеть вероятность ошибки по оси X (10 столбцов). Доступные величины:

- параметра сигнала:  
 $f$  для АМ,

Df для ЧМ ( $f_0=50$  Гц;  $f_l=f_1$ )+Df) Dj для ФМ и ОФМ

- ошибки Системы тактовой синхронизации (0-45%)

- дисперсии помехи  $S_n$  (0-4.5 Вт)

- параметра БНП (0.8-5)

- длительности элементарного символа  $t_0$  (5-50мс) (это может считаться долго!)

- параметра ОГЗ.

F4 - Выбор величины, от которой будет зависеть вероятность ошибки по оси Z (4 столбца).

Если выбрать "-", гистограмма будет двумерной, и расчет займет вчетверо меньшее время, чем для трехмерной гистограммы. Доступные величины:

- вида модуляции(АМ, ЧМ, ФМ, ОФМ)
- закона распределения помехи (параметра  $v$  ОГЗ)
- дисперсии помехи (нет, 0.5,2,5 Вт)
- параметра БНП (0.8,1,2, 5)

F5 - Выбор закона распределения помехи, (см. п.2)

F6 - Выбор дисперсии помехи: (см. п.2)

## **8.СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

1. Выполненные индивидуальные задания по каждой работе.
2. Осциллограммы, графики и таблицы по каждой работе.
3. Подробные выводы по работе.
- 4.

## **9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте полную характеристику помех (случайных процессов), используемых в лабораторном комплексе.
2. Дайте определение функции распределения вероятностей случайного процесса.
3. Что представляет собой характеристика линейной и нелинейной цепи?
4. Дайте определение ЧМ, ФМ и ОФМ сигналов.
5. В чем различия асимптотически оптимального приемника при негауссовских помехах и оптимального приемника при гауссовских?
6. Почему асимптотически оптимальный приемник обеспечивает более высокую помехоустойчивость при негауссовских помехах по сравнению с гауссовскими при прочих равных условиях?
7. Какие сигналы называются ортогональными?
8. От чего зависит в общем случае  $P_{\text{ош}}$  в приеме элементарного символа?
9. Из каких основных узлов состоит оптимальный когерентный приемник?
10. Назначение систем высокочастотной и тактовой синхронизации?

11. От чего зависит амплитудная характеристика асимптотически оптимального БНП?
12. От чего зависит число корреляторов в оптимальном корреляционном приемнике?
13. Чему равно отношение сигнал/шум на выходе коррелятора?
14. Какие двоичные сигналы обеспечивают наибольшую помехоустойчивость - АМ, ЧМ, ФМ или ОФМ при равных условиях?

## **10. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Каллер М.Я., Фомин А.Ф.  
Теоретические основы транспортной связи. Учебник для вузов ж.д. транспорта - М.: Транспорт, 1989 - 383 с.
2. Горелов Г.В., Фомин А.Ф., Волков А.А., Котов В.К.  
Теория передачи сигналов на ж.д. транспорте. Учебник для вузов ж.д. транспорта - М.: Транспорт, 1999 - 415 с.

Учебно-методическое издание  
Фомин Александр Фёдорович, Волков Анатолий  
Алексеевич, Горелов Георгий Владимирович, Журавлëва  
Любовь Михайловна, Кузнецов Сергей Николаевич.  
  
«Теория передачи сигналов железнодорожной автоматики,  
телемеханики и связи»  
Методические указания к лабораторным работам

Под редакцией профессора А.Ф. Фомина

127994 Москва, ул. Образцова , 15. Типография МИИТа