

Отчет по лабораторным работам по  
дисциплине ТСС

Климов С.А., Назарова К.Е.

2014

# Содержание

<b>1 Система верстки ТЕХи расширения АТЕХ</b>	<b>4</b>
1.1 Цель работы . . . . .	4
1.2 Ход работы . . . . .	4
1.3 Выводы . . . . .	4
1.4 Материалы . . . . .	4
1.5 Инструменты . . . . .	4
<b>2 Визуализация сигналов во временной и частотной области</b>	<b>5</b>
2.1 Цель работы . . . . .	5
2.2 Постановка задачи . . . . .	5
2.3 Справочные материалы . . . . .	5
2.4 Ход работы . . . . .	5
2.5 Результаты работы . . . . .	6
2.6 Выводы . . . . .	8
<b>3 Спектры простых сигналов</b>	<b>10</b>
3.1 Цель работы . . . . .	10
3.2 Постановка задачи . . . . .	10
3.3 Справочные материалы . . . . .	10
3.4 Ход работы . . . . .	10
3.5 Результаты работы . . . . .	11
3.6 Выводы . . . . .	16
<b>4 Линейная фильтрация</b>	<b>17</b>
4.1 Цель работы . . . . .	17
4.2 Постановка задачи . . . . .	17
4.3 Справочные материалы . . . . .	17
4.4 Ход работы . . . . .	17
4.5 Результаты работы . . . . .	18
4.6 Выводы . . . . .	21
<b>5 Аналоговая модуляция</b>	<b>22</b>
5.1 Цель работы . . . . .	22
5.2 Постановка задачи . . . . .	22
5.3 Справочные материалы . . . . .	22
5.4 Ход работы . . . . .	22
5.5 Выводы . . . . .	30
<b>6 Частотная и фазовая модуляция</b>	<b>31</b>
6.1 Цель работы . . . . .	31
6.2 Постановка задачи . . . . .	31
6.3 Справочные материалы . . . . .	31
6.4 Ход работы . . . . .	31
6.5 Выводы . . . . .	36
6.6 Выводы . . . . .	39

<b>7 Цифровая модуляция</b>	<b>40</b>
7.1 Цель работы . . . . .	40
7.2 Постановка задачи . . . . .	40
7.3 Справочные материалы . . . . .	40
7.4 Ход работы . . . . .	40
7.5 Выводы . . . . .	55

# 1 Система верстки ТЕХи расширения LATEX

## 1.1 Цель работы

Изучение принципов верстки TeX, создание первого отчета

## 1.2 Ход работы

### Изучение

1. Создание минимального файла .tex в простом текстовом редакторе - преамбула, тело документа
2. Компиляция в командной строке - latex, xdvi, pdflatex
3. Оболочка TexMaker, Быстрый старт, быстрая сборка
4. Создание титульного листа, нескольких разделов, списка, несложной формулы

### Выполнение практического задания

$$c^2 = a^2 + b^2$$

$$c_1 + c_2 = b_0 \frac{2 * a}{\log 2} \sum_{i=0}^{\infty} \Theta \quad (1)$$

$$b(k) = (-1)^k \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} a(n) \cos \frac{\pi k(2n+1)}{N} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{(|A|+1)/(\pi f_c C_1)}{b + \sqrt{b^2 - 4c(|A|+1)C_2/C_1}} \quad (3)$$

## 1.3 Выводы

При выполнении данной работы мы ознакомились с системой верстки ТЕХи расширением LATEX. Были получены начальные навыки верстки документа, а также построения различного вида формул.

## 1.4 Материалы

1. Не очень краткое введение
2. Конспект-справочник
3. <http://www.inp.nsk.su/~baldin/LaTeX/lurs.pdf>
4. Математика в LATEX

## 1.5 Инструменты

1. TeX для Windows ProText
2. TeXnicCenter
3. TeXmaker

## 2 Визуализация сигналов во временной и частотной области

### 2.1 Цель работы

Познакомиться со средствами генерации сигналов и визуализации их спектров.

### 2.2 Постановка задачи

В командном окне MATLAB и в среде Simulink промоделировать чистый синусоидальный сигнал, а также синусоидальный сигнал с шумом. Получить их спектры.

### 2.3 Справочные материалы

В.С. Гутников Фильтрация измерительных сигналов пп.1-2, 11-12

### 2.4 Ход работы

В среде MATLAB вначале моделируем чистый синусоидальный сигнал по формуле:

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi ft + f_0)$$

Затем моделируем зашумленный сигнал по формуле:

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi ft + f_0) + A_1 \text{rand}()$$

Для выделения частот регулярных составляющих используем преобразование Фурье, которое реализовано встроенной в MATLAB функцией.

#### Код MATLAB

```
f = 10;
x = 0:0.01:8*pi;
y = sin(2*pi*f*x+pi/2);
plot(x(1:200),y(1:200))
grid
figure
spectrum = fft(y,512);
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
f=100*(0:511)/512;
plot(f, norm_spectrum(1:512))
axis([0 max(f) 0 10])
grid
y_noise = y + 0.6 * rand(size(x));
figure
plot(x(1:200),y_noise(1:200));
grid
spectrum_noise = fft(y_noise,512);
noise_spectrum = spectrum_noise.*conj(spectrum_noise)/512;
```

```
figure  
plot(f, noise_spectrum(1:512))  
axis([0 max(f) 0 10])  
grid
```

## 2.5 Результаты работы

В результате получаем следующие графики временных и частотных характеристик для чистого и зашумленного синусоидального сигналов:

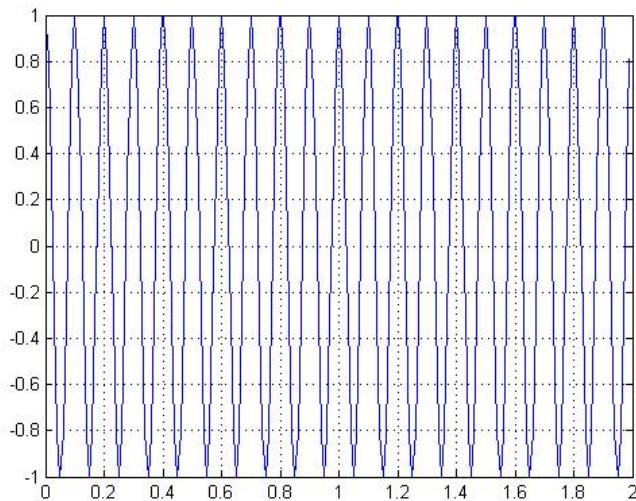


Рис. 1: Временная характеристика чистого синусоидального сигнала

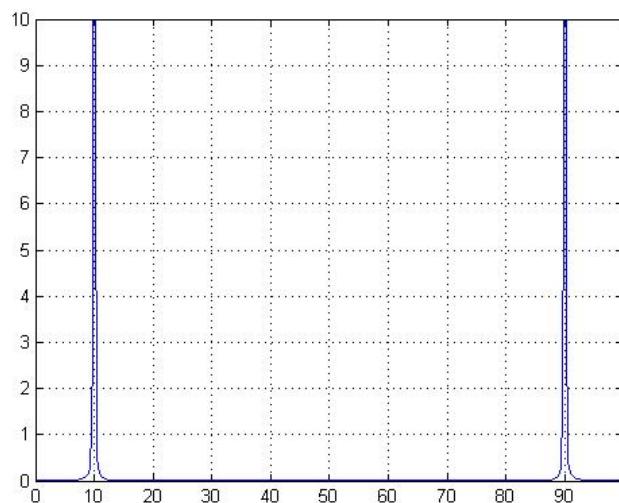


Рис. 2: Частотная характеристика чистого синусоидального сигнала

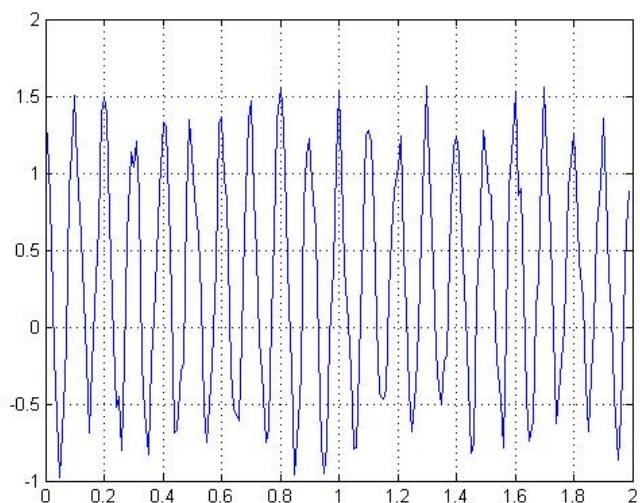


Рис. 3: Временная характеристика зашумленного синусоидального сигнала

## 2.6 Выводы

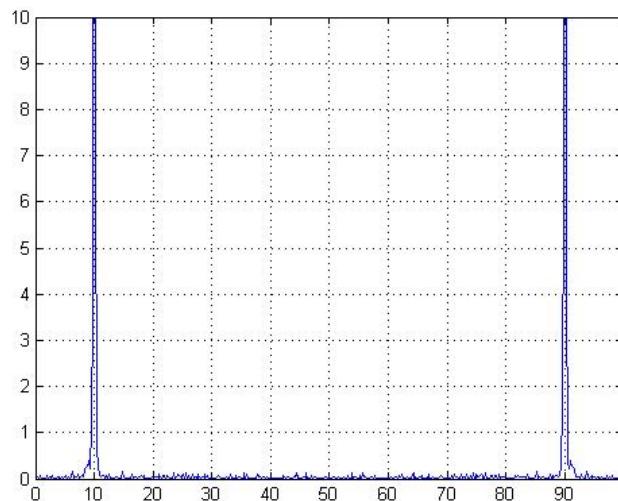


Рис. 4: Частотная характеристика зашумленного синусоидального сигнала

По результатам моделирования синусоидальных сигналов (чистого и с шумом) а также их полученных спектров можно сделать следующие выводы: умноженный на свое комплексное сопряженное спектр является нормированным, синус не бесконечен, спектр испытывает свертку с синком, повторение спектра происходит на частоте, кратной частоте дискретизации.

### 3 Спектры простых сигналов

#### 3.1 Цель работы

Получить представление о свойствах спектров.

#### 3.2 Постановка задачи

В командном окне MATLAB и в среде Simulink промоделировать следующие тестовые сигналы:

- Полигармонический сигнал

$$y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos(nt) \quad (4)$$

- Прямоугольный импульсный сигнал

$$y(t) = \prod (t, T_i) \quad (5)$$

- Треугольный импульсный сигнал

$$y(t) = \Delta (t, T_i) \quad (6)$$

и получить их спектры.

#### 3.3 Справочные материалы

В.С. Гутников. Фильтрация измерительных сигналовпп.3-6, 13-14

#### 3.4 Ход работы

Для моделирования заданных сигналов использовался приведенный код MATLAB:

```
t = 0:0.01:4*pi;
N = 100;
y = 0;

% Полигармонический сигнал
y = sin(pi*t)+sin(2*pi*t)+sin(pi*0.3*t);
plot(t,y,'LineWidth',2)
grid

figure
spectrum = fft(y,512);
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
f=100*(0:255)/512;
plot(f, norm_spectrum(1:256), 'LineWidth',2)
axis([0 max(f) 0 10])
grid
```

```
% Прямоугольный сигнал
figure
y1 = square(t,50);
plot(t(1:100),y1(1:100), 'LineWidth',2);
ylim([-2,2]);
grid

figure
spectrum = fft(y1,512);
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
f1=100*(0:255)/512;
plot(f1, norm_spectrum(1:256), 'LineWidth',2)
axis([0 max(f1) 0 10])
grid

% Треугольный сигнал
figure
y2 = conv(square(t,20),square(t,20));
plot(t(1:100),y2(1:100), 'LineWidth',2);
grid

figure
spectrum = fft(y2,512);
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
f2=100*(0:255)/512;
plot(f2, norm_spectrum(1:256)/1000, 'LineWidth',2)
axis([0 max(f2) 0 50])
grid
```

### 3.5 Результаты работы

В результате были получены следующие сигналы и их спектры:

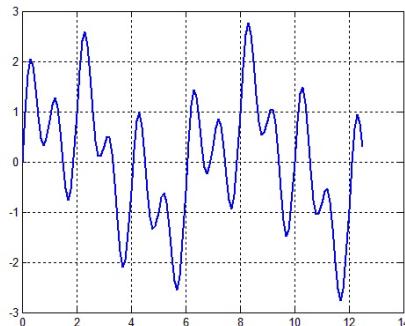


Рис. 5: Полигармонический сигнал

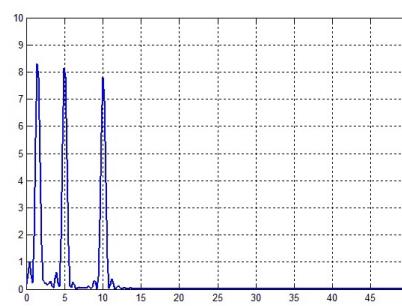


Рис. 6: Спектр полигармонического сигнала

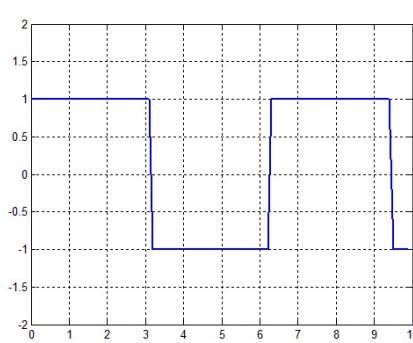


Рис. 7: Полигармонический сигнал

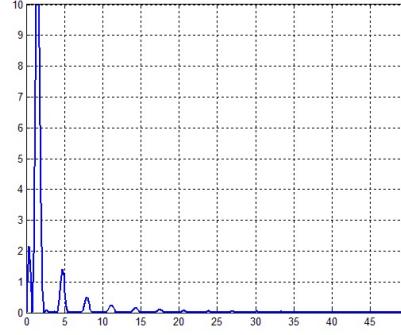


Рис. 8: Спектр полигармонического сигнала

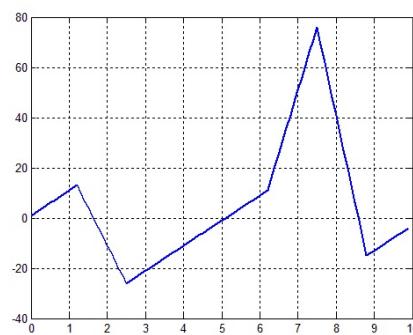


Рис. 9: Полигармонический сигнал

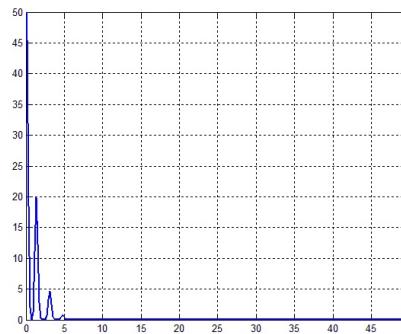


Рис. 10: Спектр полигармонического сигнала

В ходе моделирования сигналов в Simulink были собраны следующие схемы и получены соответствующие графики:

- Полигармонический сигнал (Рис. 11 - 13)
- Прямоугольный импульсный сигнал (Рис. 14 - 16)
- Треугольный импульсный сигнал (Рис. 17 - 19)

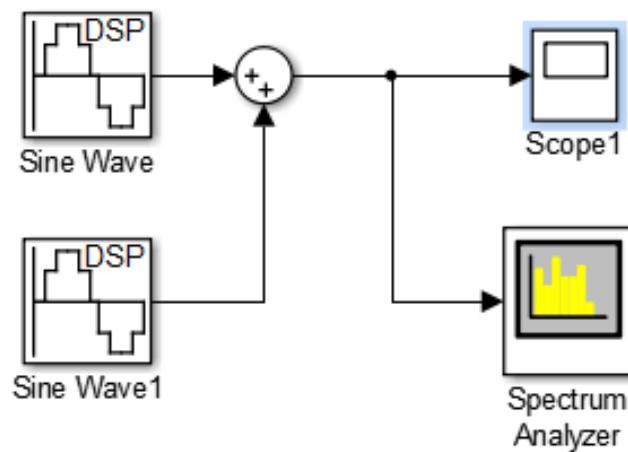


Рис. 11: Полигармонический сигнал (Simulink)

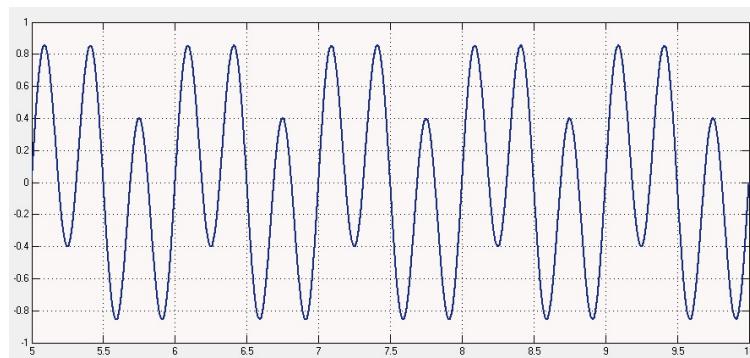


Рис. 12: Полигармонический сигнал

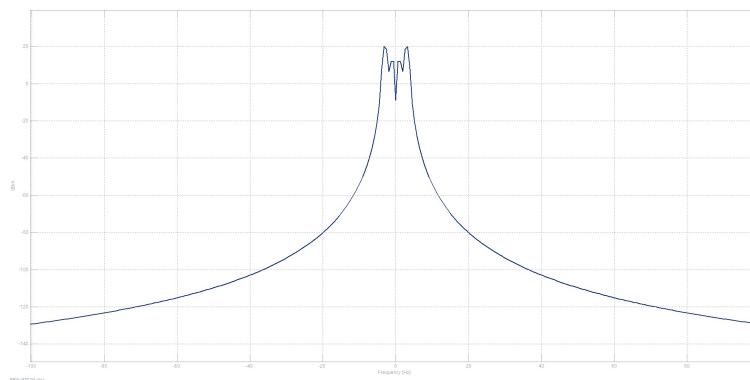


Рис. 13: Спектр полигармонического сигнала

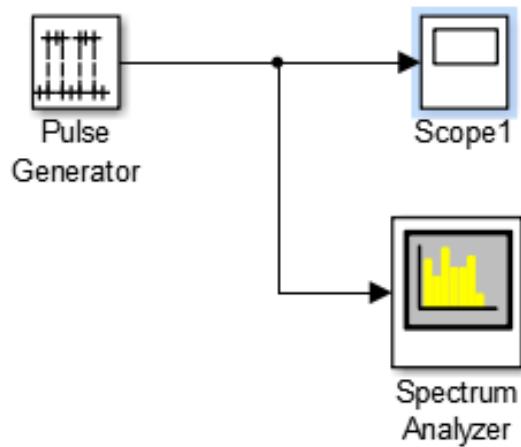


Рис. 14: Прямоугольный импульсный сигнал (Simulink)

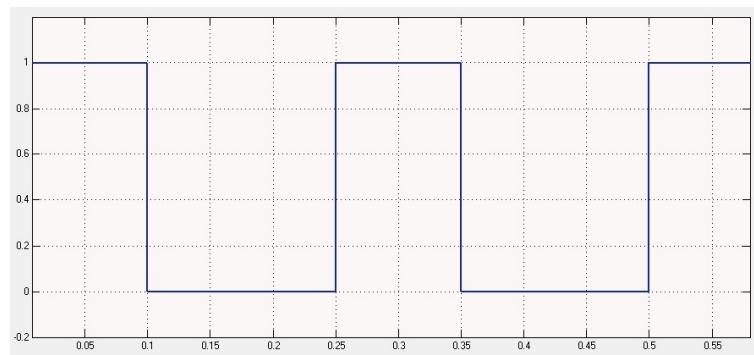


Рис. 15: Прямоугольный импульсный сигнал

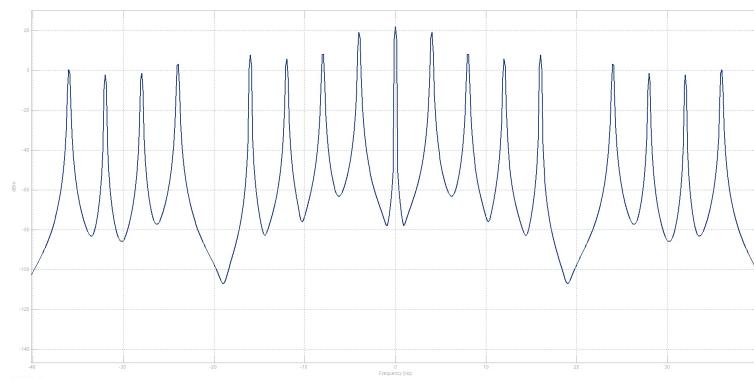


Рис. 16: Спектр прямоугольного сигнала

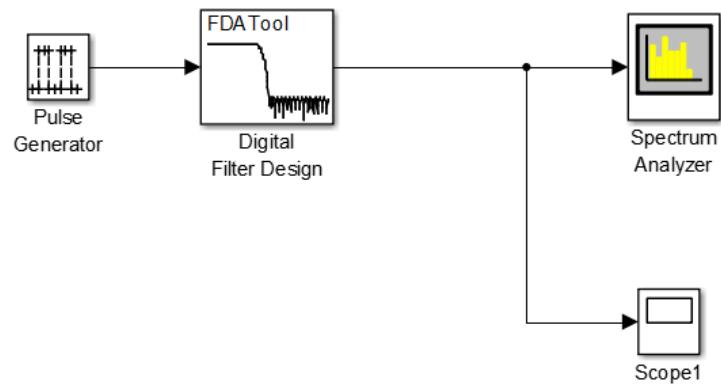


Рис. 17: Треугольный импульсный сигнал (Simulink)

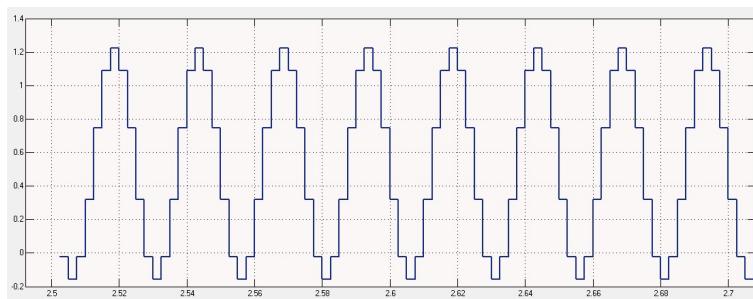


Рис. 18: Треугольный импульсный сигнал

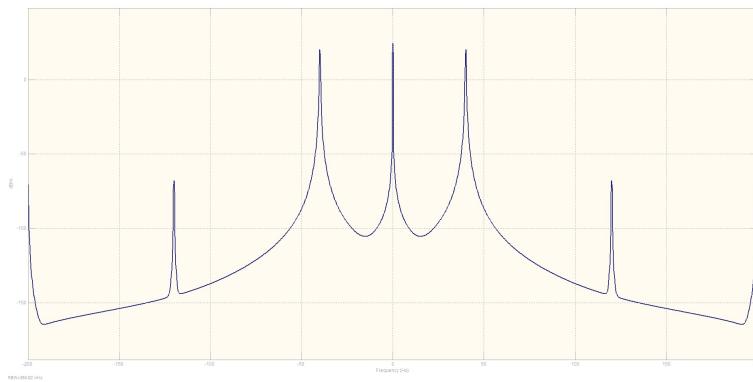


Рис. 19: Спектр треугольного сигнала

### **3.6 Выводы**

В результате проделанной работы было проведено моделирование в среде MatLAB и Simulink полигармонического, прямоугольного и треугольного импульсных сигналов, а также получены их спектры. В Simulink для получения генератора треугольного сигнала используется генератор прямоугольных импульсов каскадно с фильтром с прямоугольным окном. Это обосновуется тем, что свертка двух прямоугольных импульсов в результате дает треугольный.

## 4 Линейная фильтрация

### 4.1 Цель работы

Изучить воздействие ФНЧ на тестовый сигнал с шумом.

### 4.2 Постановка задачи

Сгенерировать гармонический сигнал с шумом и синтезировать ФНЧ. Получить сигнал во временной и частотной областях до и после фильтрации. Сделать выводы о воздействии ФНЧ на спектр сигнала.

### 4.3 Справочные материалы

В.С. Гутников. Фильтрация измерительных сигналовпп. 17-19

### 4.4 Ход работы

Фильтрация сигнала - изменение его спектра, которое обычно применяется с целью увеличить отношение полезного сигнала к шумам и помехам или усилить какие-нибудь полезные качества сигнала. В данной работе рассматривается фильтр нижних частот (ФНЧ), пропускающий низкочастотные составляющие спектра и задерживающий высокочастотные, а именно фильтр Баттервортса с максимально гладкой АЧХ. Для моделирования заданных сигналов использовался приведенный ниже код MATLAB:

```
x = 0:0.01:4*pi;
f = 100*(0:255)/512;
noise = rand(size(x));
y = sin(2*pi*x); % Сигнал без шума
y_noisy = y+0.3*noise; % Сигнал с шумом
figure
plot(x(1:200),y(1:200))
grid
figure
plot(x(1:200),y_noisy(1:200))
grid
[B,A] = butter(16,0.98); % Синтез ФНЧ Баттервортса
B = B./sum(B);
A = A./sum(A);
y_filtered = conv(y_noisy, [B, A]); % Обработка сигнала ФНЧ
figure
plot(x(1:200),y_filtered(1:200))
grid
noisy_spectrum = fft(y_noisy, 512); % Спектр сигнала с шумом
norm_noisy_spectrum = noisy_spectrum.*conj(noisy_spectrum)/512;
figure
plot(f, norm_noisy_spectrum(1:256))
axis([0 max(f) 0 2])
grid
filtered_spectrum = fft(y_filtered, 512); % Спектр фильтрованного сигнала
```

```

norm_filtered_spectrum = filtered_spectrum.*conj(filtered_spectrum)/512;
figure
plot(f, norm_filtered_spectrum(1:256))
axis([0 max(f) 0 2])
grid

```

#### 4.5 Результаты работы

В результате работы представленного кода были получены следующие данные:

- Исходный гармонический сигнал (Рис. 20);
- Сигнал с шумом и его спектр (Рис. 21 - 22);
- Отфильтрованный сигнал и его спектр (Рис. 23 - 24).

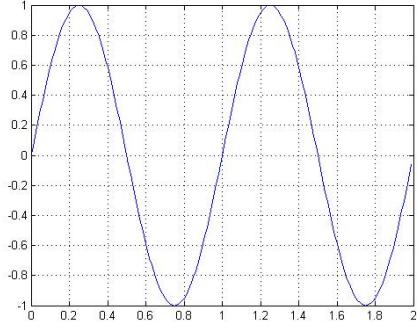


Рис. 20: Исходный гармонический сигнал

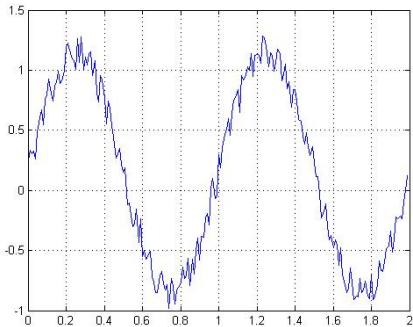


Рис. 21: Зашумленный гармониче-  
ский сигнал

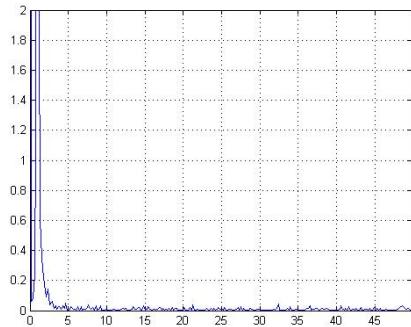


Рис. 22: Спектр зашумленного сигна-  
ла

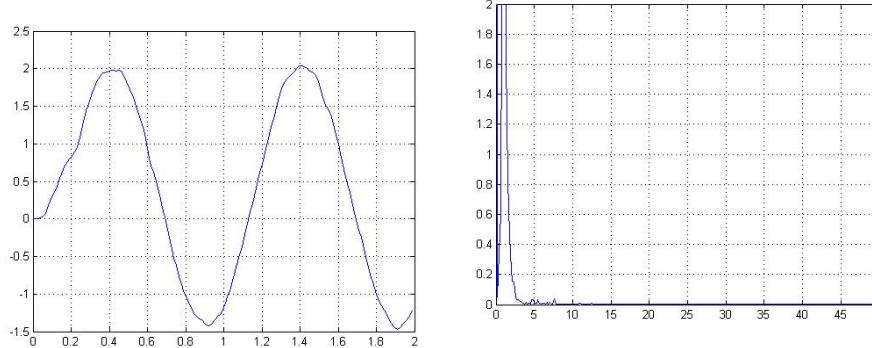


Рис. 23: Отфильтрованный сигнал

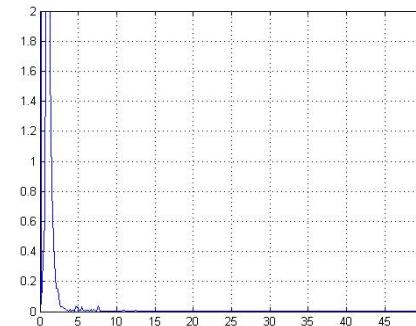


Рис. 24: Спектр отфильтрованного сигнала

Аналогичное моделирование было проведено в среде Simulink (построенный блок отображен на Рис. 25). В результате были получены характеристики, представленные на Рис. 26 - 27.

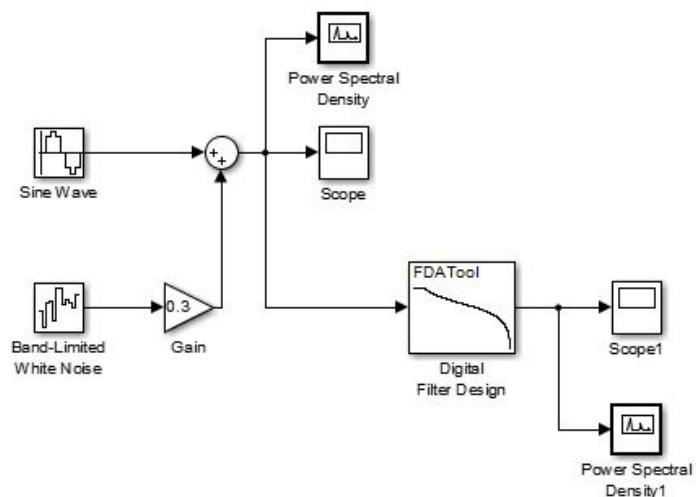


Рис. 25: Исходный гармонический сигнал

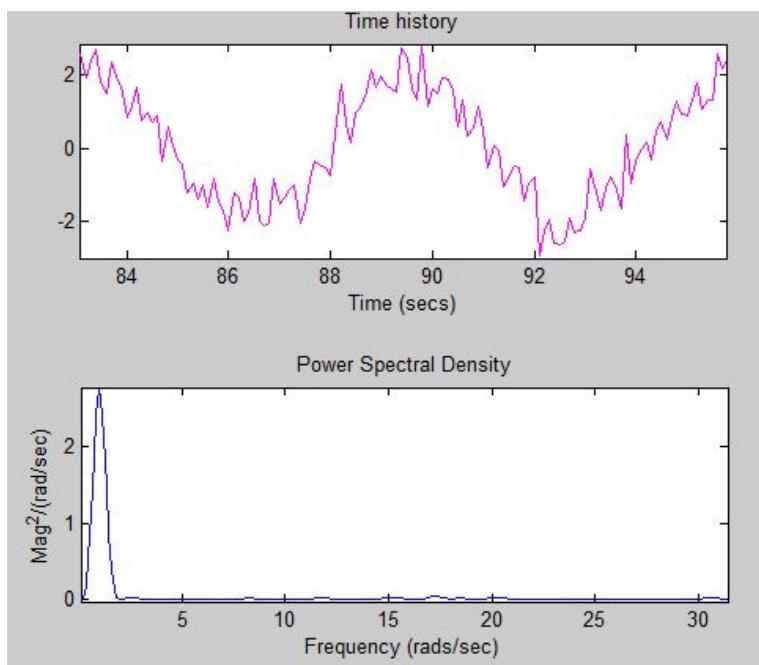


Рис. 26: Отфильтрованный сигнал

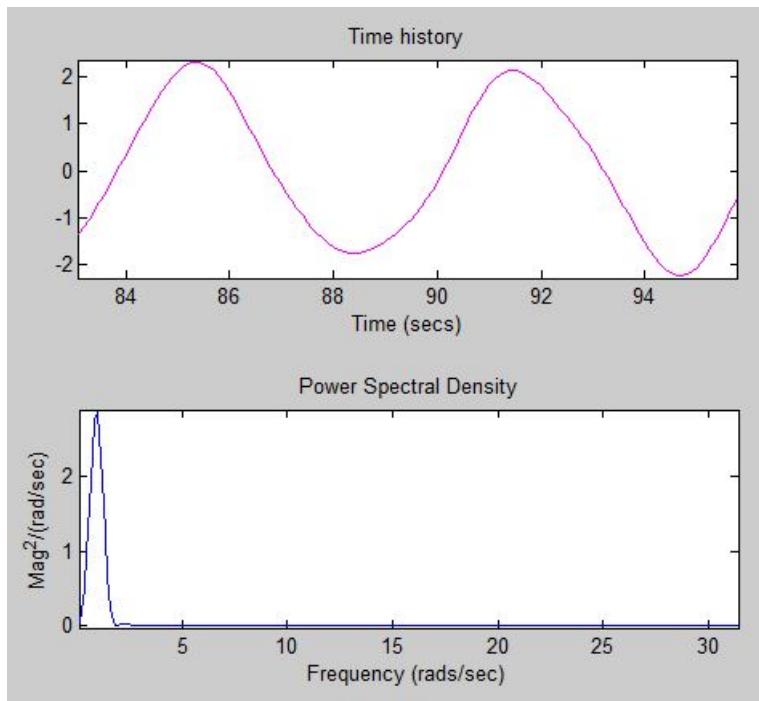


Рис. 27: Спектр отфильтрованного сигнала

## **4.6 Выводы**

В данной работе было изучено воздействие ФНЧ на тестовый сигнал с шумом, а именно произведено зашумление и удаление шума линейным фильтром Баттервортса. Однако фильтрация оказалась неполной. Это связано с тем, что использованный линейный фильтр не способен разделить шум и полезный сигнал в одной частотной области. Для полной фильтрации необходимо использовать идеальный фильтр с прямоугольным окном.

## 5 Аналоговая модуляция

### 5.1 Цель работы

Изучение аналоговой модуляции/демодуляции сигнала.

### 5.2 Постановка задачи

1. Сгенерировать однотональный сигнал низкой частоты.
2. Выполнить амплитудную модуляцию сигнала по закону

$$u(t) = (1 + MU_m \cos(\Omega t)) \cos(\omega_0 t + \phi_0). \quad (7)$$

3. Получить спектр модулированного сигнала.
4. Выполнить модуляцию с подавлением несущей

$$u(t) = MU_m \cos(\omega t) \cos(\omega_0 t + \phi_0). \quad (8)$$

Получить спектр.

5. Выполнить однополосную модуляцию:

$$u(t) = U_m \cos(\omega t) \cos(\omega_0 t + \phi_0) + \frac{U_m}{2} \sum_{n=1}^N M_n (\cos(\omega_0 + \Omega_n) t + \phi_0 + \Phi_n), \quad (9)$$

положив  $n = 1$ .

6. Выполнить синхронное детектирование и получить исходный однополосный сигнал.
7. Рассчитать КПД модуляции

$$\eta_A M = \frac{U_m^2 M^2 / 4}{P_U} = \frac{M^2}{M^2 + 2}. \quad (10)$$

### 5.3 Справочные материалы

Н.В. Богач и др. Обработка сигналов в информационных системах, с. 110-118, 125-127.

### 5.4 Ход работы

АМ - сигнал представляет собой произведение информационной огибающей  $u(t)$  и гармонического колебания ее заполнения с более высокими частотами. Простейшая форма модулированного сигнала создается при *однотональной* АМ - модуляции несущего сигнала гармоническим колебанием с одной частотой  $\Omega$ :

$$u(t) = (1 + MU_m \cos(\Omega t)) \cos(\omega_0 t + \phi_0). \quad (11)$$

Реализация аналоговой модуляции с помощью MATLAB:

```

x = 0:0.01:4*pi;
f0 = 0.2;
% Исходный сигнал
y = sin(2*pi*f0*x);
figure
plot(x(1:500),y(1:500), 'LineWidth', 2)
grid
% Спектр исходного сигнала
spectrum = fft(y, 512);
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
f = 100*(0:255)/512;
figure
plot(f, norm_spectrum(1:256), 'LineWidth', 2)
axis([0 max(f) 0 40])
grid
% Амплитудная модуляция
Fc = 5*f0;
Fs = 50*f0;
U = ammod(y, Fc, Fs, 0, 1);
figure
plot(x(1:500), U(1:500))
grid
% Спектр модурированного сигнала
u_spectrum = fft(U, 512);
norm_u_spectrum = u_spectrum.*conj(u_spectrum)/512;
figure
plot(f, norm_u_spectrum(1:256))
axis([0 max(f) 0 30])
grid

```

В результате выполнения приведенного кода были получены следующие характеристики:

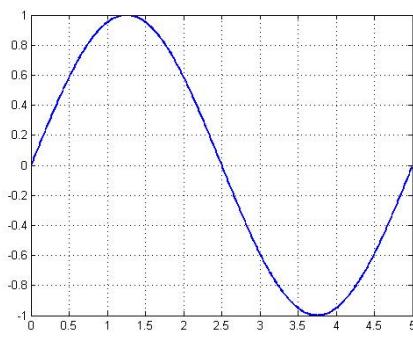


Рис. 28: Исходный гармонический сигнал

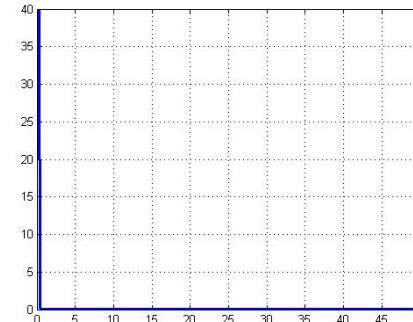


Рис. 29: Спектр исходного сигнала

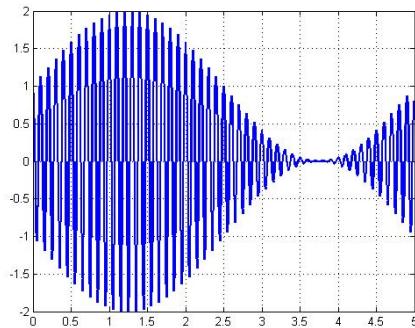


Рис. 30: Модуляция с  $M = 1$

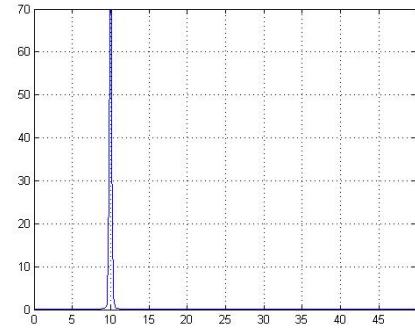


Рис. 31: Спектр АМ-сигнала ( $M = 1$ )

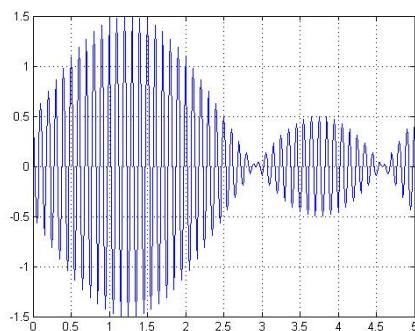


Рис. 32: Модуляция с  $M = 2$

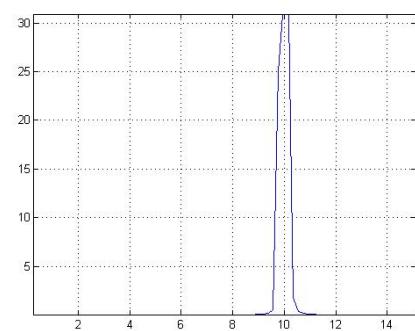


Рис. 33: Спектр АМ-сигнала ( $M = 2$ )

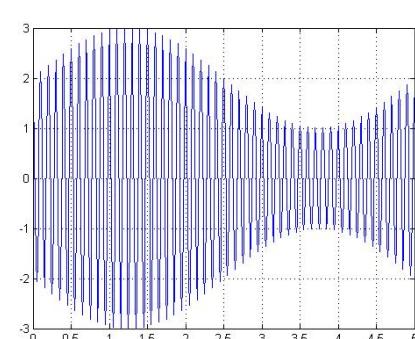


Рис. 34: Модуляция с  $M = 0.5$

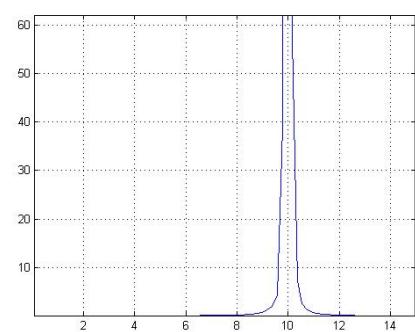


Рис. 35: Спектр АМ-сигнала ( $M = 0.5$ )

При балансной модуляции (АМ с подавлением несущей) производится перемножение двух сигналов - модулирующего и несущего, при котором происходит подавление несущего колебания, соответственно, КПД модуляции становится равным 100%. Физическая сущность подавления несущей заключается в том, что при переходе огибающей биений  $U(t)$  через 0 фаза несущей частоты высокочастотного заполнения изменяется на  $180^\circ$ .

Реализация аналоговой модуляции с подавлением несущей с помощью MATLAB:

```
% Амплитудная модуляция с подавлением несущей
Fc = 10*f0;
Fs = 100*f0;
U = ammod(y, Fc, Fs);
figure
plot(x(1:500), U(1:500), 'LineWidth', 2)
grid
% Спектр модурированного сигнала
u_spectrum = fft(U, 512); norm_u_spectrum =
u_spectrum.*conj(u_spectrum)/512;
figure
plot(f, norm_u_spectrum(1:256))
axis([0 max(f) 0 30])
grid
```

В результате выполнения приведенного кода были получены следующие характеристики:

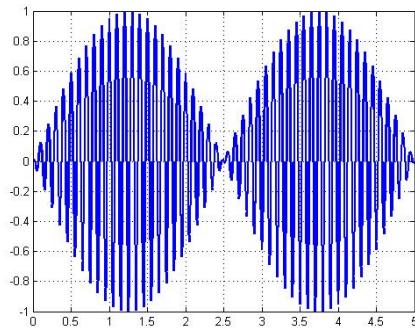


Рис. 36: АМ-сигнал с подавлением несущей

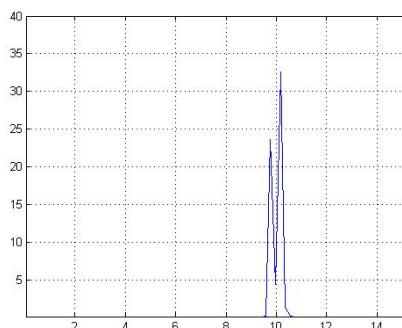


Рис. 37: Спектр АМ-сигнала с подавлением

Спектры двух боковых полос АМ-сигнала являются зеркальным отражением друг друга, т.е. они несут одну и ту же информацию. Поэтому одну из боковых полос можно удалить.

Для этого был использован следующий код MATLAB:

```
% Однополосная амплитудная модуляция
Fc = 10*f0;
Fs = 100*f0;
```

```

U = ssbmod(y, Fc, Fs, [], 'upper');
figure
plot(x(1:500), U(1:500), 'LineWidth', 2)
grid
% Спектр модурированного сигнала
u_spectrum = fft(U, 512); norm_u_spectrum =
u_spectrum.*conj(u_spectrum)/512;
figure
plot(f, norm_u_spectrum(1:256))
axis([0 max(f) 0 30])
grid

```

В результате выполнения приведенного кода были получены следующие графики:

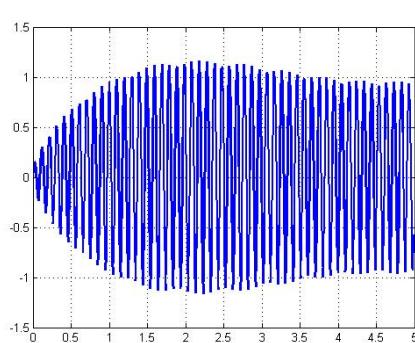


Рис. 38: Однополосный АМ-сигнал

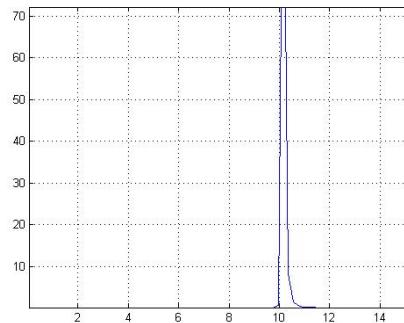


Рис. 39: Спектр однополосного АМ-сигнала

Синхронное детектирование является одним из способов демодуляции АМ-сигнала. Его суть состоит в умножении частоты сигнала на опорное колебание с несущей частотой. Результат умножения содержит два слагаемых: искомая амплитуда и АМ-сигнал с несущей частотой  $2\omega_0$ , который легко удаляется путем пропускания сигнала через ФНЧ.

Ниже приведен реализующий синхронное детектирование код MATLAB:

```

% Синхронное детектирование
z = ssbdemod(U, Fc, Fs, 0, b, a);
figure
plot(x(1:1000), z(1:1000))
grid
% Спектр демодулированного сигнала
du_spectrum = fft(U, 512);
norm_du_spectrum = du_spectrum.*conj(du_spectrum)/512;
figure
plot(f, norm_du_spectrum(1:256))
axis([0 max(f) 0 70])
grid

```

В результате синхронного дететириования демодулированный сигнал полностью совпал с исходным сигналом:

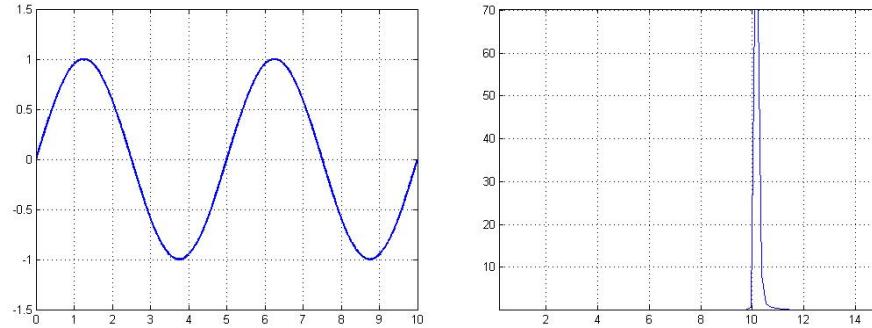


Рис. 40: Демодулированный АМ-сигнал Рис. 41: Спектр демодулированного сигнала

В ходе работы был рассчитан КПД модуляции при различных значениях глубины М:

- M = 1: 0.33;
- M = 2: 0.67;
- M = 0.5: 0.11.

#### Однополосная модуляция/демодуляция в среде Simulink

Для моделирования амплитудной однополосной модуляции и демодуляции использовались блоки SSB AM Modulator/Demodulator Passband. Результаты моделирования приведены на Рис. 42-45:

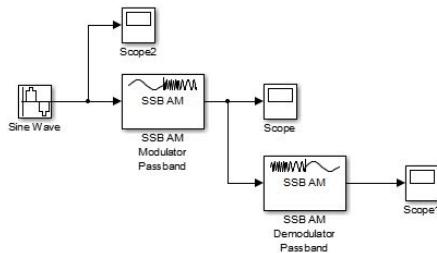


Рис. 42: Схема однополосной модуляции/демодуляции

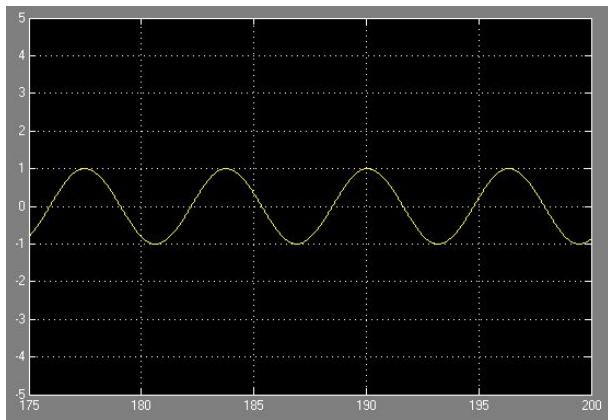


Рис. 43: Исходный сигнал

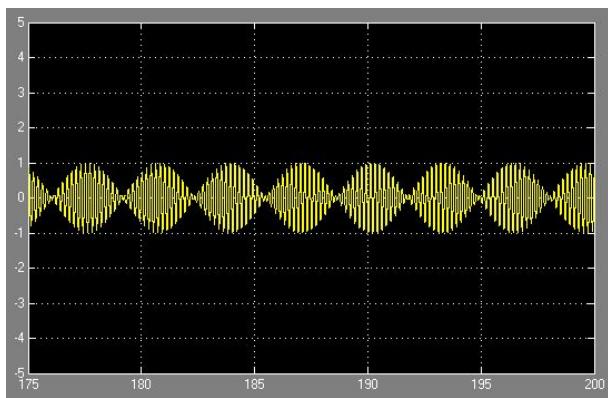


Рис. 44: АМ-сигнал

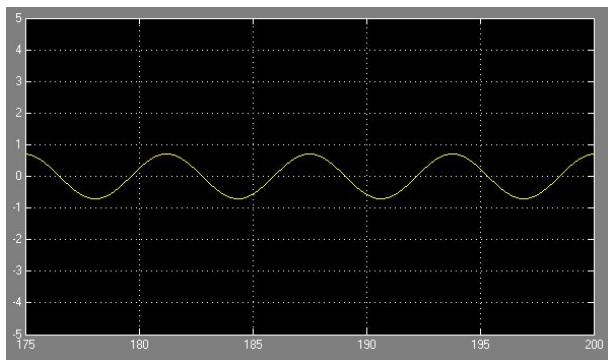


Рис. 45: Демодулированный АМ-сигнал

Для моделирования балансной однополосной модуляции и демодуляции использовались блоки DSBSC AM Modulator/Demodulaor Passband. Исходный сигнал тот же (Рис. 43). Результаты моделирования приведены на Рис. 46-48:

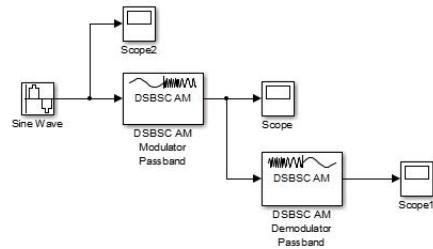


Рис. 46: Схема балансной модуляции/демодуляции

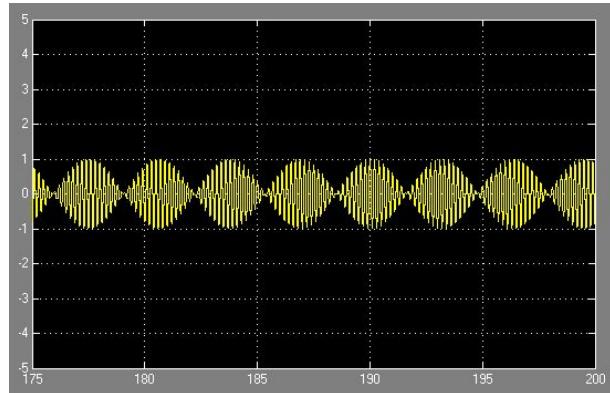


Рис. 47: БАМ-сигнал

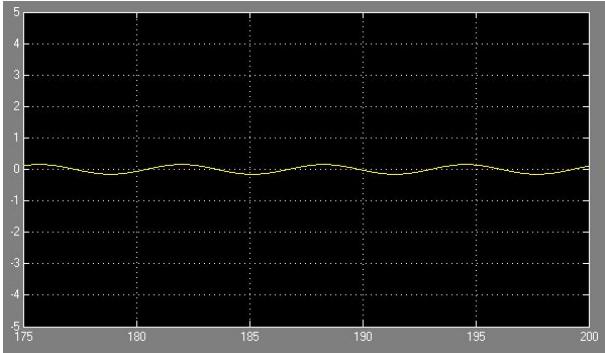


Рис. 48: Демодулированный БАМ-сигнал

## 5.5 Выводы

В ходе выполнения лабораторной работы был сгенерирован однотональный сигнал низкой частоты, выполнена АМ сигнала и получен спектр модулированного сигнала. Также была выполнена БАМ и однополосная АМ и получены их спектры. Произведено синхронное детектирование и получен исходный однополосный сигнал. Рассчитан КПД модуляции.

АМ применяется на сравнительно низких частотах (не выше коротких волн). Это обусловлено низким КПД использования энергии модулированных сигналов.

Ширина спектра АМ-сигнала с подавленной несущей, как в случае с обычной АМ, в два раза больше, чем у модулирующего сигнала. Но при БАМ производится перемножение двух сигналов – модулирующего и несущего, при котором происходит подавление несущего колебания, соответственно, КПД модуляции становится равным 100%.

Двухполосная АМ с подавленной несущей имеет приемущества перед обычной АМ только в энергетическом плане – за счет устранения несущего колебания, ширина спектра при этом по-прежнему вдвое больше, чем у модулирующего сигнала. Однако спектры двух боковых полос АМ-сигнала являются зеркальным отражением друг друга, поэтому одну из боковых полос можно удалить.

Однополосный сигнал можно представить как сумму двух АМ-сигналов, несущие колебания которых имеют одну и ту же частоту, но сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$ .

Синхронное детектирование является одним из способов демодуляции АМ-сигнала. Его суть состоит в умножении частоты сигнала на опорное колебание с несущей частотой. Результат умножения содержит два слагаемых: искомая амплитуда и АМ-сигнал с несущей частотой  $2\omega_0$ , который легко удаляется путем пропускания сигнала через ФНЧ. В нашем случае использовался фильтр Баттервортта.

## 6 Частотная и фазовая модуляция

### 6.1 Цель работы

Изучение частотной и фазовой модуляции/демодуляции сигнала.

### 6.2 Постановка задачи

1. Сгенерировать однотональный сигнал низкой частоты.
2. Выполнить фазовую модуляцию/демодуляцию сигнала по закону

$$u(t) = U_m \cos(\Omega t + ks(t)), \quad (12)$$

используя встроенную функцию MatLab pmmod, pmdemod.

3. Получить спектр модулированного сигнала.
4. Выполнить частотную модуляцию/демодуляцию по закону

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + k \int_0^t s(t) dt + \phi_0), \quad (13)$$

используя встроенные функции MatLab fmmod, fmdemod.

### 6.3 Справочные материалы

Н.В. Богач и др. Обработка сигналов в информационных системах, с. 118-125, 127-133.

### 6.4 Ход работы

Фазовая модуляция – процесс изменения мгновенной фазы несущего колебания пропорционально изменению непрерывного информационного сигнала. Фазомодулированный сигнал  $s(t)$  имеет следующий вид:

$$s(t) = g(t) \sin[2\pi f_c t + \varphi(t)], \quad (14)$$

где  $g(t)$  – огибающая сигнала;  $\varphi(t)$  является модулирующим сигналом;  $f_c$  – частота несущего сигнала;  $t$  – время. В случае, когда информационный сигнал является дискретным, то говорят о фазовой манипуляции.

По характеристикам фазовая модуляция близка к частотной модуляции. В случае синусоидального модулирующего (информационного) сигнала, результаты частотной и фазовой модуляции совпадают.

Реализация фазовой модуляции/демодуляции с помощью MATLAB:

```
% Исходный сигнал
x = 0:0.01:4*pi;
y = sin(2*pi*x);

figure
subplot(4, 1, 1);
plot(x(1:500), y(1:500))
```

```

grid
title('Исходный сигнал')

% Фазовая модуляция
Fs = 1000; % Частота дискретизации
Fc = 4; % Несущая частота
phasedev = pi/2; % Девиация фазы для фазовой модуляции
pm_y = pmmod(x,Fc,Fs,phasedev); % Фазовая модуляция
subplot(4, 1, 2);
plot(x(1:500), pm_y(1:500))
grid
title('Фазовая модуляция')

spectrum = fft(pm_y, 512); % Спектр фазовой модуляции
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
f = 100*(0:255)/512;
subplot(4, 1, 3);
plot(f, norm_spectrum(1:256))
grid
title('Спектр фазовой модуляции')
axis([min(f) max(f) 0 max(norm_spectrum)]);

pdm_y = pmdemod(pm_y,Fc,Fs,phasedev); % Демодуляция
subplot(4, 1, 4);
plot(x, pdm_y)
grid
title('Фазовая демодуляция')

```

В результате выполнения приведенного кода были получены следующие характеристики:

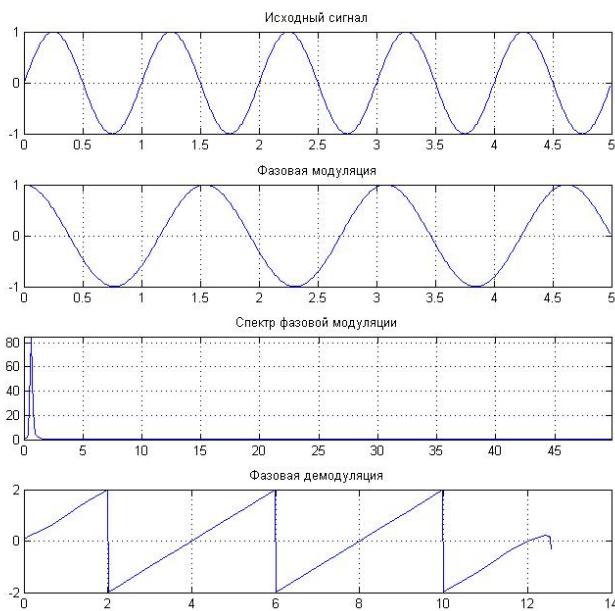


Рис. 49: Результаты фазовой модуляции/демодуляции

Частотная модуляция – процесс изменения мгновенной частоты несущего колебания в соответствии с изменением информационного сигнала. По сравнению с амплитудной модуляцией здесь амплитуда остаётся постоянной.

Реализация частотной модуляции/демодуляции с помощью MATLAB:

```
% Исходный сигнал
x = 0:0.01:4*pi;
y = sin(2*pi*x);

figure
subplot(4, 1, 1);
plot(x(1:500), y(1:500))
grid
title('Исходный сигнал')

% Частотная модуляция
freqdev = 20; % Девиация частоты для частотной модуляции
fm_y = fmmod(x,Fc,Fs,freqdev); % Частотная модуляция
subplot(4, 1, 2);
plot(x(1:500), fm_y(1:500))
grid
title('Частотная модуляция')
spectrum = fft(fm_y, 512); % Спектр частотной модуляции
norm_spectrum = spectrum.*conj(spectrum)/512;
```

```

f = 100*(0:255)/512;
subplot(4, 1, 3);
plot(f, norm_spectrum(1:256))
grid
title('Спектр частотной модуляции')
axis([min(f) max(f) 0 max(norm_spectrum)]);
fdm_y = fmdemod(fm_y,Fc,Fs,freqdev); % Демодуляция
subplot(4, 1, 4);
plot(x, fdm_y)
grid
title('Частотная демодуляция')

```

В результате выполнения приведенного кода были получены следующие характеристики:

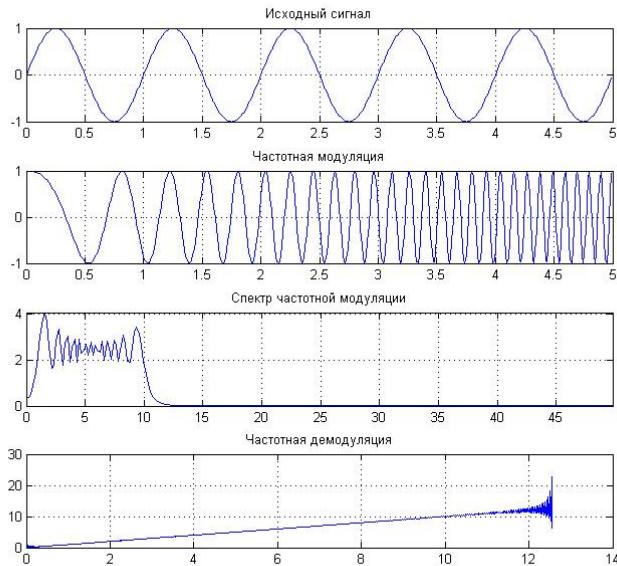


Рис. 50: Результаты частотной модуляции/демодуляции

Для создания содели в Simulinc использовался раздел Communication Blockset Simulink. Выполнена модуляция, в том числе с помощью блока захваты фазы Phase-Locked Loop.

Для моделирования использовался исходный сигнал, представленный на Рис. 51.

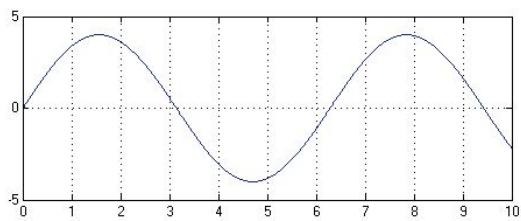


Рис. 51: Исходный сигнал

Фазовая модуляция/демодуляция в Simulink:

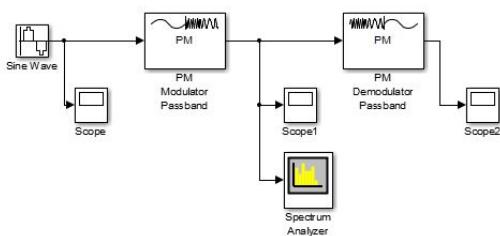


Рис. 52: Фазовая модуляция/демодуляция

В результате были получены следующие характеристики:

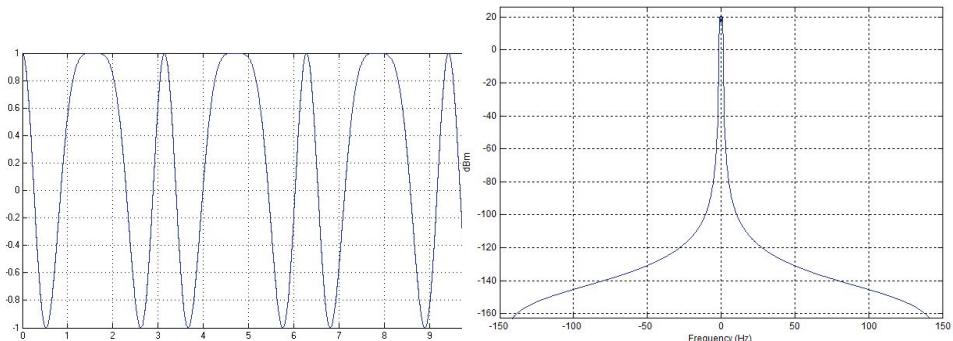


Рис. 53: ФМ-сигнал

Рис. 54: Спектр ФМ-сигнала

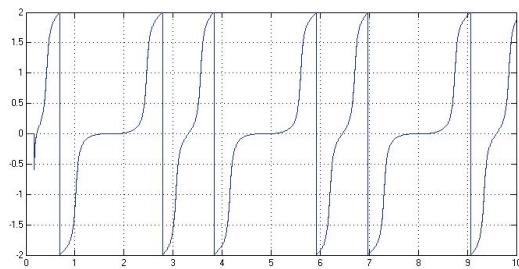


Рис. 55: Демодулированный ФМ-сигнал

## 6.5 Выводы

Частотная модуляция/демодуляция в Simulink:

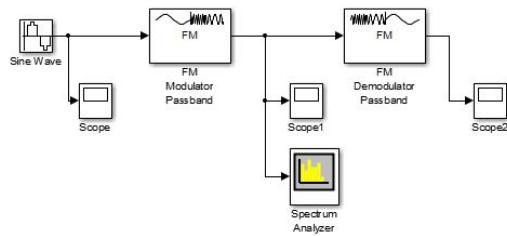


Рис. 56: Частотная модуляция/демодуляция

В результате были получены следующие характеристики:

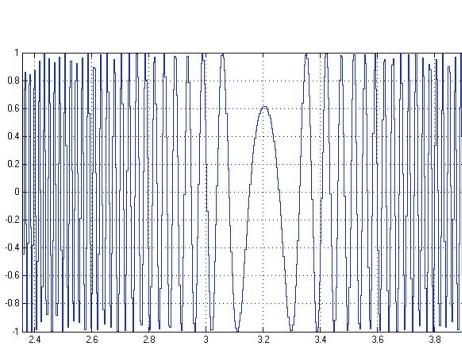


Рис. 57: ЧМ-сигнал

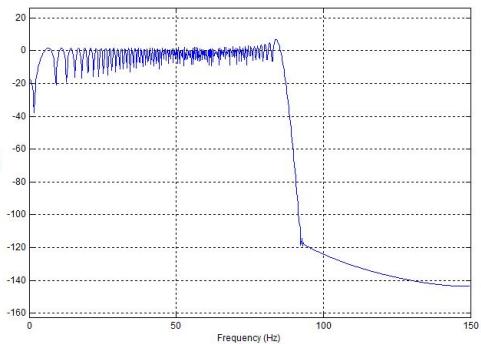


Рис. 58: Спектр ЧМ-сигнала

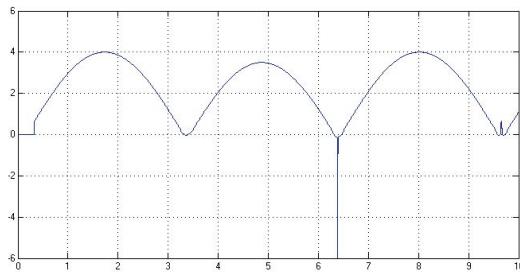


Рис. 59: Думодулированный ЧМ-сигнал

Фазовая автоподстройка частоты — система автоматического регулирования, подстраивающая фазу управляемого генератора так, чтобы она была равна фазе опорного сигнала, либо отличалась на известную функцию от времени. Регулировка осуществляется благодаря наличию отрицательной обратной связи. Выходной сигнал управляемого генератора сравнивается на фазовом детекторе с опорным сигналом, результат сравнения используется для подстройки управляемого генератора.

Система ФАПЧ используется для частотной модуляции и демодуляции, умножения и преобразования частоты, частотной фильтрации, выделения опорного колебания для когерентного детектирования и в других целях.

ФАПЧ сравнивает фазы входного и опорного сигналов и выводит сигнал ошибки, соответствующий разности между этими фазами. Сигнал ошибки проходит далее через фильтр низких частот и используется в качестве управляющего для генератора, управляемого напряжением (ГУН), обеспечивающего отрицательную обратную связь. Если выходная частота отклоняется от опорной, то сигнал ошибки увеличивается, воздействуя на ГУН в сторону уменьшения ошибки. В состоянии равновесия выходной сигнал фиксируется на частоте опорного.

Также в схеме ФАПЧ включен фазовый детектор, который сравнивает фазы двух входных сигналов. Обычно, один из них генерируется генератором сигнала, управляемым напряжением, а второй берется из внешнего источника. ФД имеет два входа, управляющих стоящей за ним схемой подстройки частоты, задача которой сделать фазы сигналов одинаковыми.

Для ФАПЧ сигнал ошибки из ФД (значение найденной разности фаз) подается на сглаживающий фильтр (фильтр низких частот). Сигнал с фильтра подается на управляемый напряжением генератор, частота(фаза) выходного сигнала которого зависит от напряжения на входе. Сигнал с генератора по цепи обратной связи поступает назад в детектор, замыкая контур ФАПЧ.

Частотная модуляция/демодуляция с фазовой автоподстройкой частоты в Simulink:

В результате были получены следующие характеристики:

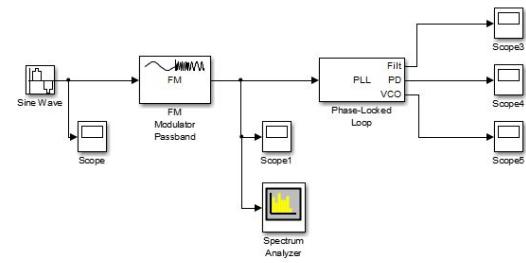


Рис. 60: Частотная модуляция/демодуляция

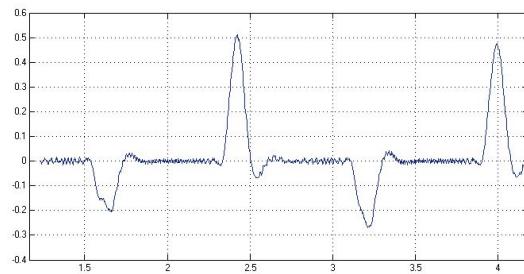


Рис. 61: Выход фильтра

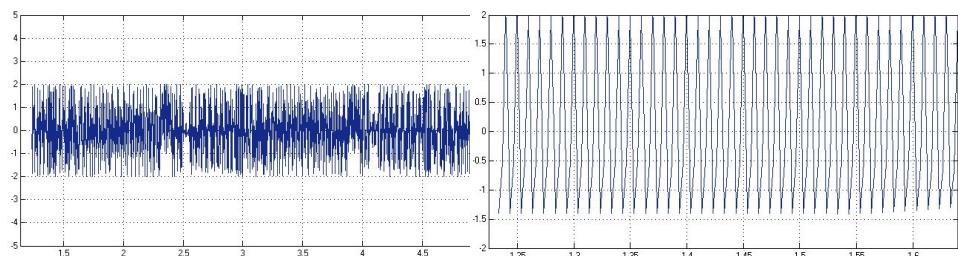


Рис. 62: Выход фазового детектора

Рис. 63: Выход ГУН

## 6.6 Выводы

В результате выполнения данной работы были выполнены частотная и фазовая модуляция/демодуляция, а также частотная демодуляция с помощью блока захвата фазы. Можно сделать вывод, что частотная и фазовая модуляция очень тесно взаимосвязаны, поскольку обе они влияют на аргумент функции  $\cos$ . Поэтому эти два вида модуляции имеют общее название — угловая модуляция. Сигнал с угловой модуляцией имеет вид колебания, начальная фаза которого зависит от времени:

$$s(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + j(t)). \quad (15)$$

Различие между фазовой и частотной модуляцией заключается лишь в том, как именно начальная фаза  $j(t)$  связана с модулирующим сигналом.

Для демодуляции использовалась петля ФАПЧ, состоящая из перемножителя (используемого в качестве фазового детектора), фильтра нижних частот и генератора, управляемого напряжением (ГУН). Получаемый на выходе петли ФАПЧ сигнал пропорционален отклонению мгновенной частоты модулированного сигнала от несущей частоты, поэтому при демодуляции ФМ этот сигнал можно дополнительном проинтегрировать, чтобы получить начальную фазу сигнала.

## 7 Цифровая модуляция

### 7.1 Цель работы

Изучение методов модуляции цифровых сигналов.

### 7.2 Постановка задачи

1. Получить сигналы BPSK, PSK, OQPSK, genQAM, MSK, M-FSK модуляторов.
2. Построить их сигнальные созвездия.
3. Провести сравнение изученных методов модуляции цифровых сигналов.

### 7.3 Справочные материалы

Н.В. Богач и др. Обработка сигналов в информационных системах, с. 137-141.

### 7.4 Ход работы

Цифровая модуляция и демодуляция включают в себя две стадии. При модуляции цифровое сообщение сначала преобразуется в аналоговый модулирующий сигнал с помощью функции modmap, а затем осуществляется аналоговая модуляция. При демодуляции сначала получается аналоговый демодулированный сигнал, а затем он преобразуется в цифровое сообщение с помощью функции demodmap.

Аналоговый несущий сигнал модулируется цифровым битовым потоком. Существуют три фундаментальных типа цифровой модуляции (или шифтинга) и один гибридный:

1. ASK – Amplitude shift keying (Амплитудная двоичная модуляция).
2. FSK – Frequency shift keying (Частотная двоичная модуляция).
3. PSK – Phase shift keying (Фазовая двоичная модуляция).
4. ASK/PSK.

Одна из частных реализаций схемы ASK/PSK, которая называется QAM - Quadrature Amplitude Modulation (квадратурная амплитудная модуляция (КАМ)). Это метод объединения двух АМ-сигналов в одном канале. Он позволяет удвоить эффективную пропускную способность. В QAM используется две несущих с одинаковой частотой но с разницей в фазе на четверть периода (отсюда и возникает слово квадратура). Частотная модуляция представляет логическую единицу интервалом с большей частотой, чем ноль. Фазовый шифтинг представляет «0» как сигнал без сдвига, а «1» как сигнал со сдвигом.

BPSK : используется единственный сдвиг фазы между «0» и «1» — 180 градусов, половина периода. Существуют также QPSK: QPSK использует 4

различных сдвига фазы (по четверти периода) и может кодировать 2 бита в символе (01, 11, 00, 10).

Реализация различных типов модуляций с помощью MATLAB:

```
%BPSK modulation
h = modem.pskmod('M', 2);
g = modem.pskdemod('M', 2);
msg = randint(10,1,2);
modSignal = modulate(h,msg);
errSignal = (randerr(1,10, 3) ./ 30)';
modSignal = modSignal + errSignal;
demodSignal = demodulate(g,modSignal);
figure
subplot(3, 1, 1)
plot(1:10, msg(1:10))
title('Сообщение')
subplot(3, 1, 2)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Модулированный сигнал')
subplot(3, 1, 3)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Демодулированный сигнал')
scatterplot(modSignal);
```

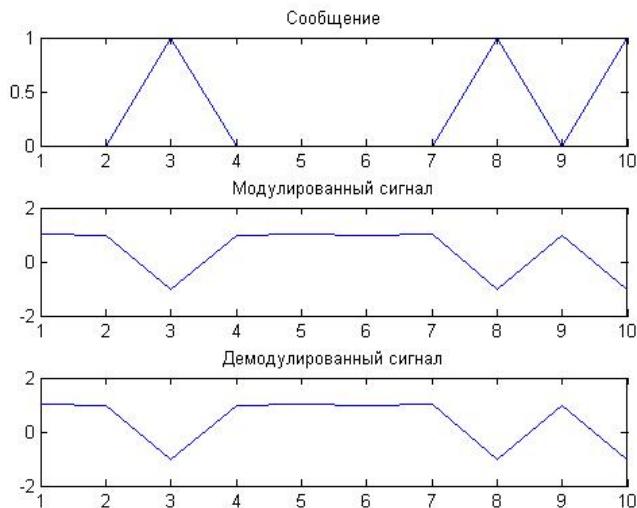


Рис. 64: BPSK

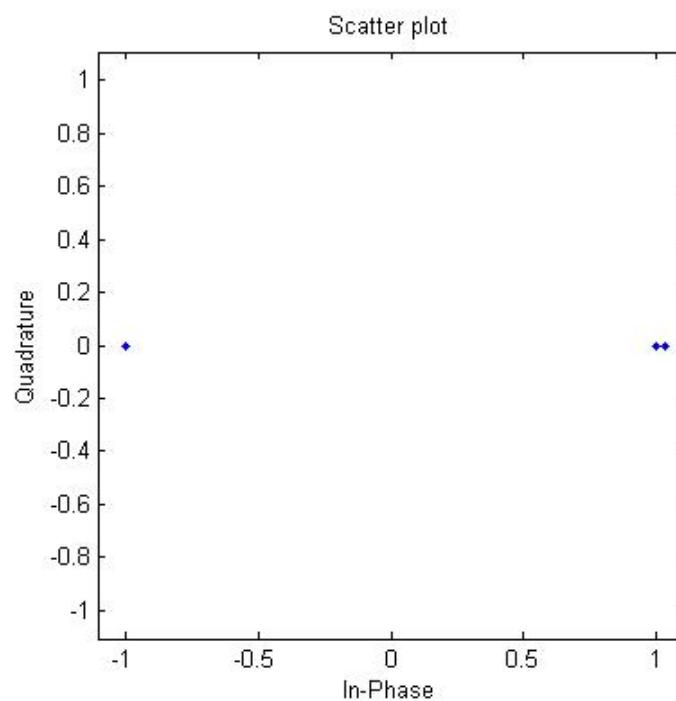


Рис. 65: Сигнальное созвездие BPSK

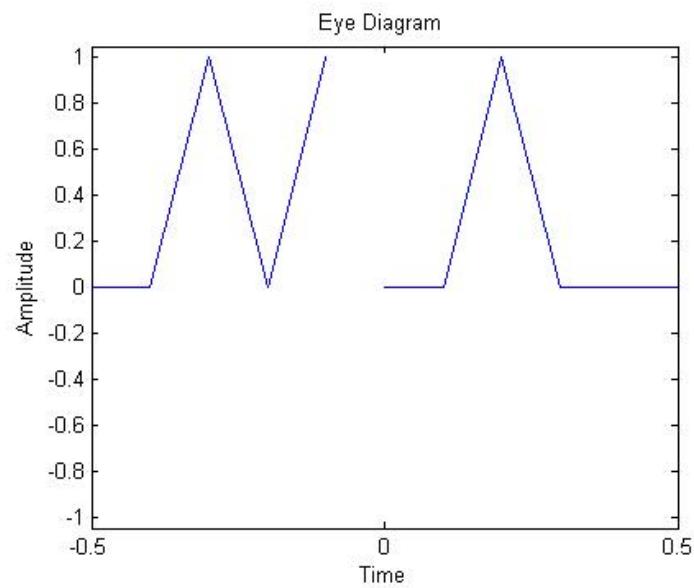


Рис. 66: Глазковая диаграмма BPSK

```
%PSK modulation
h = modem.pskmod('M', 8);
g = modem.pskdemod('M', 8);
msg = randint(10,1,8);
modSignal = modulate(h,msg);
errSignal = (randerr(1,10, 3) ./ 30)';
modSignal = modSignal + errSignal;
demodSignal = demodulate(g,modSignal);
figure
subplot(3, 1, 1)
plot(1:10, msg(1:10))
title('Сообщение')
subplot(3, 1, 2)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Модулированный сигнал')
subplot(3, 1, 3)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Демодулированный сигнал')
scatterplot(modSignal);
```

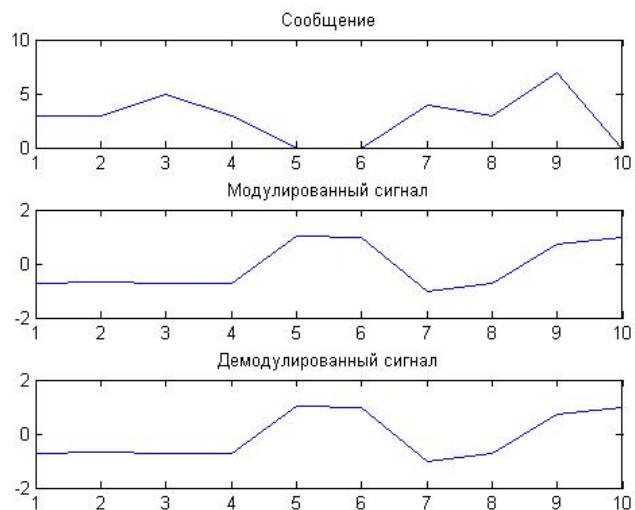


Рис. 67: PSK

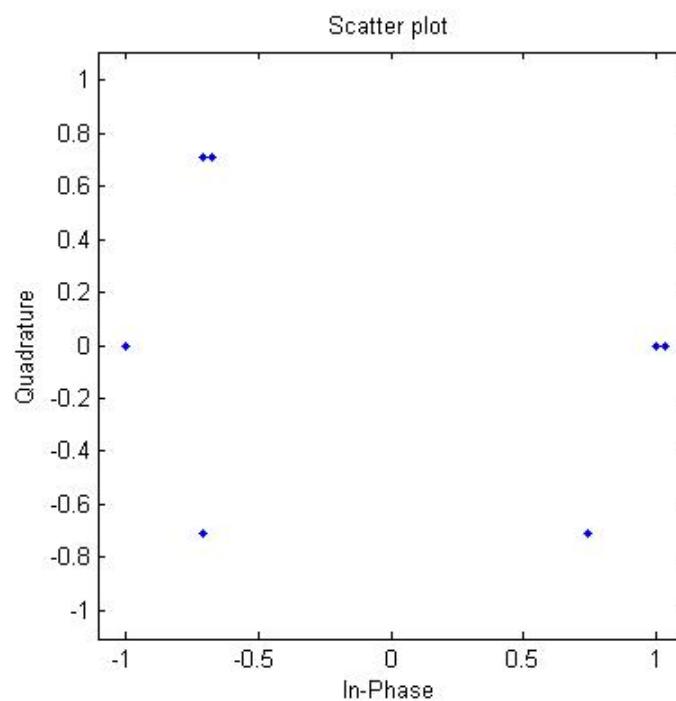


Рис. 68: Сигнальное созвездие PSK

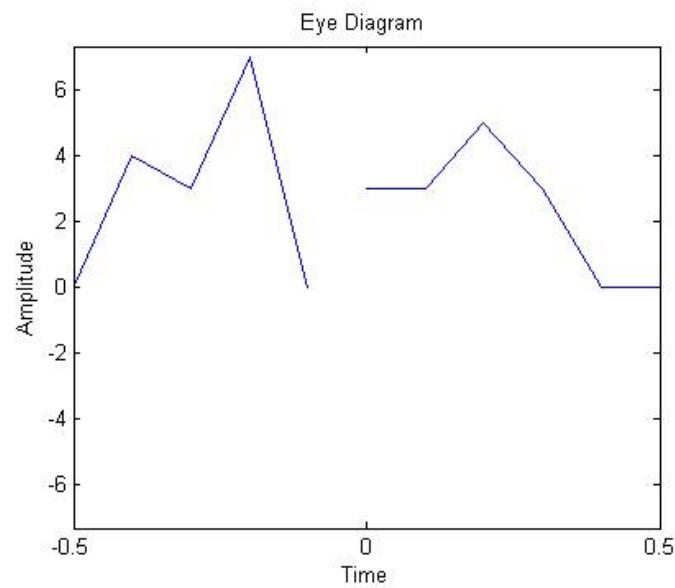


Рис. 69: Глазковая диаграмма PSK

```
%OQPSK modulation
h = modem.oqpskmod;
g = modem.oqpskdemod;
msg = randint(200,1,4);
modSignal = modulate(h,msg);
errSignal = (randerr(1,400, 100) ./ 30)';
modSignal = modSignal + errSignal;
demodSignal = demodulate(g,modSignal);
figure
subplot(3, 1, 1)
plot(1:200, msg(1:200))
title('Сообщение')
subplot(3, 1, 2)
plot(1:200, modSignal(1:200))
title('Модулированный сигнал')
subplot(3, 1, 3)
plot(1:200, modSignal(1:200))
title('Демодулированный сигнал')
scatterplot(modSignal);
```

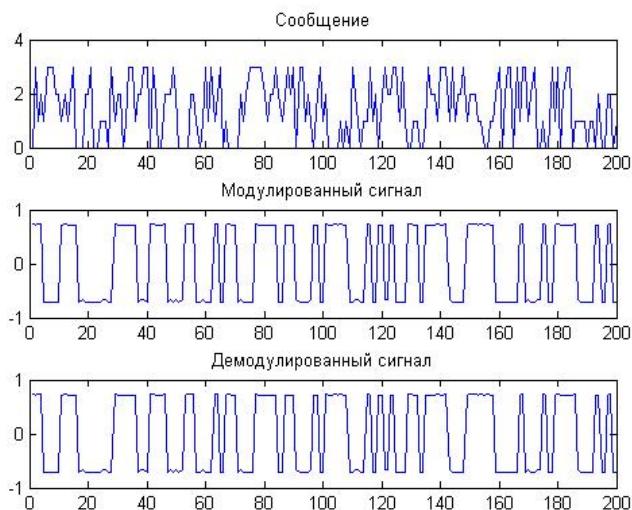


Рис. 70: OQPSK

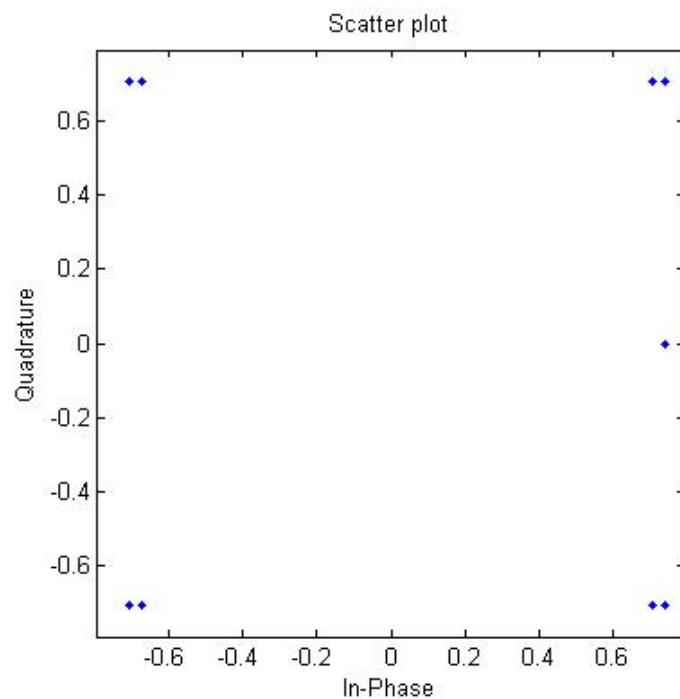


Рис. 71: Сигнальное созвездие OQPSK

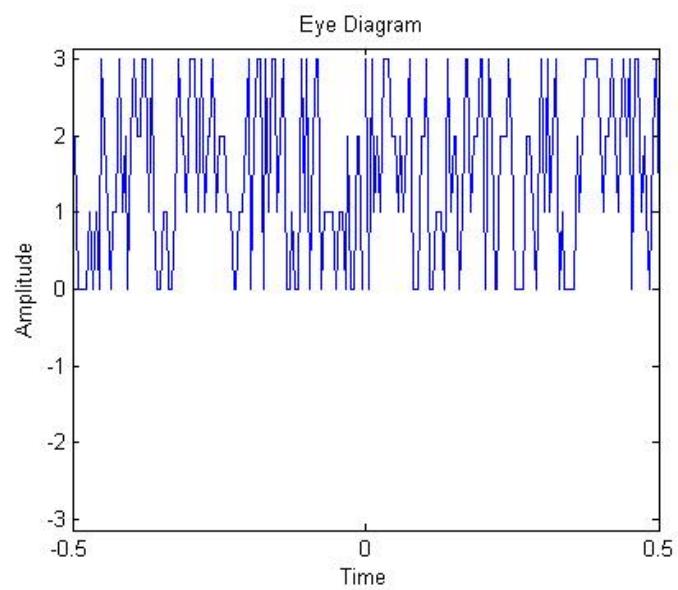


Рис. 72: Глазковая диаграмма OQPSK

```
%GENQAM modulation
M = 10;
h = modem.genqammod('Constellation', exp(j*2*pi*[0:M-1]/M));
g = modem.genqamdemod('Constellation', exp(j*2*pi*[0:M-1]/M));
msg = randint(10,1,8);
modSignal = modulate(h,msg);
errSignal = (randerr(1,10, 3) ./ 30)';
modSignal = modSignal + errSignal;
demodSignal = demodulate(g,modSignal);
subplot(3, 1, 1)
plot(1:10, msg(1:10))
title('Сообщение')
subplot(3, 1, 2)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Модулированный сигнал')
subplot(3, 1, 3)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Демодулированный сигнал')
scatterplot(modSignal);
```

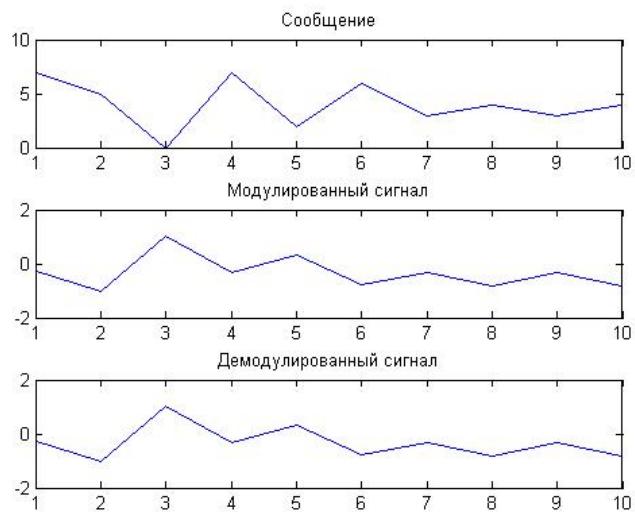


Рис. 73: genQAM

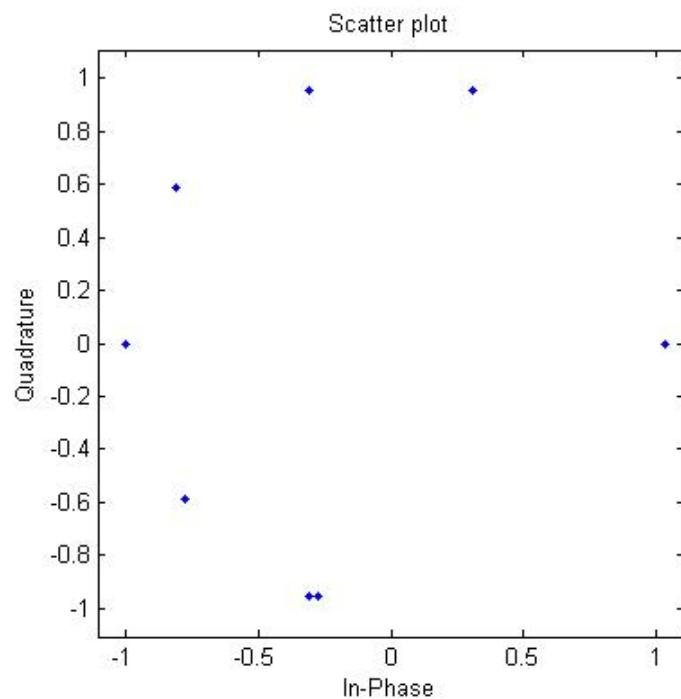


Рис. 74: Сигнальное созвездие genQAM

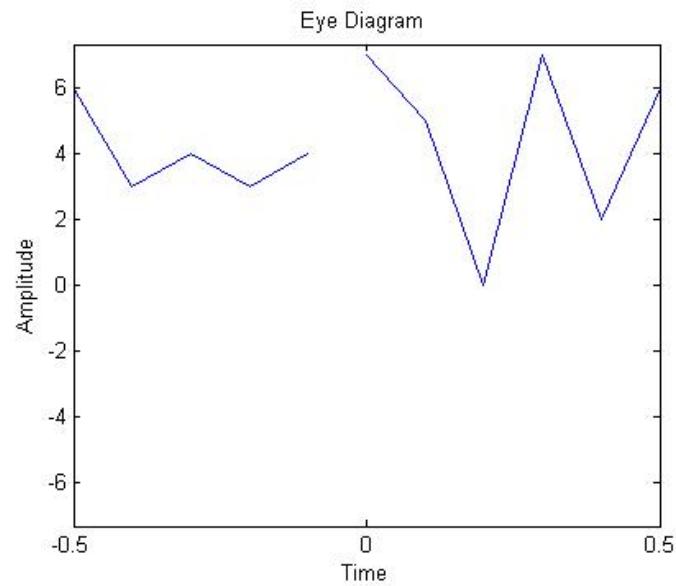


Рис. 75: Глазковая диаграмма genQAM

```
%MSK modulation
h = modem.mskmod('SamplesPerSymbol', 10);
g = modem.mskdemod('SamplesPerSymbol', 10);
msg = randint(10,1,2);
modSignal = modulate(h, msg);
errSignal = (randerr(1,100, 3) ./ 30)';
modSignal = modSignal + errSignal;
demodSignal = demodulate(g, modSignal);
subplot(3, 1, 1)
plot(1:10, msg(1:10))
title('Сообщение')
subplot(3, 1, 2)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Модулированный сигнал')
subplot(3, 1, 3)
plot(1:10, modSignal(1:10))
title('Демодулированный сигнал')
scatterplot(modSignal);
```

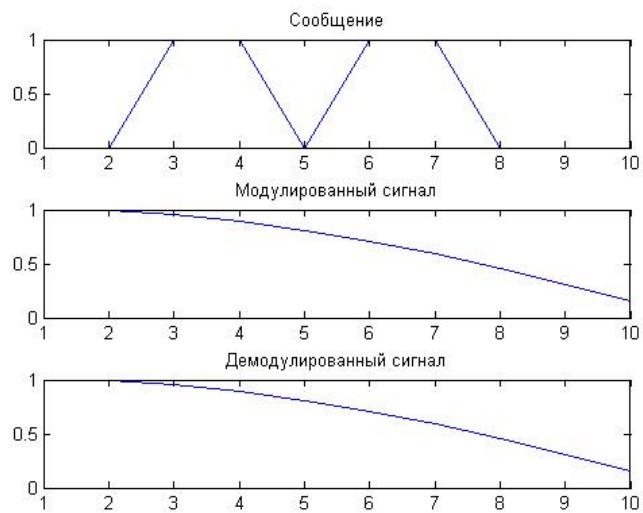


Рис. 76: MSK

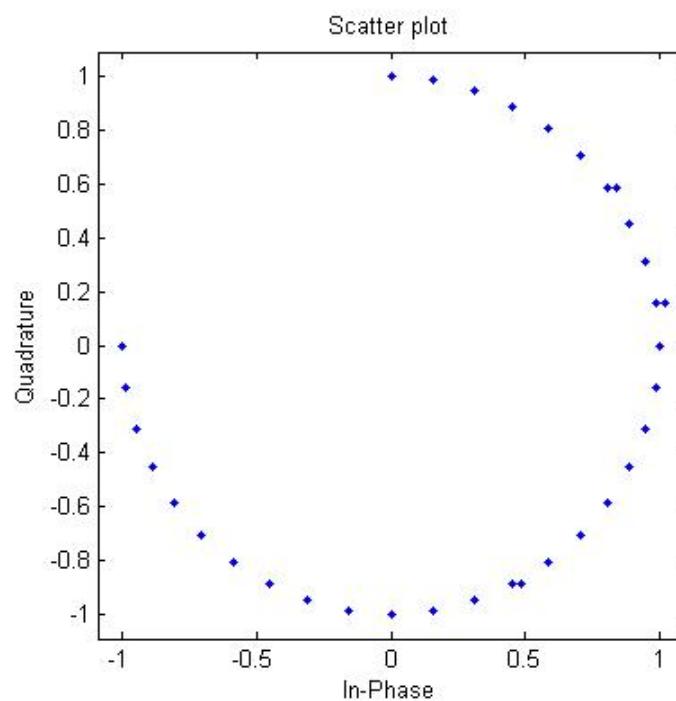


Рис. 77: Сигнальное созвездие MSK

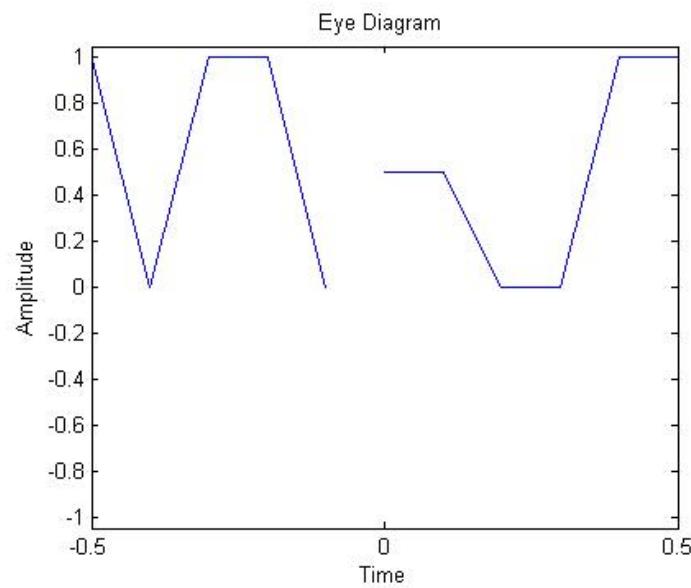


Рис. 78: Глазковая диаграмма MSK

Создания моделей в Simulink.

Для создания моделей в Simulink использовался раздел Communication Blockset/Digital Baseband/Passband Modulation.

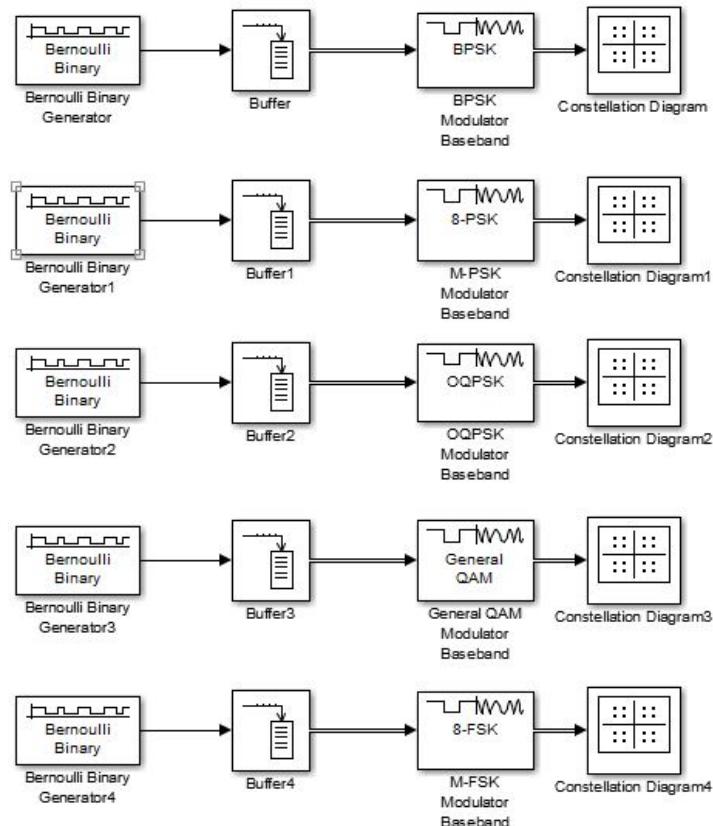


Рис. 79: Модель в Simulink

В результате были получены следующие характеристики:

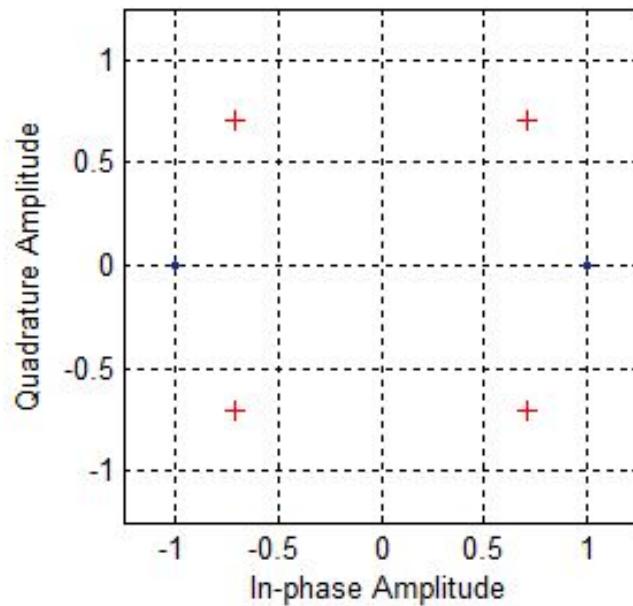


Рис. 80: BPSK

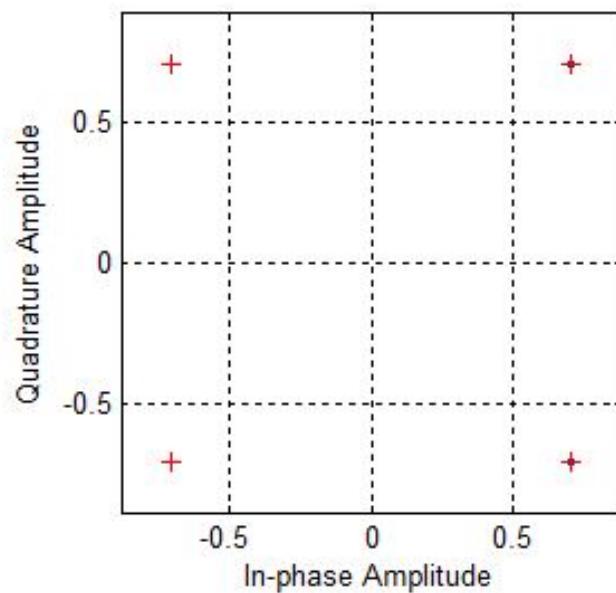


Рис. 81: PSK

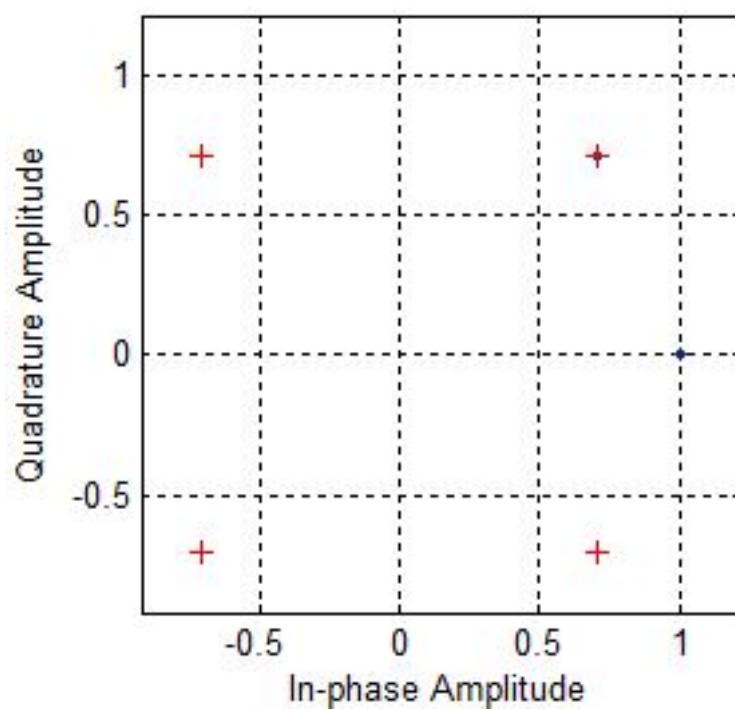


Рис. 82: OQPSK

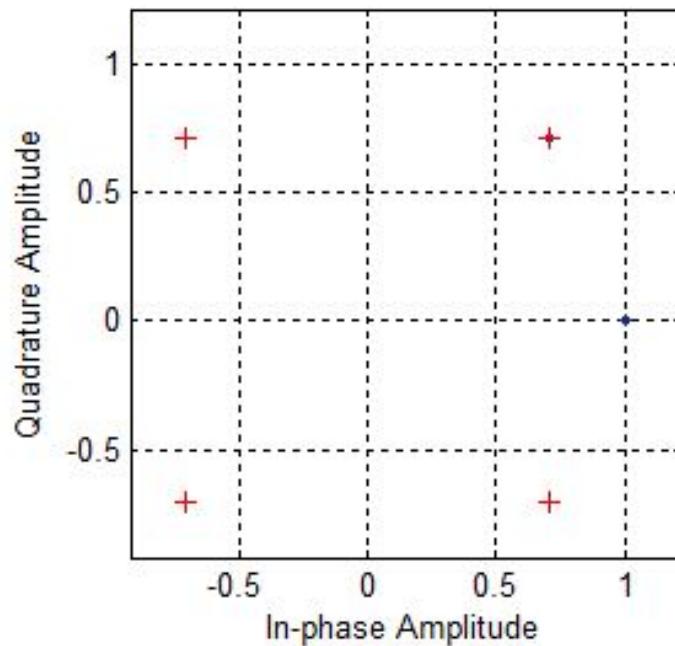


Рис. 83: genQAM

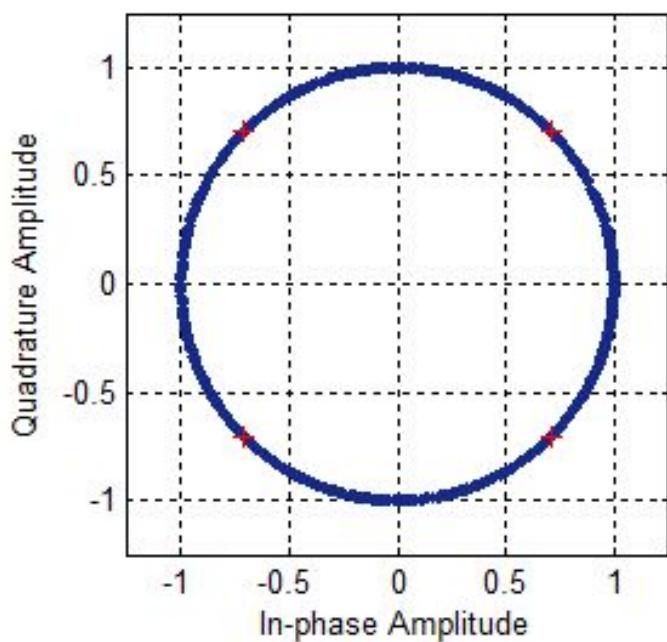


Рис. 84: M-FSK

## **7.5 Выводы**

В ходе выполнения данной работы были получены сигналы BPSK, PSK, OQPSK, genQAM, MSK, M-FSK модуляторов, построены их сигнальные созвездия и глазковые диаграммы, проведено их сравнение, по результатам которого можно сделать вывод, что чем выше уровень модуляции, тем большими скоростными возможностями и меньшей помехоустойчивостью она обладает и чем выше уровень модуляции, тем больше данных мы можем передать за единицу времени. А благодаря сигнальным созвездиям можно произвести оценку ошибки фазы и амплитуды анализируемого сигнала.