

Документ подписан простой электронной подписью  
 Информация о владельце:  
 ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
 Должность: проректор по учебной работе  
 Дата подписания: 30.04.2018  
 Уникальный программный ключ:  
 0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf75a745d14a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
 Учреждение высшего образования  
 «Юго-Западный государственный университет»  
 (ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



## ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ СИГНАЛОВ В СРЕДЕ MATLAB

Методические указания  
 по выполнению лабораторной работы  
 для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы  
 связи»  
 по курсу «Цифровая обработка сигналов»

Курск 2018

УДК 621.391.26 (076)

Составители: А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, К.О. Михайлов,  
В.С. Ерошевич, И. И. Фефелов

Рецензент

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры *В.Г. Андронов*

**Принципы создания моделей сигналов в среде MATLAB:**  
методические указания по выполнению лабораторной работы /  
Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин,  
К.О. Михайлов, И.И. Фефелов - Курск, 2017.- 21 с.: ил.13, табл. 1 –  
Библиогр.: с. 21.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат краткие теоретические сведения о принципах моделирования в среде математического моделирования MATLAB, задания для выполнения работы, а также вопросы для самоконтроля.

Полученные знания в результате выполнения работы дадут возможность сформировать начальные представления о среде MATLAB, а также освоить навыки создания моделей сигналов, подверженных воздействию шума, и представляют собой фундаментальные понятия, необходимые для изучения остальных дисциплин профессионального цикла учебного плана.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 очной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 1,22 . Уч.-изд. 1,1 Л. Тираж 100 экз. Заказ Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## 1 Цели работы

- Знакомство с программой MATLAB, ее операционной средой, стандартной библиотекой блоков.
- Приобретение навыков создания графических интерфейсов в среде математического моделирования MATLAB, составления моделей сигналов, а также приобретение опыта работы с комплексными данными и средствами визуализации данных.
- Приобретение навыков моделирования флюктуирующих сигналов и аддитивных помех.

## 2 Краткие теоретические сведения

### 2.1 Работа в среде MATLAB

Интегрированную среду разработки MATLAB можно запустить с помощью значка, созданного при ее установке на рабочем столе.

Запуск MATLAB вызывает появление главного окна.

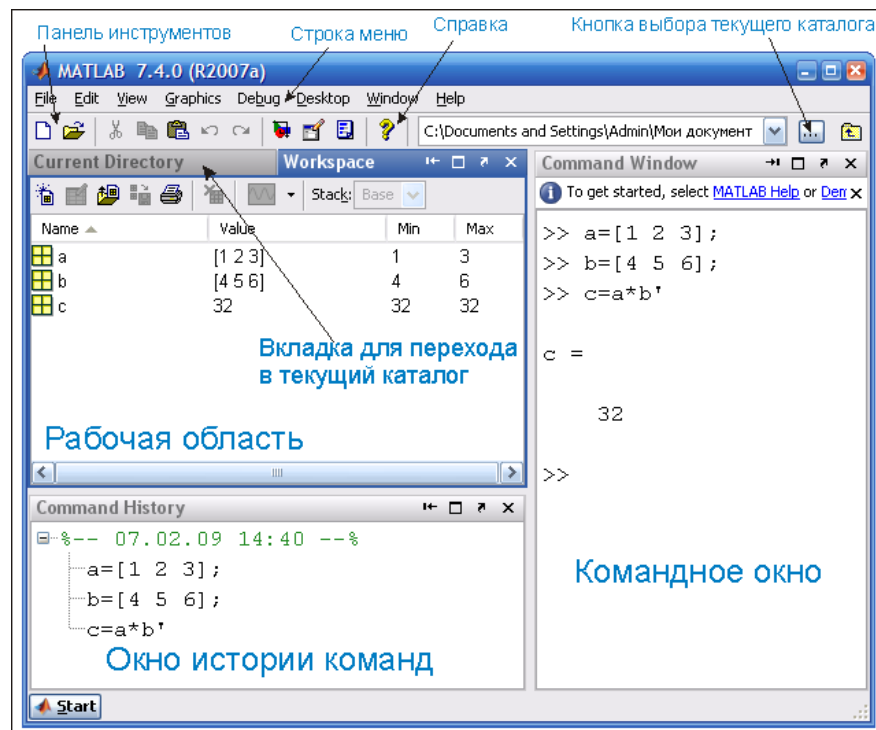


Рис. 1 – Главное окно MATLAB

Рабочий стол имеет следующие панели:

- Current Folder (Текущая папка) или Current Directory (Текущий каталог) – эта панель позволяет получить доступ к папкам и файлам проекта.

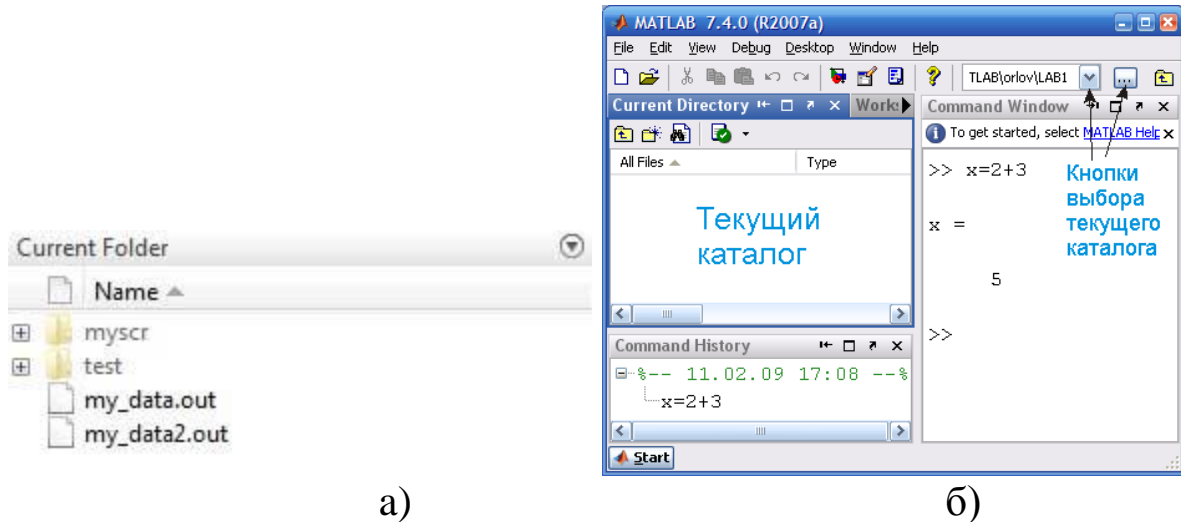


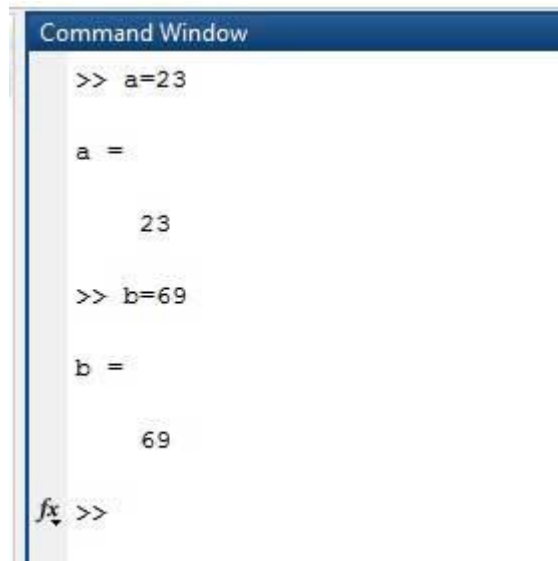
Рис.2 – Текущая папка а), текущий каталог б)

Данное окно является аналогом программы Проводник, но имеет для MATLAB свое особое предназначение (рис. 2). Дело в том, что, кроме работы с математическими выражениями из командного окна, пользователь также может работать с файлами. К тому же используемые математические функции физически представляют собой файлы, названные по именам функций. В этих файлах записаны программы, реализующие функции. Таким образом, пользователь постоянно использует файлы. Например, указывая встроенную функцию, фактически пишется имя файла (без расширения), в котором хранится текст программы. Система выполняет поиск таких файлов в первую очередь в текущем каталоге.

- Command Window (Окно команд) является для пользователя наиболее важным. Посредством этого окна (рис. 3) вводятся математические выражения, получаются результаты вычислений, а также выдаются сообщения, посылаемые системой.

Математические выражения пишутся в командной строке после знака приглашения `>>`. Каждая команда в командном окне обрабатывается немедленно после нажатия клавиши ENTER, при

этом значения выходных параметров выводятся в то же командное окно, а для рисунков открываются графические окна.

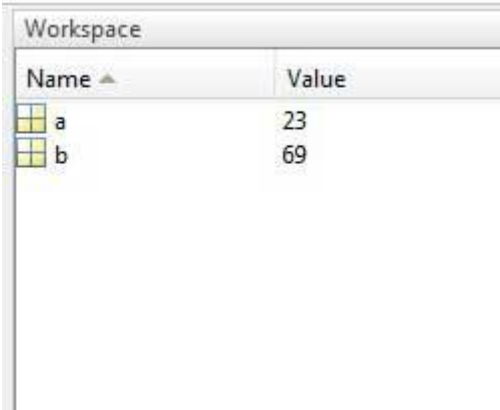


```
Command Window
>> a=23
a =
    23
>> b=69
b =
    69
fx >>
```

Рис.3 – Командная строка

- Workspace (Рабочая область) (рис. 4) – предоставляет пользователю список всех переменных, хранящихся в рабочем пространстве.

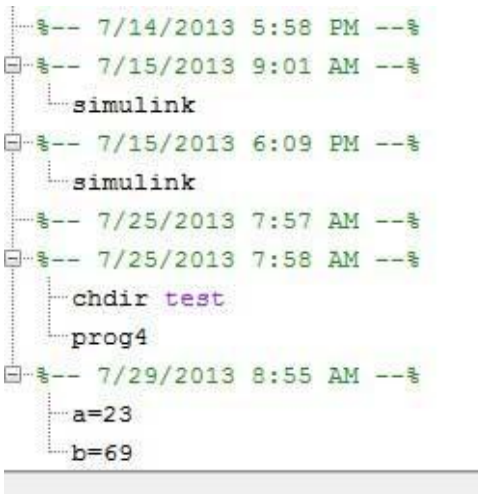
В процессе работы используются переменные различных типов. Созданные переменные хранятся в специально отведенной области памяти компьютера. Они не исчезают сами по себе, а только при выходе из программы или с помощью специальных команд. При этом переменные (точнее их значения) можно использовать в любом вводимом математическом выражении. Выбрать можно любую переменную, просмотреть ее содержимое или выполнить какие-либо другие действия. Упомянутые действия выполняются посредством контекстного меню (нужно щелкнуть правой кнопкой мыши по имени переменной в списке).



Workspace	
Name ▲	Value
a	23
b	69

Рис.4 – Рабочая область

- Command History (История команд) – эта панель отображает или команды, которые необходимо повторить при вводе в командной строке.



```

-- 7/14/2013 5:58 PM --
-- 7/15/2013 9:01 AM --
  simulink
-- 7/15/2013 6:09 PM --
  simulink
-- 7/25/2013 7:57 AM --
-- 7/25/2013 7:58 AM --
  chdir test
  prog4
-- 7/29/2013 8:55 AM --
  a=23
  b=69

```

Рис.5 – Окно истории команд

Все команды, которые набираются в командной строке окна команд, автоматически образуют список, который и выводится в окне истории (Рис. 5). При необходимости повторить ранее выполненную команду, ее можно отыскать в списке данного окна и, дважды щелкнув по ней левой кнопкой мыши, выполнить. Содержимое данного окна не теряется после выхода из системы и выключения компьютера.

## 2.2 Модели сигналов

### 2.2.1 Виды исследуемых сигналов

В среде MATLAB сигнал задаётся в виде вектора, сопоставленного с вектором моментов времени. Перед вводом модели сигнала нужно указать частоту дискретизации и сформировать вектор-столбец моментов времени.

Рассмотрим некоторые из возможных сигналов.

Прямоугольный импульс.

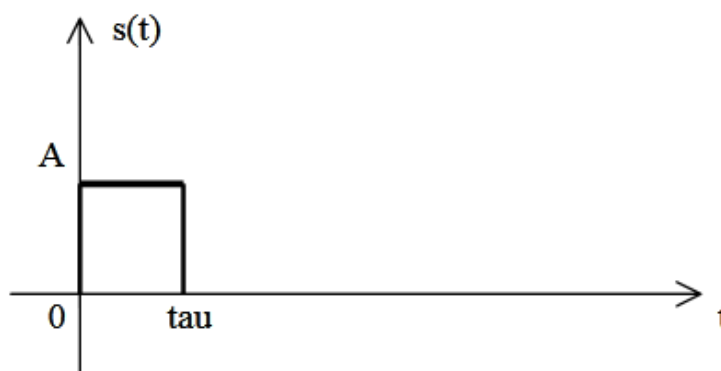


Рис.6 – Временная диаграмма прямоугольного импульса

```
>>s=A*rectpuls(t - tau/2, tau);
```

При вводе этого оператора либо нужно предварительно задать значения амплитуды  $A$  и длительности  $\tau$ , либо в самом операторе вместо идентификаторов  $A$  и  $\tau$  поставить численные значения.

Треугольный импульс.

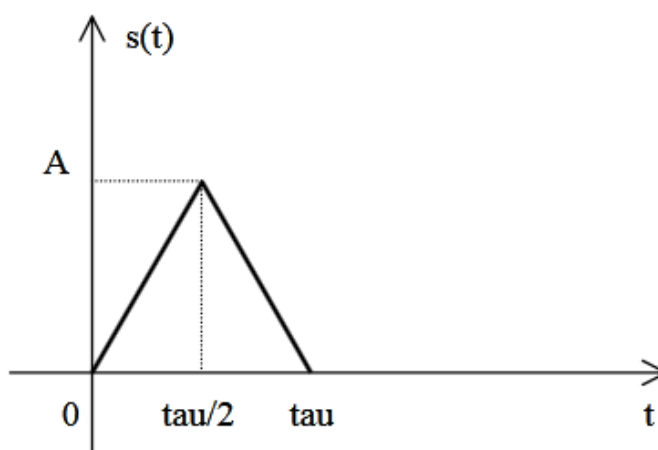


Рис.7 – Временная диаграмма треугольного импульса

`>> s = A * tripuls (t - tau/2, tau);`

Экспоненциальный импульс.

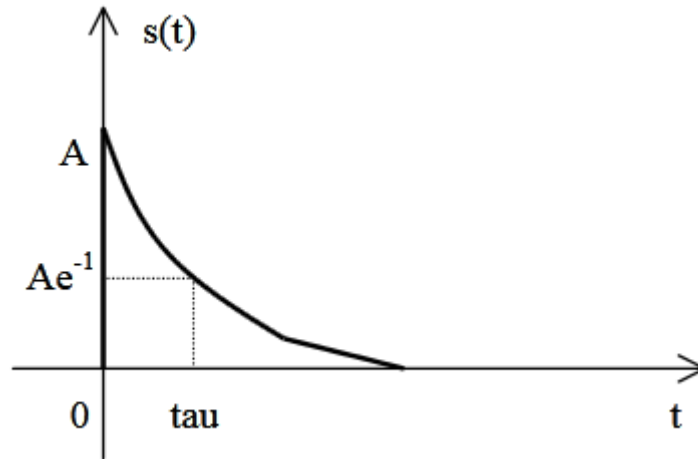


Рис.8 – Временная диаграмма экспоненциального импульса

`>> s = A*exp ( - t / tau);`

Подразумевается, что вектор  $t$  задан для моментов времени  $t \geq 0$ .

Синусоидальный импульс.

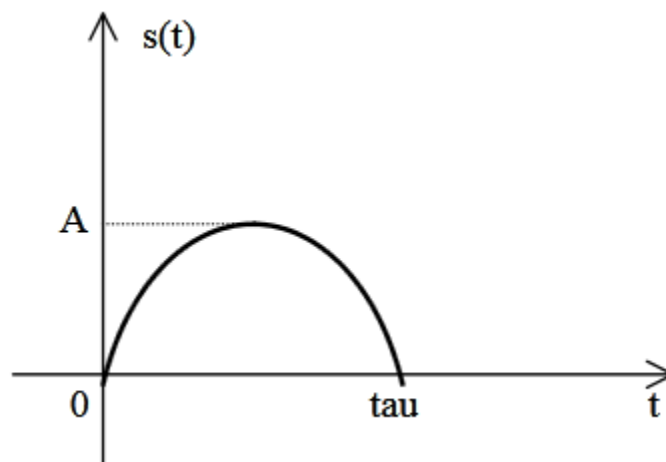


Рис.9 – Временная диаграмма синусоидального импульса

`>> s = A * sin (pi * t / tau).* ((t>=0).* (t<=tau));`



Здесь используется тот факт, что операции сравнения возвращают 1, если неравенство выполняется, или 0 в противном случае.

### Радиоимпульсы.

Прямоугольный радиоимпульс представляет собой гармонические колебания с прямоугольной огибающей. Это наиболее распространённый сигнал в современной радиотехнике. Осциллограмма прямоугольного радиоимпульса представлена на рисунке 10.

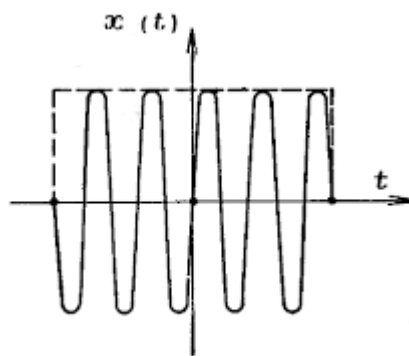


Рис. 10 – Осциллограмма прямоугольного радиоимпульса

Гауссов (колоколообразный) радиоимпульс представляет собой гармонические колебания с огибающей в виде функции Гаусса. Он обладает одним из наиболее компактных спектров. Осциллограмма гауссова радиоимпульса представлена на рисунке 11.[1]

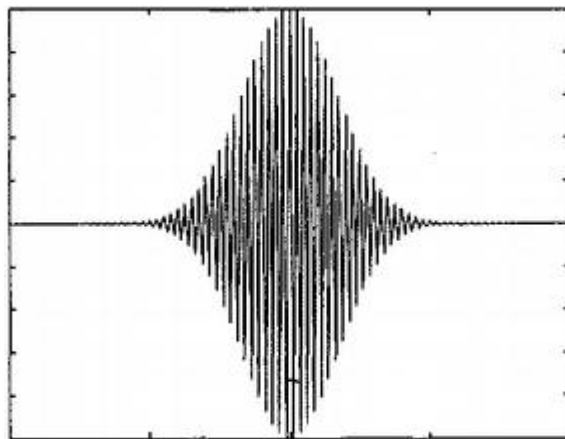


Рис. 11 – Осциллограмма гауссова радиоимпульса.

Радиоимпульсы получаются при умножении импульса  $s$  на гармоническое колебание:

$$\gg s1 = s.* \cos (2*\pi*f0*t + \text{phi});$$

Предварительно нужно задать значение несущей частоты  $f_0$  и начальной фазы  $\text{phi}$ . Обратите внимание, что операция умножения представлена здесь как  $*$  (точка перед знаком  $*$ ). Это означает поэлементное умножение векторов (в противном случае производились бы операция матричного умножения). В тех случаях, когда осуществляется умножение скаляров или матрицы (вектора) на скаляр, можно использовать символ  $*$ . То же самое относится к операции деления и возведения в степень. Поэлементное деление матриц задаётся оператором  $/$ , поэлементное возведение в степень  $^$ . Число задаётся в MatLab как  $\pi$ .

#### Пачки импульсов.

Для генерации конечной последовательности (пачки) импульсов одинаковой формы с произвольно задаваемыми задержками и амплитудами используется функция `pulstran`. Она вызывается следующим образом:

$s = \text{pulstran}(t, d, \text{'func'}, p1, p2 \dots)$  Здесь  $t$  - вектор значений моментов времени,  $d$  - вектор задержек и амплитуд импульсов, `'func'` - имя функции, задающей одиночный импульс, например, `'rectpuls'` или `'tripuls'`;  $p1, p2 \dots$  - параметры одиночного импульса, передаваемые функции `func`.

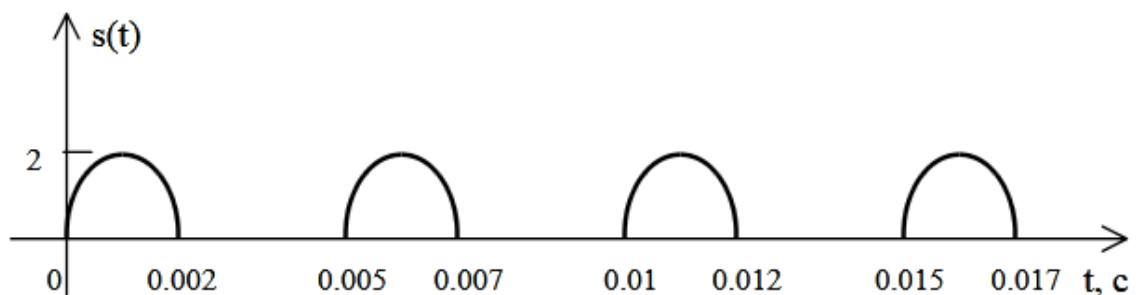


Рис.12 – Пачка из четырех синусоидальных импульсов

### 2.2.2 Виды помех

Помехой называют нежелательное физическое явление или воздействие электрических, магнитных или электромагнитных полей, электрических токов или напряжений внешнего или внутреннего источника, которое нарушает нормальную работу технических средств, или вызывает ухудшение технических характеристик и параметров этих средств.

В электрических цепях для борьбы с воздействием помех, вызванными работой других электрических машин и электронных устройств, и его последствиями применяют технологии фильтрации сигналов и экранирования корпусов приборов и оболочек кабелей, используют особые малошумящие электронные компоненты и устройства[1].

По характеру воздействия на сигналы помехи делят на аддитивные и мультипликативные.

Аддитивная помеха складывается с сигналом. Примером её являются посторонние электромагнитные воздействия в среде передачи сигнала (радиоканале, медном кабеле).

Мультипликативная помеха перемножается с сигналом. Такая помеха проявляется, например, в разнообразных устройствах обработки сигналов в виде искажений их передаточных характеристик.

Помеху, как поток случайной величины можно описать плотностью вероятности. Рассмотрим распределения плотности вероятности, используемые в данной работе.

При экспоненциальном распределении функция плотности вероятности случайной величины  $X$  имеет вид:

$$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad x \geq 0. \quad (1)$$

При распределении Рэлея:

$$f_X(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad \text{при } x \geq 0 \text{ и } \sigma > 0. \quad (2)$$

При логнормальном:

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

Графики этих функций представлены на рисунке 1.[1]

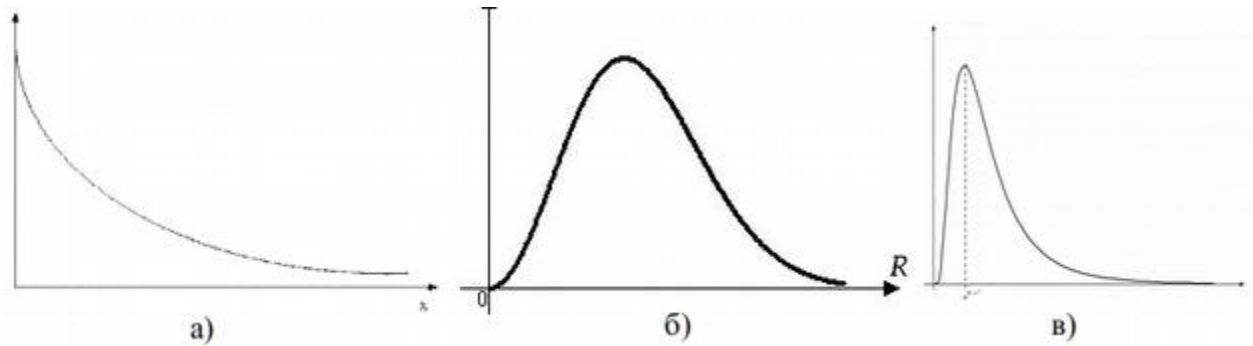


Рис. 13 – Графики функций плотности вероятности для экспоненциального (а), рэлеевского (б) и логнормального распределений случайной величины

### 3 Порядок выполнения работы

#### 3.1 Задание

- Создать модель сигнала с шумом, позволяющую в интерактивном режиме изменять параметры сигнала и шума. Предполагается, что на сигнал воздействует два вида помех: мультипликативные и аддитивные шумы.

Примечание – в качестве аддитивного шума рассматривается белый гауссовский шум; в качестве мультипликативной помехи – помехи с экспоненциальным законом распределения, логнормальным или рэлеевским законами распределения (конкретный вариант по указанию преподавателя выбрать из таблицы).

- Используя в редакторе программ кнопку “запуск” выполнить программу и сохранить на диске результат. Показать преподавателю работу модели и подготовить отчет о работе. Для оформления отчета самостоятельно в верхней части окна

пользовательского интерфейса (в листинге программы ) создать надпись: «Студент группы \_\_\_\_ ФИО. Вариант №\_\_». [1]

Таблица 1 – Варианты заданий

Номер варианта:	Тип мультипликативной помехи	Тип сигнала	Примечание
1	Рэлеевская	Одиночный прямоугольный радиоимпульс импульс	Амплитуду и другие параметры сигналов и помех выполнить в виде редактируемых полей ввода данных в панели главного окна. Рядом поместить надписи (в неработоспособных текстовых полях), описывающие название параметра. Например: «Амплитуда сигнала», «Уровень аддитивной помехи»
2	Рэлеевская	Пачка прямоугольных радиоимпульсов	
3	Рэлеевская	Одиночный гауссов радиоимпульс	
4	Рэлеевская	Пачка гауссовых радиоимпульсов	
5	Экспоненциальная	Одиночный прямоугольный радиоимпульс импульс	
6	Экспоненциальная	Пачка прямоугольных радиоимпульсов	
7	Экспоненциальная	Одиночный гауссов радиоимпульс	
8	Экспоненциальная	Пачка гауссовых радиоимпульсов	
9	Логнормальное распределение	Одиночный прямоугольный радиоимпульс импульс	
10	Логнормальное распределение	Пачка прямоугольных радиоимпульсов	
11	Логнормальное распределение	Одиночный гауссов радиоимпульс	
12	Логнормальное распределение	Пачка гауссовых радиоимпульсов	

### 3.2 Ход работы

1) Запустить систему MATLAB и открыть окно для создания новой модели.

2) Для реализации моделирования разработать интерфейс, отображающий график моделируемого процесса и позволяющий менять характеристики данного процесса.

Изменяемые величины:

- частота дискретизации, МГц;
- несущая частота, МГц;
- амплитуда сигнала, В;
- соотношение сигнал-шум, дБ.

Для этого в новом окне задать функцию:

```
function LABA2
```

Объявить переменные, которые должны быть «видимыми» всеми подпрограммами (m-файлами) и используются для объявления главного окна (hFig1), и графика (hAxes), помещенный внутри окна, в котором будут отображаться результаты моделирования.

```
global hFig1 hAxes
global hEd1 hEd2 hEd3 hEd4 hEd5 hEd6
global hList
global hBut1 hBut2
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4 hTxt5 hTxt6
hFig1=figure;
```

Создать управляющую кнопку hBut1 (“Выполнить”), осуществляющую запуск на исполнение программы с именем ‘progr0’:

```
hBut1=icontrol(hFig1,'style','pushbutton','String','Выполнить',
'Position',[1100 30 120 30],'Callback','prog01');
```

Создать редактируемые текстовые поля – вводимое значение присваивается переменным hEd1, hEd2, hEd4, hEd5:

```

hEd1=uicontrol(hFig1,'style','edit','Position',[50      30      120
30],'BackgroundColor','white','HorizontalAlignment','left');
hEd2=uicontrol(hFig1,'style','edit','Position',[200      30      120
30],'BackgroundColor','white','HorizontalAlignment','left');
hEd4=uicontrol(hFig1,'style','edit','Position',[350      30      120
30],'BackgroundColor','white','HorizontalAlignment','left');
hEd5=uicontrol(hFig1,'style','edit','Position',[500      30      120
30],'BackgroundColor','white','HorizontalAlignment','left');

```

Создать не редактируемые текстовые поля (надписи):

```

hTxt1=uicontrol(hFig1,'Style','text','Position',[50      70      120
30],'BackgroundColor','white','String','Частота дискретизации
Fs','HorizontalAlignment','center');
hTxt2=uicontrol(hFig1,'Style','text','Position',[200      70      120
30],'BackgroundColor','white','String','Несущая частота
Fc','HorizontalAlignment','center');
hTxt4=uicontrol(hFig1,'Style','text','Position',[350      70      120
30],'BackgroundColor','white','String','Амплитуда сигнала
A','HorizontalAlignment','center');
hTxt5=uicontrol(hFig1,'Style','text','Position',[500      70      120
30],'BackgroundColor','white','String','Отношение сигнал/шум в
дБ','HorizontalAlignment','center');

```

Создать окно и поле графика:

```

hAxes1=axes('Parent',hFig1,'Color',[1      1      1
1],'Units','points','Position',[30      100      900
440],'FontSize',8,'Visible','off');
axes(hAxes1);
set(hAxes1,'FontSize',8);

```

Создать управляющую кнопку hBut2 (“Очистить”) и запускаем на исполнение программы с именем ‘CLEAR’ из главной программы

```
hBut2=uicontrol(hFig1,'style','pushbutton','String','Очистить','Position',[950 30 120 30],'Callback','CLEAR');
```

Создать программу очистки, вызываемую управляющей кнопкой “Очистить” создаем соответствующий m-файл:

```
function CLEAR
global hAxes1
global axes
axes(hAxes1);
grid off;
cla;
```

Для выполнения указанной программы с именем ‘prog0’ она должна быть создана в виде самостоятельного m-файла и храниться в той же папке, что и главная программа LABA2. Создадим данный файл с именем ‘prog0’.

Листинг программы исполняемого m-файла должен начинаться с имени вызываемой функции и переменных.

```
function prog01
global hEd1 hEd2 hEd3 hEd4 hEd5 hEd6
```

При считывании данных из главного окна в исполняемой программе (prog0) следует поместить операторы

```
str1=get(hEd1,'String');
Fs=str2num(str1);
str1=get(hEd2,'String');
Fc=str2num(str1);
str1=get(hEd4,'String');
A=str2num(str1);
str1=get(hEd5,'String');
snr=str2num(str1);
```

3) Произвести моделирование сигналов, используя задание в соответствии с вариантом.



Описание моделей сигналов:Одиночный Гауссов радиопульс

Для того чтобы задать одиночный гауссов радиопульс введем переменную **T**, и зададим для нее дискретное время:

$$T = -10e-3:1/Fs:10e-3;$$

Для формирования одиночного гауссова радиопульса зададим значение функции **Y**:

$$Y = \text{gauspuls}(T, Fc)$$

Одиночный Прямоугольный радиопульс

Для создания одиночного прямоугольно радиопульса нужно установить частоту сигнала **F0**:

$$F0 = 50$$

Для того чтобы задать одиночный гауссов радиопульс введем переменную **T**, и зададим для нее дискретное время:

$$T = -10e-3:1/Fs:50e-3$$

Пачка Прямоугольных радиопульсов

Для формирования пачки прямоугольных радиопульсов с единичной амплитудой достаточно задать **Y**:

$$Y = (\text{square}(2 * \pi * T * F0, F0 * \tau * 100) + 1) * A / 2;$$

Для создания одиночного прямоугольно радиопульса нужно установить частоту сигнала **F0**:

$$F0 = 50$$

Далее установим дискретное время для импульса **T**:

$$T = -10e-3:1/Fs:50e-3$$

Зададим переменную длительность импульса:

$$\tau = 5e-3$$

Пачка Гауссовых радиопульсов

Для создания пачки гауссовых радиопульсов нужно установить задержку импульсов **d**:

$$d = [0 : 1/1E3 : 10e-3 ; 1.^{(0:10)}];$$

Зададим дискретное время **T**:

$$T = 0 : 1/50E3 : 10e-3;$$

Для создания пачки гауссовых радиопульсов значение функции **Y**:

```
Y=gauspuls(T,Fc);
```

Добавляем последовательность гауссовых импульсов.

```
x = pulstran(T,d,'gauspuls',10e3,0.5);
```

### Добавление шума к сигналу

Как было сказано выше, рассматривается два вида помех: мультипликативные и аддитивные шумы. Добавление шума к сигналу выполняется, например, в следующем порядке:

- Задать вид помехи.
- Объединить сигнал и шум.

Аддитивная помеха (белый гауссовский шум) задается следующим образом:

```
shum=awgn(T,snr,'measured');
```

Добавляем команду которая соединит сигнал с шумом и выведет это на график:

```
handl2=plot(Y+shum);
hold on
end
```

В качестве мультипликативной помехи рассматриваются следующие типы помех:

- логнормальная ;
- рэлеевская ;
- экспоненциальная.

(Выбрать в соответствии с вариантом)

Для того чтобы добавить экспоненциальную помеху воспользуемся командой:

```
shum=exppdf(T,snr);
```

Для того чтобы добавить рэлеевскую помеху:

```
shum=raylpdf(T,snr);
```

Для того чтобы добавить логнормальную помеху:

```
shum=lognpdf(T,log(2000),snr);
```

Примечание – приведенные листинги программ являются ознакомительными; приветствуется самостоятельное составление листинга программы, отличного от предложенного в настоящих методических указаниях. Важно корректное выполнение задания согласно варианту и наличие требуемого интерфейса (допускается его корректировка и дополнение).

#### **4 Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте принцип формирования заданного закона распределения случайной величины на основе равномерного распределения.

2. Назовите другие известные способы получения заданных законов распределения случайных величин.

3. Перечислите основные этапы создания графического интерфейса пользователя при создании модели сигнала в MATLAB.

4. Объясните различия мультипликативной и аддитивной помех при приеме сигналов.

## 5 Список источников

- 1 Макарова Н.Ю. Математическое моделирование средств измерений в среде Matlab // Методические указания к лабораторным работам – Владимир, 2011 – с.81
- 2 Цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс] // Методические указания к выполнению лабораторных работ: учебное электронное издание / А. Б., Санкт-Петербургский гос. электротехнический ун-т "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 2013. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006757754>

# МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
Учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы  
связи»  
по курсу «Цифровая обработка сигналов»

Курск 2018

УДК 621.391.26 (076)

Составители: А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, Д.В. Кобец, М.В. Зайцев

Рецензент

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры В.Г. Андронов

**Исследование линейных систем:** методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, Д.В. Кобец, М.В. Зайцев. – Курск, 2018.- 32 с.: ил. 20. – Библиогр.: с. 32.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат краткие теоретические сведения о линейных системах и способах их моделирования в среде математического моделирования MATLAB и пакете визуального моделирования Simulink, задания по выполнению работы, а также перечень вопросов для самоконтроля.

Полученные знания в результате выполнения работы дадут возможность сформировать представления о линейных системах, что является фундаментом для изучения остальных дисциплин профессионального цикла учебного плана, а также могут быть использованы в будущей профессиональной деятельности выпускника.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 очной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x841/16.  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. 1,68 Л. Тираж 100 экз. Заказ Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## **1 Цели работы:**

- Ознакомление со средой математического моделирования MATLAB и графической средой имитационного моделирования Simulink;
- Изучение функций MATLAB для моделирования линейных систем;
- Исследование свойств линейных систем в пакете Simulink.

## **2 Основные положения**

Линейными системами называются системы, для которых отклик системы на сумму воздействий равен сумме откликов на каждое воздействие. В математической модели линейной системы это означает, что оператор преобразования "вход-выход" линеен. Иногда линейное свойство системы называют принципом суперпозиции.

Линейные системы можно разделить на две группы: аналоговые линейные системы и дискретные линейные системы.

Аналоговые системы работают с непрерывными сигналами:  $x(t)$  и  $y(t)$ , в то время как дискретные работают с цифровыми сигналами:  $x[n]$  и  $y[n]$ , где  $n$  – номер элемента в массиве.

В первой части лабораторной работы даются краткие теоретические сведения о дискретных системах, производится моделирование линейных дискретных систем и их характеристик с помощью среды математического моделирования MATLAB.

Вторая часть лабораторной работы включает в себе теоретические сведения и моделирование линейных аналоговых систем на примере фильтра низких частот с аппроксимацией Баттерворта в графической среде имитационного моделирования Simulink.

## **3 Порядок выполнения работы**

### **3.1 Работа в среде математического моделирования MATLAB. Краткие теоретические сведения**

#### **3.1.1 Описание линейных дискретных систем**

Математическое моделирование обработки сигналов линейной дискретной системой (ЛДС) включает:

- расчет характеристик ЛДС во временной области;



- расчет реакции ЛДС на входное воздействие во временной области.

Приведем в соответствие терминологию и обозначения, используемые в лабораторной работе. ЛДС описывает соотношения между входом и выходом в виде уравнения или системы уравнений, позволяющих вычислить реакцию на заданное воздействие.

Во временной области ЛДС описывается уравнением в конечных разностях или разностным уравнением (РУ), имеющим вид[1]:

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} b[i]x[n-i] - \sum_{m=0}^{M-1} a[m]y[n-m], \quad (1.1)$$

которое задается *вектором коэффициентов воздействия **b***:

$$b = [b[0], b[1], b[2], b[3], \dots, b[i], b[N-1]]$$

и *вектором коэффициентов реакции **a***:

$$a = [a[0], a[1], a[2], \dots, a[m], a[M-1]]$$

Примечание – первый элемент вектора **a** всегда равен 1:  $a[0]=1$ . Если это условие не выполняется, то необходимо произвести нормировку векторов **b** и **a** по  $a[0]$ .

Для выражения (1.1.)  $x[n]$  является входным воздействием на ЛДС, а  $y[n]$  – реакцией ЛДС на заданное воздействие,  $n$  – дискретные отсчеты времени. Выходной сигнал  $y[n]$  можно определить с помощью формулы *свертки*:

$$y[n] = \sum_{i=1}^n h[i] \cdot x[n-i] \quad (1.2)$$

где импульсная характеристика  $h[i]$  задается в виде вектора конечной последовательности.

РУ описывает работу некоторого фильтра, который можно рассматривать как произвольную систему обработки дискретного сигнала, обладающего свойствами линейности и стационарности [1].

Передаточная функция – один из способов математического описания динамической системы. Передаточная функция

дискретного фильтра есть отношение Z-преобразований выходного сигнала к входному сигналу и является дробно-рациональной. Для ЛДС она имеет вид:

$$H[z] = \frac{Y[z]}{X[z]} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} b[n]z^{-n}}{1 + \sum_{m=1}^{M-1} a[m]z^{-m}} \quad (1.3)$$

По полученному выражению (1.3) удобно составить структурную схему, определяющую алгоритм преобразования входной дискретной последовательности в выходную [1].

*Пример 1.* Для передаточной функции:

$$H[z] = \frac{b[0] + b[1]z^{-1} + b[2]z^{-2} + b[3]z^{-3}}{1 - a[1]z^{-1} - a[2]z^{-2} - a[3]z^{-3} - a[4]z^{-4}} \quad (1.4)$$

Структурная схема будет иметь вид, представленный на рис. 1.

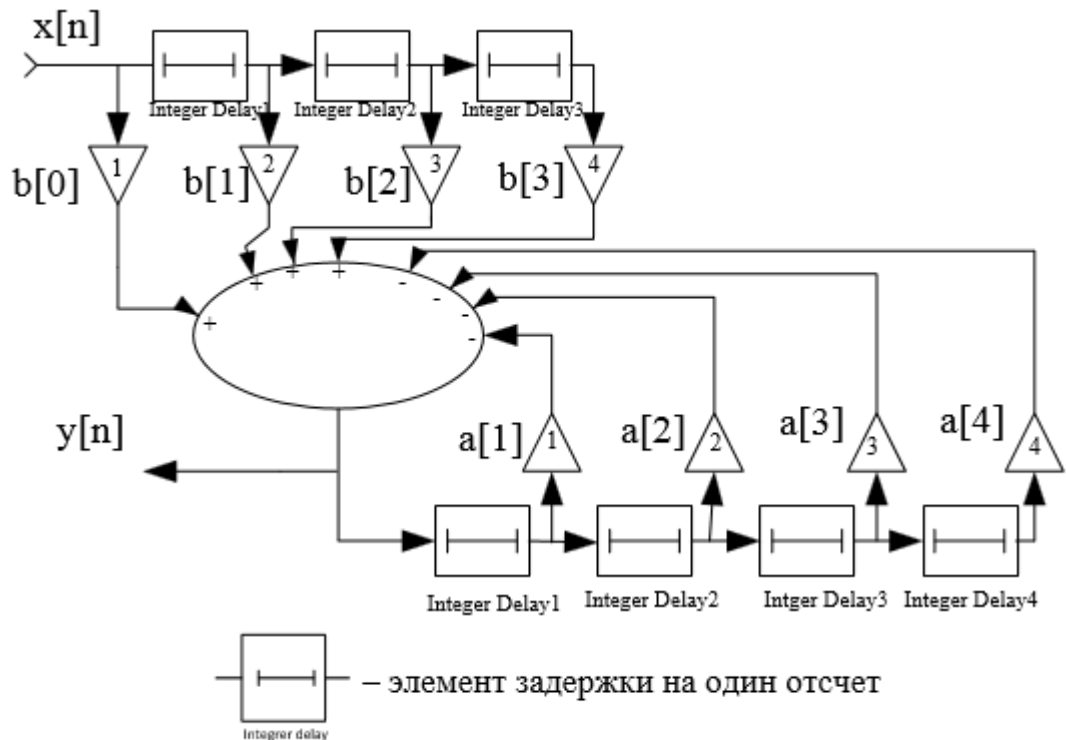


Рис. 1 – Структурная схема фильтра

### Устойчивость ЛДС.

Имеющаяся обратная связь в БИХ-фильтре может быть как положительной, так и отрицательной. На этапе проектирования фильтров нужно выполнить проверку на

устойчивость, так как БИХ-фильтр может оказаться неустойчивым. Фильтр называется устойчивым, если при любых начальных условиях реакция фильтра на любое ограниченное воздействие  $x[n]$  также ограничена, т.е. если  $|x[n]| < \infty$  для всех  $n$ , то  $|y[n]| < \infty$  тоже для всех  $n$  [1].

Если  $x[n]$  – ограничено, т.е.  $|x[n]| \leq A < \infty$ , где  $A$  – константа, то абсолютное значение выходного сигнала

$$|y[n]| \leq \sum_{m=0}^{\infty} |x[n-m]| |h[m]| \leq A \sum_{m=0}^{\infty} |h[m]| \quad (1.5)$$

Критерием устойчивости дискретного фильтра является абсолютная сходимость ряда отсчетов импульсной характеристики:

$$\sum_{m=0}^{\infty} |h[m]| < \infty$$

Последнее выражение является не только достаточным, но и необходимым условием устойчивости фильтра. Однако непосредственное использование этого условия проверки устойчивости практически затруднено. Другой критерий устойчивости основан на анализе полюсов передаточной характеристики  $H(z)$ . В этом случае удобно представить передаточную функцию в виде суммы простых дробей (N-M):

$$H(z) = \sum_{k=1}^M \frac{A_k}{(1 - a_k z^{-1})}, \quad (1.6)$$

где:  $a_k$  – полюс (корень знаменателя);

$A_k$  – коэффициент разложения при  $k$ -м полюсе.

ЛДС будет устойчива, если выполняется условие:

$$|a_k| < 1, k=1, 2, \dots, M-1.$$

Таким образом, для того, чтобы ЛДС была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все полюса ее передаточной функции распределялись внутри единичного круга комплексной  $z$ -плоскости [1].

### 3.1.2 Примеры вычислений

После запуска MATLAB, на экране появится основное окно системы MATLAB, показанное на рис. 2, указаны и подписаны необходимые и часто используемые окна и ярлычки.

Для дальнейшей работы необходимо создать новый М-файл. Как в окне Command Windows, так и в М-файле можно записывать команды для вычисления. Расчеты сохранять можно в М-файле. На рис. 3 показан новый М-файл.

Примечание – имя файла должно содержать латинские символы, цифры, следующие непосредственно после латинских символов или через знак подчеркивания, например: Lb.m; Lb1.m; Lb\_1.m; My\_Lb\_1.m.

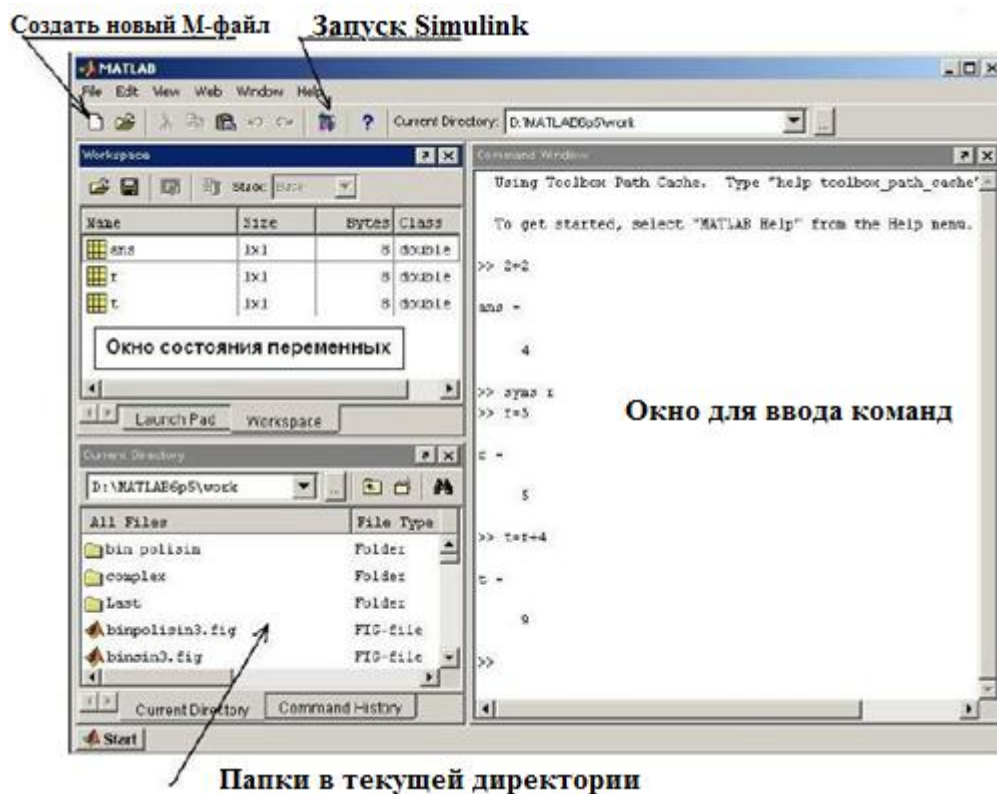
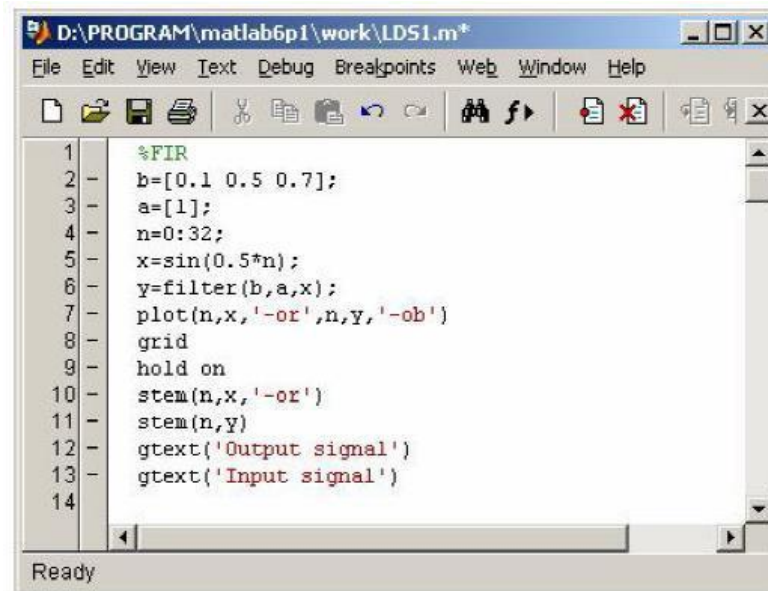


Рис. 2 – Окно системы MATLAB после запуска и выполнения простых вычислений



```
D:\PROGRAM\matlab6p1\work\LD51.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 %FIR
2 b=[0.1 0.5 0.7];
3 a=[1];
4 n=0:32;
5 x=sin(0.5*n);
6 y=filter(b,a,x);
7 plot(n,x,'-or',n,y,'-ob')
8 grid
9 hold on
10 stem(n,x,'-or')
11 stem(n,y)
12 gtext('Output signal')
13 gtext('Input signal')
14
Ready
```

Рис. 3 – М-файл

### 3.1.2.1 Расчет импульсной характеристики с помощью разностного уравнения

Для того чтобы вычислить импульсную характеристику БИХ (КИХ)-фильтра по РУ, необходимо в качестве воздействия выбрать единичный цифровой импульс – вектор  $[1\ 0\ 0\ 0\ \dots]$ , где количество нулей соответствует длине импульсной характеристике (ИХ) [1].

Примечание – длина импульсной характеристики (ИХ) КИХ-фильтра конечна и равна длине вектора воздействия. Длина импульсной характеристики БИХ-фильтра бесконечна, поэтому будет введено ограничение.

*Пример 1.* Вычисление импульсной характеристики КИХ-фильтра, заданного РУ:

$$y[n]=0.2x[n]+0.3x[n-1]+0.4x[n-2]+0.9x[n-3]+0.4x[n-4]+0.3x[n-5]+0.4x[n-6]$$

*Решение.* Введем обозначения:  $h$  – импульсная характеристика, delta-единичный цифровой импульс длиной  $N$  отсчетов (одна единица и  $N-1$  нулей). Составим программу в М-файле для вычисления ИХ [1]:

<code>b=[0.2 0.3 0.4 0.9 0.4 0.3 0.2];</code>	<i>вектор воздействия</i>
<code>a=[1];</code>	<i>вектор реакции</i>
<code>N= length(b);</code>	<i>длина импульсной характеристики</i>
<code>delta=[1; zeros(N-1, 1)];</code>	<i>вектор единичного выброса (модель дельта-функции)</i>
<code>h=filter(b,a,delta);</code>	<i>расчет импульсной характеристики</i>
<code>stem(0:N-1,h)</code>	<i>построение графика</i>
<code>grid on</code>	<i>наложение сетки</i>

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу *F5* (Рис. 4).

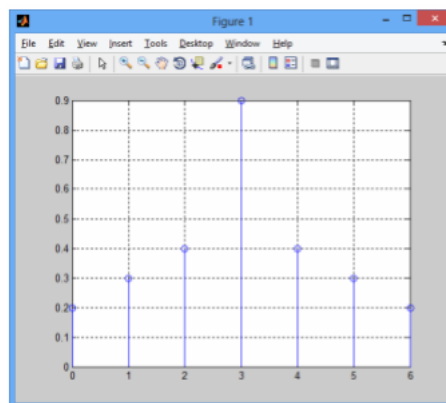


Рис. 4 – Полученная импульсная характеристика КИХ-фильтра

*Пример 2.* Вычисление импульсной характеристики БИХ-фильтра, заданного РУ:

$$y[n]=x[n]x[n-1]+x[n-2]+ 0.7y[n-2]-0.25y[n-3] \quad (1.7)$$

*Решение.* Используем дискретную модель  $\delta$ -импульса и составим программу:

<code>b=[1 1 1];</code>	<i>вектор воздействия</i>
<code>a=[1 0.7 -0.25];</code>	<i>вектор реакции</i>
<code>N= length(a)*10;</code>	<i>ограничение длины импульсной характеристики</i>
<code>delta=[1;zeros(N,1)];</code>	<i>модель дельта-функции</i>
<code>h=filter(b,a,delta);</code>	<i>расчет импульсной характеристики</i>
<code>stem(0:length(delta)-1,h)</code>	<i>построение графика</i>
<code>grid</code>	<i>наложение сетки</i>

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу *F5*. Результат решения показан на рис. 5.

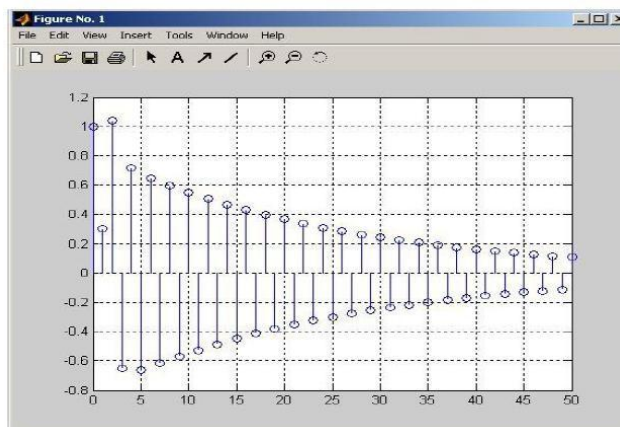


Рис. 5 – Импульсная характеристика БИХ-фильтра

### 3.1.2.2 Расчет импульсной характеристики по коэффициентам разностного уравнения

Импульсная характеристика может быть рассчитана непосредственно по коэффициентам разностного уравнения с помощью функции `impz`, формат которой имеет вид

$$[h, nT] = \text{impz}(b, a, N, FS),$$

где  $b$  – вектор коэффициентов в порядке их следования,  $a$  – вектор коэффициентов в порядке их следования,  $a_0=1$ ,  $N$  – рассчитываемое количество отсчетов импульсной характеристики,  $FS$  – частота дискретизации сигнала, Гц,  $h$  – вектор-столбец импульсной характеристики,  $T$  – интервал дискретизации,  $1/TS=F1$ ,  $nT$  – вектор-столбец значений дискретного времени [1].

*Пример 3.* Определение импульсной характеристики БИХ-фильтра по данным предыдущего примера при  $N=50$  и  $F_s=2000$  Гц.

*Решение.*

$b=[1 \ 1 \ 1];$

$a=[1 \ 0.7 \ -0.25];$

$N=50;$

$F_s=2000;$

$[h, nT]=\text{impz}(b, a, N, F_s);$

$\text{stem}(nT, h), \text{grid}$

*вектор воздействия*

*вектор реакции*

*задание числа отсчетов импульсной характеристики*

*частота дискретизации*

*расчет импульсной характеристики*

*график, сетка*

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу  $F5$  (Рис. 6).

Примечание – чтобы получить импульсную характеристику в виде вектора, необходимо записать в строчке  $h=impz(b,a,N)$  вместо  $[h,nT]=impz(b,a,N,Fs)$ .

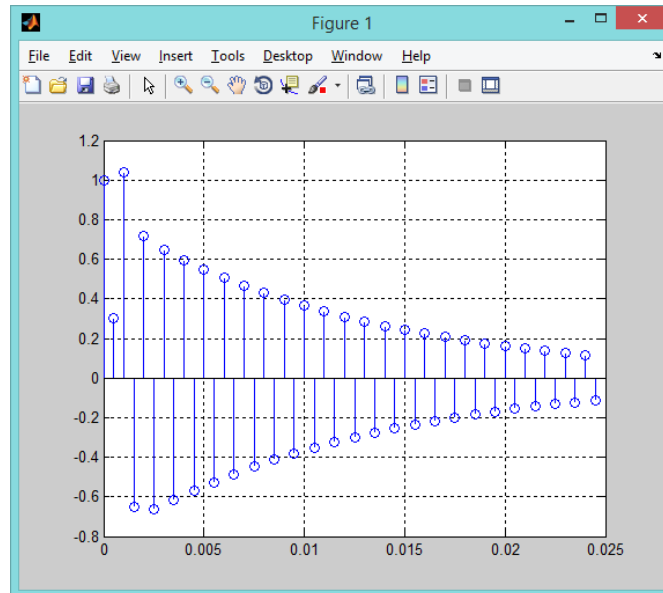


Рис. 6 – Импульсная характеристика БИХ-фильтра, рассчитанная по коэффициентам РУ

### 3.1.2.3 Вычисление реакции ЛДС на входное воздействие на основе разностного уравнения

Моделирование ЛДС на основе РУ – вычисление реакции на входное воздействие при помощи функции `filter`, формат которой имеет вид: `filter(b,a,x)`.

*Пример 4.* Расчет реакции КИХ-фильтра 2-го порядка, заданного РУ [1]:

$$y[n]=0.1x[n]+0.5x[n-1]+0.7x[n-2],$$

где  $n=0:32$ ,  $2\pi f=\omega t=0.5$ ,  $x[n]=\sin(\omega Tn)$ .

*Решение.*

$b=[0.1 \ 0.5 \ 0.7];$

$a=[1];$

$n=0:32;$

*вектор воздействия*

*вектор реакции*

*дискретные индексы времени*



```

x=sin(0.5*n);
y=filter(b,a,x);
plot(n,x,'-or', n,y,'-ob')
grid
hold on
stem(n,x, '-or')
stem(n,y)
gtext('Output signal')
gtext('Input signal')

```

*входное воздействие*  
*вычисление реакции*  
*построение графика воздействия и реакции*  
*сетка*  
*построение двух графиков в одном окне*  
*построение вертикальных линий на графике*  
  
*метка для выходного сигнала*  
*метка для входного сигнала*

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу *F5*. Результат решения показан на рис. 7.

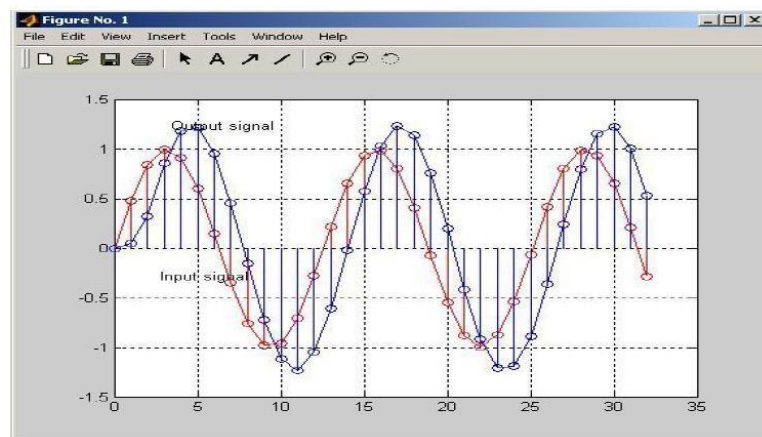


Рис. 7 – Входной (Input) и выходной (Output) сигналы (КИХ-фильтр).

*Пример 5.* Расчет реакции БИХ фильтра 2-го порядка, заданного РУ (1.4.) и  $n=0:32$ ,  $2\pi f = \omega t = 0.5$ ,  $x[n] = \sin(\omega T n)$ .

*Решение.*

```

b=[1 1 1];
a=[1 0.7 -0.25];
n=0:32;
x=sin(0.5*n);
y=filter(b,a,x);
plot(n,x,'-or',n,y,'-ob')
grid
hold on
stem(n,x,'-or')
stem(n,y)
gtext('Output signal')
gtext('Input signal')

```

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу  $F5$  (Рис. 8).

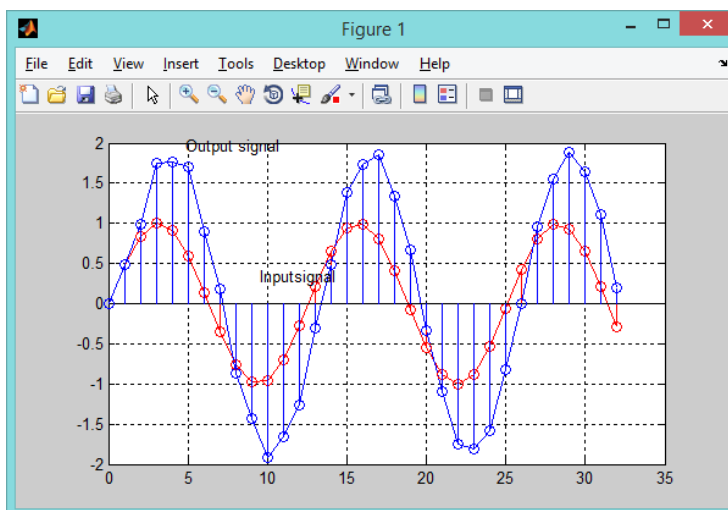


Рис. 8 – Входной (Input) и выходной (Output) сигналы (БИХ-фильтр)

### 3.1.2.4 Вычисление реакции ЛДС на основе уравнения свертки

Моделирование работы ЛДС на основе уравнения свертки (1.2) выполняется с помощью функции `conv`, формат которой имеет вид `conv(x,h)` или `conv(h,x)`, где  $x$  – вектор отсчетов воздействия длиной  $klength(x)$ ,  $h$  – вектор отсчетов импульсной характеристики длиной  $vlength(h)$  [1].

В результате вычисления функция `conv` возвращает вектор реакции длиной  $k+v-1$ .

*Пример 6.* Вычислить реакцию КИХ-фильтра, заданного РУ

$$y[n]=0.1x[n]+0.5x[n-1]+0.7x[n-2].$$

*Решение.* Примем во внимание, что импульсная характеристика равна вектору коэффициентов РУ, и составим программу вычисления реакции:

```
b=[0.1 0.5 0.7];
h=b;
n=0:32;
x=sin(0.5*n);
y=conv(h,x);
```

*импульсная характеристика*

*входное воздействие  
вычисление свертки*

```

k=length(y);
hold on
plot(n,x,'-or')
grid
stem(n,x,'-or')
nc=0:(k-1);
plot(nc,y,'-ob')
stem(nc,y)
gtext('Outputsignal')
gtext('Inputsignal')

```

*построение графика входного воздействия*

*построение графика реакции*

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу *F5* (Рис. 9).

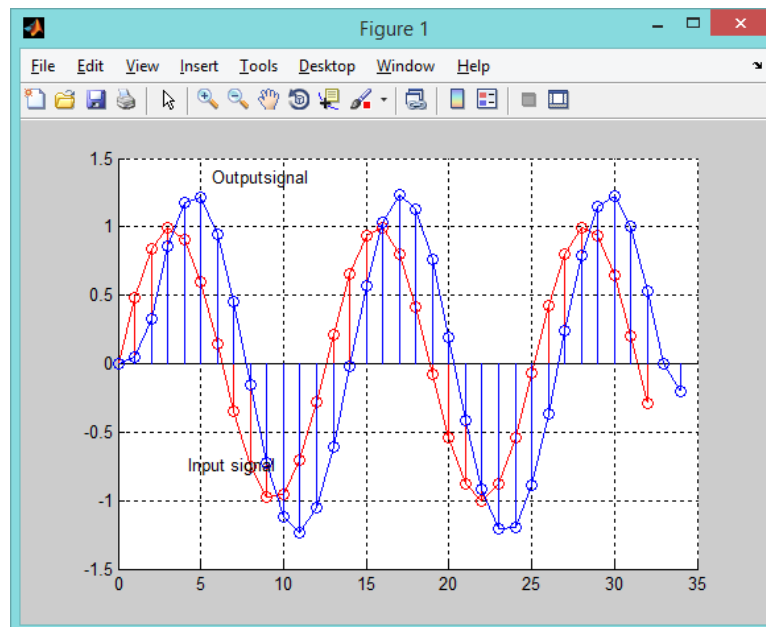


Рис. 9 – Реакция КИХ фильтра, заданного РУ

### 3.1.2.5 Расчет АЧХ и ФЧХ фильтра

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)  $H[k]$  фильтра вычисляется при помощи прямого преобразования Фурье от импульсной характеристики:

$$Ah[k] = \sum_n h[n] e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad n=0 \dots N-1, \quad k=0 \dots N-1$$

$$H[k] = \sqrt{[\operatorname{Re}(Ah[k])]^2 + [\operatorname{Im}(Ah[k])]^2} \quad (1.5)$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) фильтра вычисляется как:

$$\varphi[k] = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(Ah[k])}{\operatorname{Re}(Ah[k])} \quad (1.7.)$$

*Пример 7.* Вычисление АЧХ и ФЧХ КИХ-фильтра, заданного РУ:

$$y[n]=0.00634x[n]+0.0317x[n-1]+0.07x[n-2]+0.126[n-3]+0.01684[x-4]+0.18[x-5]+ +0.1684[x-6]+0.126x[n-7]+0.07x[n-8]+0.0317x[n-9]+0.00634x[n-10]$$

*Решение:*

b=[6.34E-3 0.032 0.07 0.126 0.17 0.18 0.17 0.126 0.07 0.032 6.34E-3];

a=[1];

N=length(b)\*10; *длина импульсной характеристики и преобразования Фурье*

h=impz(b,a,N); *вычисление импульсной характеристики по РУ*

Ah=fft(h,N); *преобразование Фурье от импульсной характеристики*

H=abs(Ah); *вычисление АЧХ*

ph=angle(Ah); *вычисление ФЧХ*

dl=round(N/2); *ограничение длины преобразования*

H=H(1:dl); *ограничение длины АЧХ*

ph=ph(1:dl); *ограничение длины ФЧХ*

n=0:dl-1;

plot(n,H,'-or',n,ph,'-ob'); *построение графиков АЧХ и ФЧХ*

grid

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу F5.

Как видно по АЧХ (Рис. 11), РУ определяет работу фильтра низкой частоты (ФНЧ).

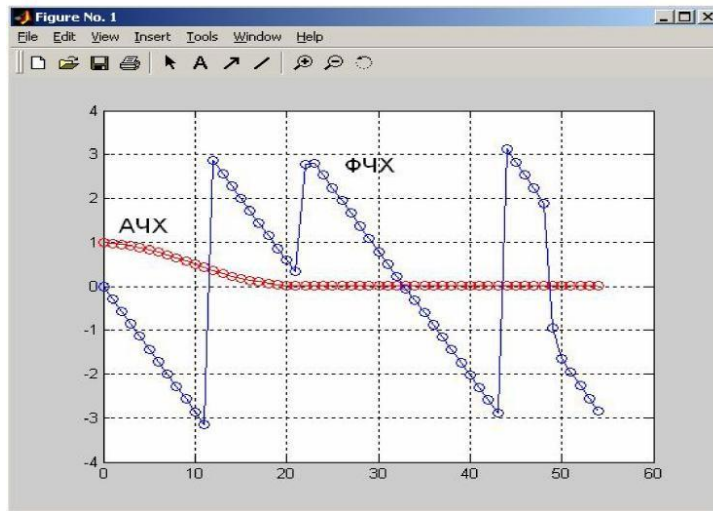


Рис. 11 – АЧХ и ФЧХ фильтра низкой частоты

*Пример 8.* Вычисление АЧХ и ФЧХ БИХ-фильтра по РУ.

*Решение.*

```
b=[1 1 1];
a=[1 0.7 -0.25];
N=length(a)*30;
```

*длина вектора a равна 3, а длина преобразования Фурье – N равна 3\*30*

```
h=impz(b,a,N);
Ah=fft(h,N);
H=abs(Ah);
ph=angle(Ah);
dl=round(N/2);
H=H(1:dl);
ph=ph(1:dl);
n=0:dl-1;
plot(n,H,'-or',n,ph,'-ob');
grid
```

После набора программы для получения результатов необходимо нажать функциональную клавишу *F5* (Рис. 12).

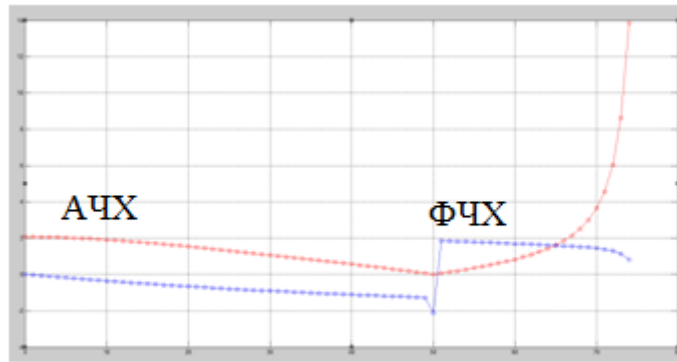


Рис. 12 – АЧХ и ФЧХ фильтра высокой частоты

## 3.2 Методические рекомендации по выполнению индивидуального задания

### 3.2.1 Предварительные расчеты

Согласно полученному варианту фильтра, произвести следующие расчеты:

- Записать РУ для фильтра;
- Записать выражение передаточной характеристики фильтра.

### 3.2.2 Варианты заданий

Вариант индивидуального задания выбирается согласно порядковому номеру в журнале преподавателя.

#### Вариант 1

ФНЧ КИХ-фильтр. Частота дискретизации  $F_s=48000$  Гц.

Вектор воздействия:  $-0.044 \ -0.036 \ 0.05 \ 0.03 \ -0.036 \ -0.096 \ 0.053 \ 0.309$   
 $0.450.3 \ 0.053 \ -0.096 \ -0.036 \ 0.03 \ 0.05 \ -0.036 \ -0.044.$

Вектор реакции: [1].

Параметры:  $\omega_1 T=0.039$ ,  $\omega_2 T=0.131$ .

#### Вариант 2

ФВЧ КИХ-фильтр. Частота дискретизации  $F_s=48000$  Гц.

Вектор воздействия:  $0.035 \ 0.14 \ -0.044 \ -0.056 \ 0.02 \ 0.1 \ -0.02 \ -0.32 \ 0.52$   
 $-0.32 \ -0.02 \ 0.1 \ 0.02 \ -0.056 \ -0.044 \ 0.14 \ 0.035.$

Вектор реакции: [1].

Параметры:  $\omega_1 T=0.72$ ,  $\omega_2 T=0.524$ .

### Вариант 3

ФВЧ КИХ-фильтр. Частота дискретизации  $F_s=48000$  Гц.

Вектор воздействия: 0.132 0.0058 -0.05 -0.039 0.05 0.08 -0.06 -0.3 0.56  
-0.32 -0.06 0.08 0.05 -0.039 -0.05 0.0058 0.132.

Вектор реакции:[1].

Параметры:  $\omega_1 T=0.785$ ,  $\omega_2 T=0.262$ .

### Вариант 4

Полосовой КИХ-фильтр. Частота дискретизации  $F_s=48000$  Гц.

Вектор воздействия: -0.0008 -0.05 -0.05 0.147 0.1 -0.07 -0.16 0.05 0.2  
0.05 -0.16 -0.073 0.1 0.15 -0.05 -0.05 -0.0008.

Вектор реакции:[1].

Параметры:  $\omega_1 T=0.72$ ,  $\omega_2 T=0.524$ .

### Вариант 5

ФНЧ БИХ-фильтр. Частота дискретизации  $F_s=48000$  Гц.

Вектор воздействия: 5 5.8 -2.4 5.1 1.2.

Вектор реакции: 1 -0.7 -0.3 0.2 0.3 0.13 -0.2.

Параметры:  $\omega_1 T=0.131$ ,  $\omega_2 T=0.916$ .

### Вариант 6

ФНЧ БИХ-фильтр. Частота дискретизации  $F_s=48000$  Гц.

Вектор воздействия: 0.048756 -0.12694 0.080043 0.080043 -0.12694  
0.048756.

Вектор реакции: 1 -4.3947 7.9712 -7.4263 3.5474 -0.69388.

Параметры:  $\omega_1 T=0.982$ ,  $\omega_2 T=0.524$ .

## **3.3 Задание**

Для каждого варианта задан тип фильтра (КИХ или БИХ), а также отсчеты векторов воздействия  $b$  и реакции  $a$ . Дополнительно заданы два значения  $\omega_i T$ , для построения гармонических колебаний. Необходимо определить:

- импульсную характеристику фильтра, подав на вход дельта-функцию (см. примеры 1,2);
- импульсную характеристику по отсчетам РУ (см. пример 3);
- вычислить реакцию ЛДС на входное воздействие на основе разностного уравнения. В качестве входного воздействия использовать сумму двух гармонических колебаний.

Амплитуды двух колебаний принять равными 1В (см. примеры 4, 5);

Примечание – помнить, что уравнение гармонического колебания имеет вид:  $x(t)=A\sin(\omega t+\varphi)$  ,где А-амплитуда колебания  $x(t)$ ;

- вычислить реакцию ЛДС на основе уравнения свертки. В качестве входного воздействия использовать сумму двух гармонических колебаний. Амплитуды двух колебаний принять равными 1 В(см. пример 6);
- рассчитать АЧХ и ФЧХ фильтра и построить графики (см. примеры 7,8).

### 3.4 Работа в среде имитационного моделирования Simulink. Краткие теоретические сведения

#### 3.4.1 Аналоговые линейные системы

Физически реализуемые системы удовлетворяют двум условиям

$$h(t)=0 \text{ при } t<0 \text{ и } \int_0^{\infty} |h(t)| dt < \infty .$$

Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие называется переходной характеристикой  $h_1(t)$ .Переходная характеристика связана с импульсной характеристикой зависимостью  $h_1(t) = \int h(t) dt$  .

Импульсная и переходная характеристика системы позволяют определить реакцию системы на произвольный входной сигнал [2].

Для анализа системы применяются также преобразование Лапласа и преобразование Фурье

$$Y^*(s) = \int_0^{\infty} Y(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt = \int_0^{\infty} e^{-s \cdot t} dt \cdot \int_0^t X(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau ,$$

$$Y^*(s) = H(s) \cdot X^*(s) ,$$

$$H(s) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau , \quad X(s) = \int_0^{\infty} X(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt .$$

где  $Y^*(s)$ ,  $X^*(s)$  – изображения сигналов (преобразования Лапласа сигналов);



$H(s)$  – передаточная функция системы.

$$Y^*(j \cdot \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt, \quad X^*(j \cdot \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt,$$

$$H(j \cdot \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot \tau} d\tau = H(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi(\omega)},$$

$$Y^*(j \cdot \omega) = H(j \cdot \omega) \cdot X^*(j \cdot \omega).$$

где  $Y^*(j \cdot \omega)$ ,  $X^*(j \cdot \omega)$  – изображения сигналов (преобразования Фурье сигналов);

$H(j \cdot \omega)$  – частотная характеристика системы (зависимость выходного сигнала при воздействии входного гармонического сигнала от частоты);

$H(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  – амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

Частотная характеристика системы может быть определена по передаточной функции путем подстановки  $s = j \cdot \omega$ .

Для линейной системы выполняется принцип суперпозиции

$$Y^*(s) = H(s) \cdot X_1^*(s) + H(s) \cdot X_2^*(s) = H(s) \cdot [X_1^*(s) + X_2^*(s)],$$

$$Y^*(s) = C \cdot H(s) \cdot X^*(s) = H(s) \cdot C \cdot X^*(s).$$

При последовательном / параллельном соединении линейных систем общая передаточная функция равна произведению / сумме передаточных функций этих систем

$$H^*(s) = H_1(s) \cdot H_2(s),$$

$$H^*(s) = H_1(s) + H_2(s).$$

В том случае, если при проектировании системы заданы требования в частотной области, прежде всего, производится расчет передаточной функции (частотной характеристики) системы. По передаточной функции далее можно определить импульсную (переходную) характеристику системы [2].

Например, во многих случаях полученная передаточная функция системы  $H(s)$  может быть представлена в дробно-рациональной форме

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_m \cdot s^m}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_n \cdot s^n},$$

причем  $m < n$  и коэффициенты  $a_i, b_i$  – действительные числа.

Вычислив корни знаменателя  $A(s)$ , т.е. полюса системы  $sp_i$ , можно представить передаточную функцию в виде

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_m \cdot s^m}{a_n \cdot (s - sp_0)^{k_0} \cdot (s - sp_1)^{k_1} \dots (s - sp_{n-1})^{k_{n-1}}},$$

где  $k_i$  – кратность корней.



В случае, если все полюса простые ( $k_i = 1$ ), импульсная характеристика системы определяется выражением

$$h(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B(sp_i)}{A'(sp_i)} \cdot e^{t \cdot sp_i}, \quad t > 0.$$

Переходная характеристика определяется в этом случае выражением

$$h_1(t) = \frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B(sp_i)}{sp_i \cdot A'(sp_i)} \cdot e^{t \cdot sp_i}, \quad t > 0.$$

### 3.4.2 Начало работы с Simulink

Пакет Simulink позволяет осуществлять исследование (моделирование) поведения динамических систем. Запуск пакета Simulink можно произвести из командного окна MatLab, нажав пентаграмму  в панели инструментов и открыв новую модель (пиктограмма ).

При запуске Simulink открываются два окна: пустое окно untitled (окно для создания блок-диаграммы модели) и окно Library Simulink (библиотека) с перечнем основных разделов библиотеки [2].

В открывшееся окно untitled необходимо добавить блоки, моделирующие работу источников сигналов, измерительных приборов и аналоговых систем.

Для моделирования работы аналогового фильтра требуется составить следующую структурную схему (модель), Рис. 13.

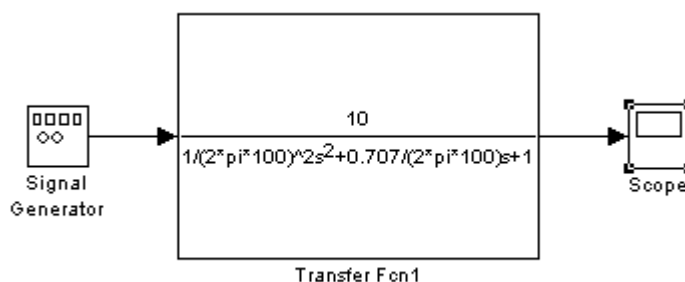


Рис.13 – Структурная схема аналогового фильтра.

Сигналы в модели передаются по линиям. Линия соединяет выходной порт одного блока с входным портом другого блока. Линия может также разветвляться и соединять выходной порт одного блока с выходными портами нескольких блоков. Любая линия связи может иметь произвольное число ответвлений, начало каждого из которых обозначается точкой [2].

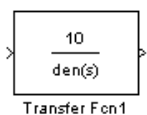
Чтобы соединить выходной порт одного блока с входным портом другого, нужно выполнить следующие действия:

- установить указатель мыши на выходной порт первого блока (при этом курсор должен принять форму перекрестия);
- нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее в этом положении, передвинуть указатель к входному порту второго блока;
- отпустить кнопку мыши.

Линии можно нарисовать как от входного порта к выходному, так и наоборот.

Моделирование работы аналогового фильтра низких частот может быть выполнено с помощью блока Transfer Fcn (Рис. 15).

В блоке Transfer Fcn в качестве исходных данных берется описание передаточной функции  $H(s)$  системы в операторной форме. Передаточная функция  $H(s)$  задаётся в блоке параметров фильтра, который вызывается двойным щелчком на пиктограмму фильтра



, где Numerator – это значения коэффициентов числителя  $B$ , а Denominator – значения коэффициентов знаменателя  $A$

(коэффициенты вводятся через пробел, начиная с коэффициента с наибольшим индексом) [2].

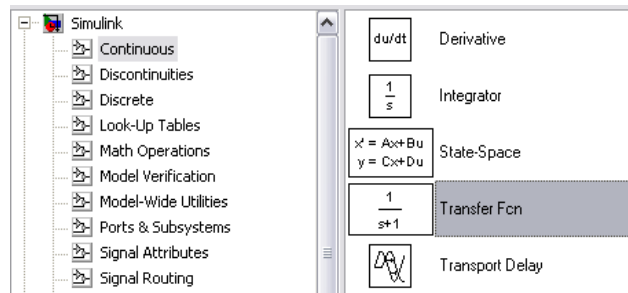


Рис. 14 – Расположение блока Transfer Fcn

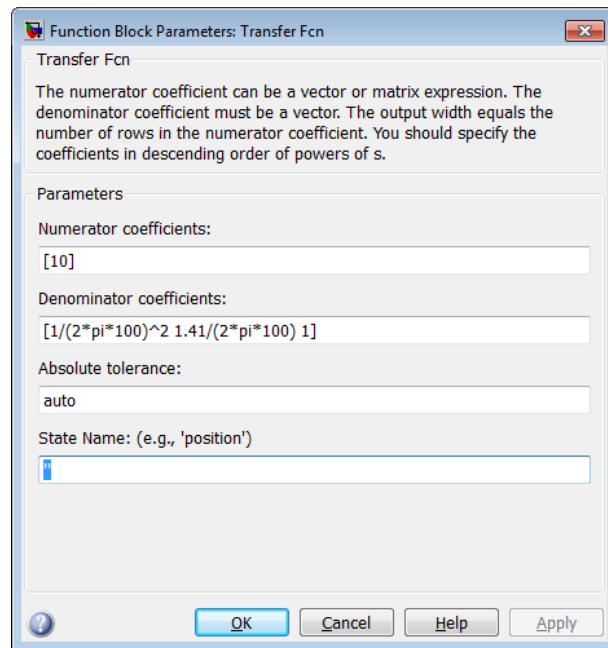


Рис. 15 – Блок параметров фильтра Transfer Fcn

Для задания гармонического сигнала, используется блок Signal Generator (Simulink/ Sources/Signal Generator), Рис. 16, а.

Параметры сигнала задаются в блоке параметров Signal Generator (Рис. 16, б), который вызывается двойным щелчком на пиктограмму Signal Generator(  Signal Generator ).

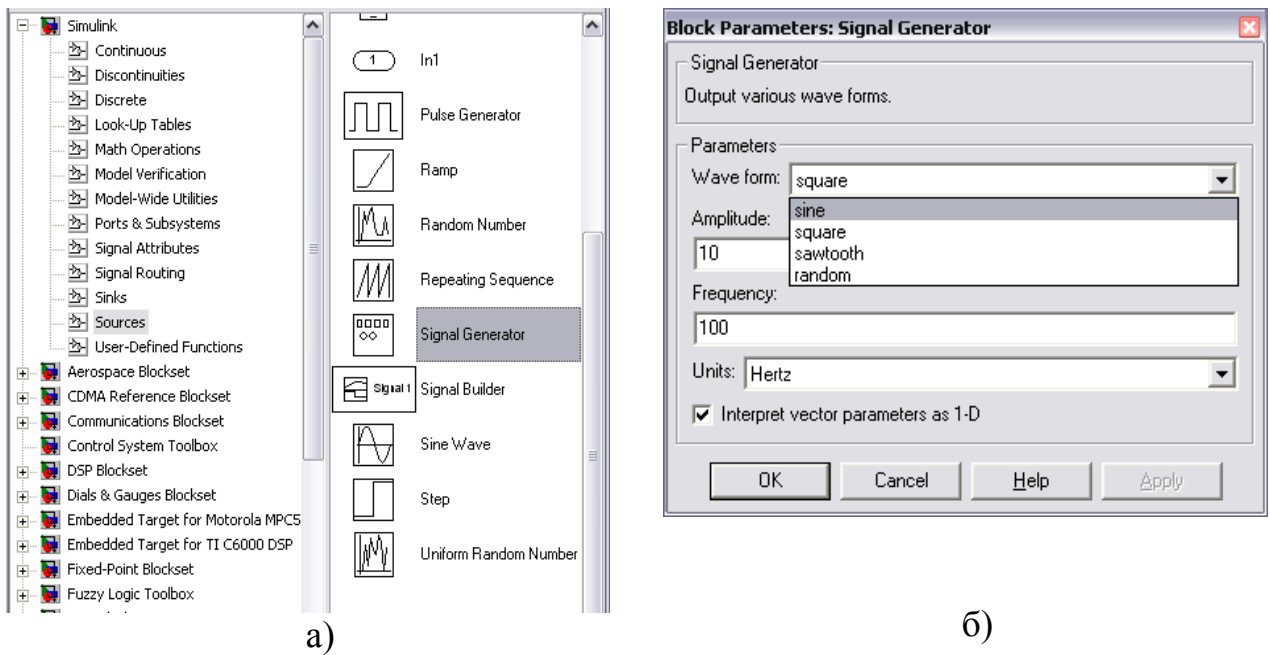


Рис. 16 – Расположение блока Signal Generator(а) и окно настройки его параметров (б)

В графе Waveform задается форма сигнала: sine – синусоидальный сигнал, square – прямоугольный сигнал, sawtooth – пилообразный сигнал, random – случайный сигнал (шум). В графах Amplitude и Frequency задается амплитуда и частота сигнала. В графе Units задается единица измерения, в которых задана частота (Hertz– Герцы или rad/sec – рад/сек.) [2].

Для визуального просмотра сигналов используют блоки, которые при моделировании играют роль смотровых окон; к ним также относится блок Scope (осциллограф)(Simulink /Sinks/ Scope), Рис. 17.

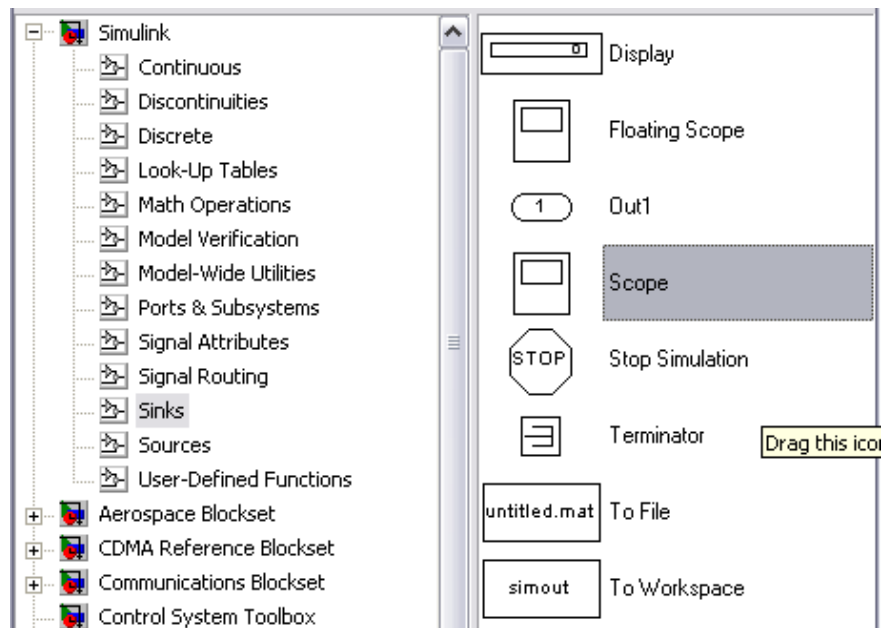
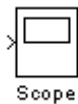


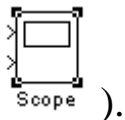
Рис. 17 – Расположение блока Scope

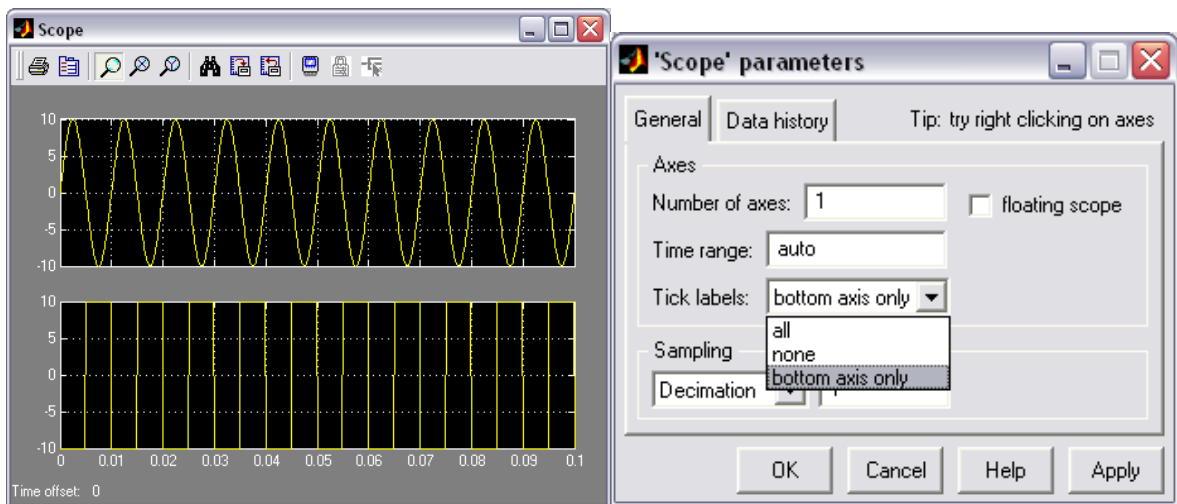
Блок Scope имеет один вход и позволяет в процессе моделирования наблюдать интересующие пользователя процессы. Чтобы просмотреть сигнал, нужно дважды щелкнуть мышью на



пиктограмму Scope. Основным параметром осциллографа является количество входов (т.е. количество отображаемых сигналов, одновременно в окне может отображаться до 30 сигналов).

В зависимости от количества сигналов осциллограф может иметь несколько экранов. Экран осциллографа с двумя входами выглядит так, как показано на рис.18, а (пиктограмма выглядит так












а)

б)

Рис. 18 – Экран осциллографа Score с двумя входами (а) и окно настройки параметров (б)

Для управления параметрами графиков и выполнения над ними различных действий в окне имеется панель инструментов, содержащая несколько пиктограмм со следующими назначениями:

-  печать содержимого окна Score;
-  вызов окна настройки параметров блока Score;
-  изменение масштаба осей графиков;
-  изменение масштаба по горизонтальной оси;
-  изменение масштаба по вертикальной оси;
-  автоматическая установка оптимального масштаба осей (автошкала);
-  сохранение установленного масштаба осей.

Нажатие пиктограммы  приводит к появлению окна настройки параметров Score (Score parameters), Рис.19, б.

В графе Number of axes задается количество входов осциллографа, Time range – верхний предел времени, отображаемого на оси абсцисс, Tick labels – отображение осей координат (all – все оси, none – нет осей, bottom axis only – только горизонтальная ось). Рекомендуется использовать настройки, выставленные по умолчанию.

### 3.4.3 Режимы моделирования систем в программе Simulink (меню Simulation)

Несмотря на то, что меню Simulation (моделирование) содержит всего несколько команд (рис. 19), именно они играют основную роль при проведении исследований модели. Посредством этих команд разработчик получает возможность не только динамически управлять сеансом моделирования, но и изменять многие важнейшие параметры модели, такие, например, как способ изменения модельного времени, алгоритм расчета и формат представления результатов моделирования [2].

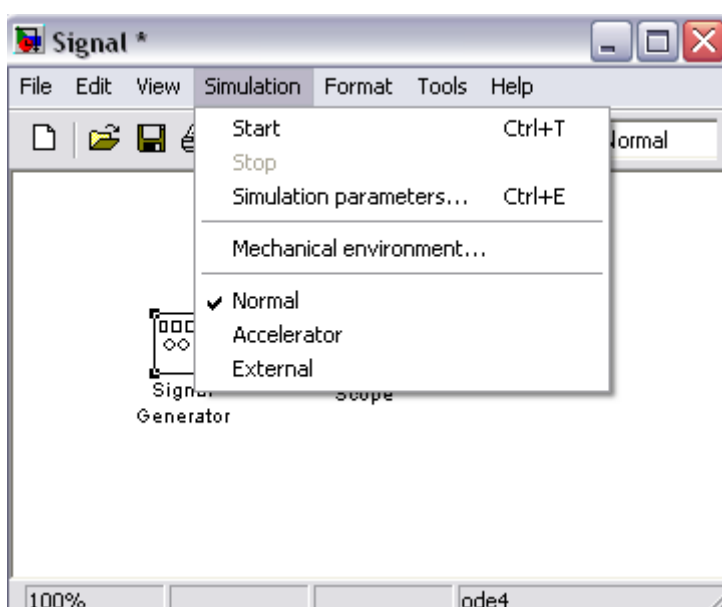


Рис. 19 – Меню Simulation.

Рассмотрим подробнее средства управления моделью и параметрами сеанса моделирования, которые предоставляет исследователю окно Simulation Parameters (параметры моделирования), Рис. 20. Элементы управления на вкладке Solver собраны в три группы.

Simulation time (интервал моделирования) – выбор интервала моделирования посредством указания начального (Start time) и конечного (Stop time) значений модельного времени [2].

Solver options (параметры расчета) – выбор метода реализации (расчета) модели.



Output options (параметры вывода) – параметры вывода выходных параметров моделируемой системы (при моделировании с переменным шагом).

Под выбором метода реализации модели имеется в виду следующее. Имея структуру исследуемой системы в виде блок-диаграммы, разработчик может выбрать метод отображения хода моделирования.

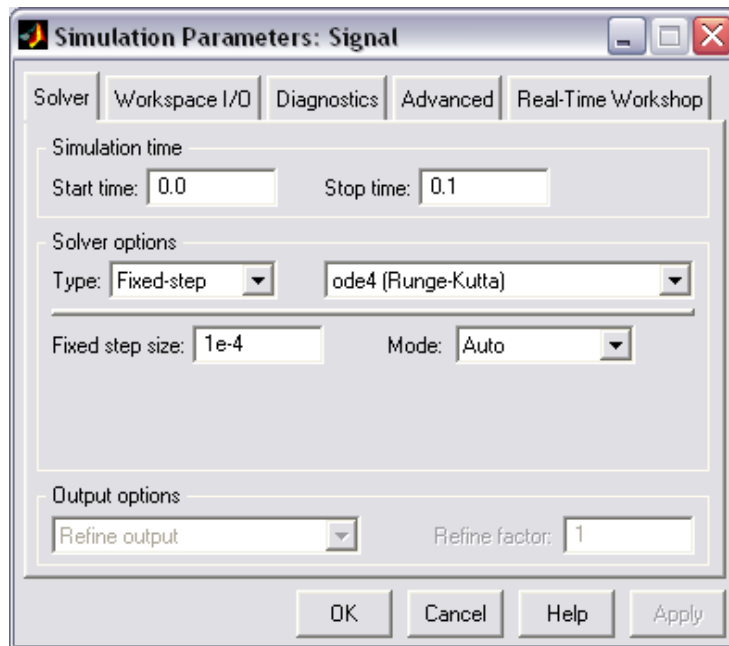


Рис. 20 – Окно установки параметров моделирования.

С помощью двух раскладывающихся списков Type (Тип) система может быть реализована в следующих формах:

- с дискретными состояниями и дискретным временем перехода из одного состояния в другое;
- с дискретными состояниями и непрерывным временем перехода;
- с непрерывными состояниями и дискретным временем переходов;
- с непрерывными состояниями и непрерывным временем переходов.

Первый список (слева) позволяет выбрать способ изменения модельного времени:

- Variable – step (переменный шаг) – моделирование с переменным шагом;

- Fixed – step (фиксированный шаг) – моделирование с фиксированным шагом.

Второй список (справа) позволяет выбрать метод расчета нового состояния системы. Первый вариант (discrete) обеспечивает расчет дискретных состояний системы. Остальные пункты списка обеспечивают выбор метода расчета нового состояния для непрерывных систем. Эти методы различаются для переменного (Variable – step) и для фиксированного (Fixed – step) шага времени, но основаны на единой методике – решение обыкновенных дифференциальных уравнений(ode).

Ниже двух раскрывающихся списков Type находится поле, название которого изменяется в зависимости от выбранного способа изменения модельного времени (рекомендуется оставить параметры по умолчанию).

Параметры других вкладок также можно использовать по умолчанию[2].

### **3.5 Методические рекомендации**

#### **3.5.1 Варианты заданий**

1.  $F_c=100$  Гц,  $K_0=10$ .
2.  $F_c=200$  Гц,  $K_0=20$ .
3.  $F_c=300$  Гц,  $K_0=30$ .
4.  $F_c=400$  Гц,  $K_0=40$ .
5.  $F_c=500$  Гц,  $K_0=50$ .
6.  $F_c=600$  Гц,  $K_0=60$ .

### 3.5.2 Задание

1) Создать модель фильтра в программе Simulink.

Подготовить и ввести в программу исходные данные в соответствии с заданным вариантом, необходимые для синтеза аналогового ФНЧ: аппроксимация – по Баттерворту; частота среза  $F_c$ ; коэффициент усиления  $K_0$ ; порядок фильтра  $N=2$ .

ФНЧ Баттерворта второго порядка определяется следующим образом:

$$H(s) = \frac{B_0}{A_0 + A_1 \cdot s + A_2 \cdot s^2},$$

где  $B_0=K_0$ ,  $A_0=1$ ,  $A_1 = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot F_c}$ ,  $A_2 = \frac{1}{[2 \cdot \pi \cdot F_c]^2}$ .

2) Подать на вход ФНЧ единичное ступенчатое воздействие. Вычислить переходную характеристику системы  $h_1(t)$ . Построить графики входного ступенчатого воздействия и переходной характеристики на экране осциллографа Scope.

Определить время установления  $t_{уст}$  выходного сигнала на уровне 95 % (или 105 % при наличии колебательного переходного процесса).

3) Выбрать в качестве входного гармонический сигнал  $X(t)$  с частотой  $F_x$  равной частоте среза фильтра  $F_c$  и единичной амплитудой. Построить графики входного  $X(t)$  и выходного сигнала  $Y(t)$ .

4) Повторить предыдущий пункт для гармонического сигнала с частотой  $F_x=2 \cdot F_c$ .

## 4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение импульсной характеристики фильтра.
2. Какими уравнениями описывается работа ЛДС?
3. Дайте определение передаточной характеристике ЛДС.
4. Как оценивается устойчивость ЛДС?
5. Изобразите структуру БИХ-фильтра.
6. Запишите выражение для передаточной характеристики КИХ-фильтра.
7. Запишите выражение для передаточной характеристики БИХ-фильтра.
8. Какие встроенные функции MATLAB позволяют вычислить ИХ и реакцию на выходе ЛДС?
9. Что такое импульсная и переходная характеристика системы. Взаимосвязь импульсной и переходной характеристик.
10. Взаимосвязь импульсной характеристики и передаточной функции системы.
11. Как определяются время установления системы и частоты среза АЧХ.
12. Указать где и в каком порядке должны быть введены значения в блоке параметров фильтра Transfer Fcn, если передаточная функция
$$H(s) = \frac{1 \cdot s^2 + 2}{3 + 4 \cdot s + 5 \cdot s^2} \cdot$$
13. Каким образом можно одновременно проанализировать три сигнала с разных источников.
14. Как задать интервал времени моделирования в программе Simulink.
15. Какие блоки программы Simulink используются для создания гармонических сигналов, ступенчатых воздействий, прямоугольных и треугольных импульсов.

## **5 Список использованных источников**

1 Давыденко И.Н. Методы и средства цифровой обработки сигналов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1: Методы ЦОС[текст]/ И.Н. Давыденко, И.Г. Давыдов, Т.А. Дубновицкая, А.В. Цурко. – Минск: БГУИР, 2015.– 70 с.

2 Якимов Е.В. Моделирование линейных систем в пакете программ. Методические указания [текст]/ Е.В. Якимов. – Томск: Томский политехнический университет, 2010.– 12 с.

# МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
Учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
по курсу «Цифровая обработка сигналов»

Курск 2018

УДК 621.391.26 (076)

Составители: А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, В.В. Карелкин,  
Н.А. Архипенко, А.Б. Шишков, К.О. Михайлов

Рецензент

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры *В.Г. Андронов*

**Преобразование сигналов при цифровой обработке:**  
методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-  
Зап. гос. ун-т; сост. А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, В.В. Карелкин,  
Н.А. Архипенко, А.Б. Шишков, К.О. Михайлов. – Курск, 2018.- 16 с.:  
ил. 17. – Библиогр.: с. 16.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат инструкции по методам проведения экспериментов для изучения эффектов, возникающих при преобразовании аналогового сигнала в цифровую форму и способов реализации оцифровки аналогового сигнала в среде математического моделирования MATLAB (пакет визуального моделирования Simulink), задания по выполнению работы, а также перечень вопросов для самоконтроля.

Полученные знания в результате выполнения работы позволят сформировать представления о преобразованиях сигнала, происходящих при цифровой обработке, представляют собой фундаментальные понятия, необходимые для изучения остальных дисциплин профессионального цикла учебного плана, и могут быть использованы в будущей профессиональной деятельности выпускника.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 очной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x841/16.  
Усл. печ. л. 0,93 . Уч.-изд. 0,84 Л. Тираж 100 экз. Заказ Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## 1 Цель работы

Изучение эффектов возникающих при преобразовании аналогового сигнала в цифровую форму.

## 2 Средства, используемые при выполнении лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере в среде математического моделирования MATLAB (пакет визуального моделирования Simulink).

## 3 Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа состоит из четырех частей. В первой части изучаются эффекты, возникающие при дискретизации аналогового сигнала. Во второй части рассматриваются случаи дискретизации импульсных сигналов. В третьей и четвертой частях изучаются шумы квантования, возникающие при аналого-цифровом и цифро-аналоговом преобразовании для различных методов квантования с усечением и округлением.

### 3.1 Изучение эффектов наложения возникающих при дискретизации

Для проведения эксперимента, необходимо собрать схему из типовых элементов, используя при этом браузер библиотеки Simulink, рис.1.

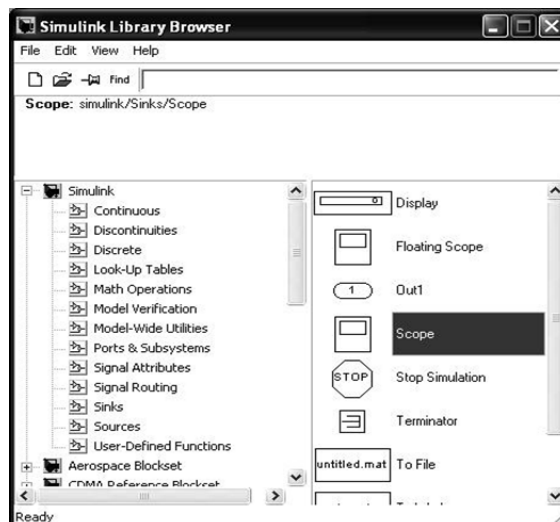


Рис. 1 – Окно браузера библиотеки Simulink



Схема 1 используется для изучения эффектов наложения спектра возникающих при дискретизации аналогового сигнала на примере гармонических колебаний имеющих разные частоты, рис.2.

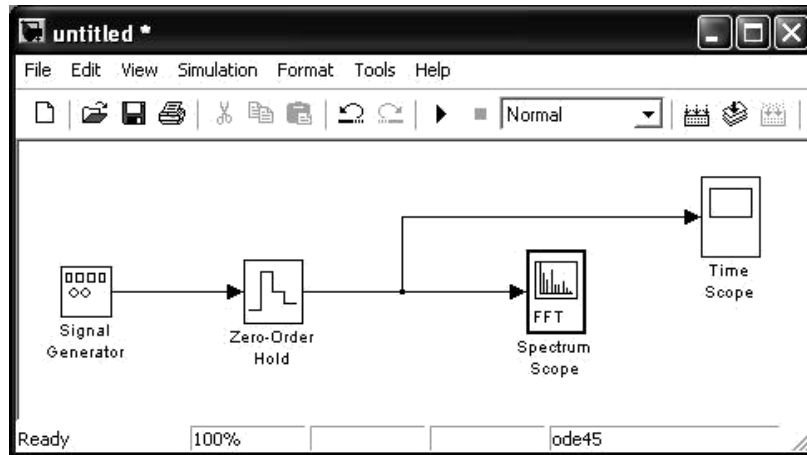


Рис. 2 – Схема 1 для изучения эффектов наложения при дискретизации аналогового сигнала

Провести настройку генератора сигналов, выбрав вид сигнала SINE, амплитуду выходного сигнала 1 вольт и частоту 1 кГц. Настроить экстраполятор нулевого порядка (Zero-OrderHold) на частоту дискретизации 48 кГц, рис. 3.

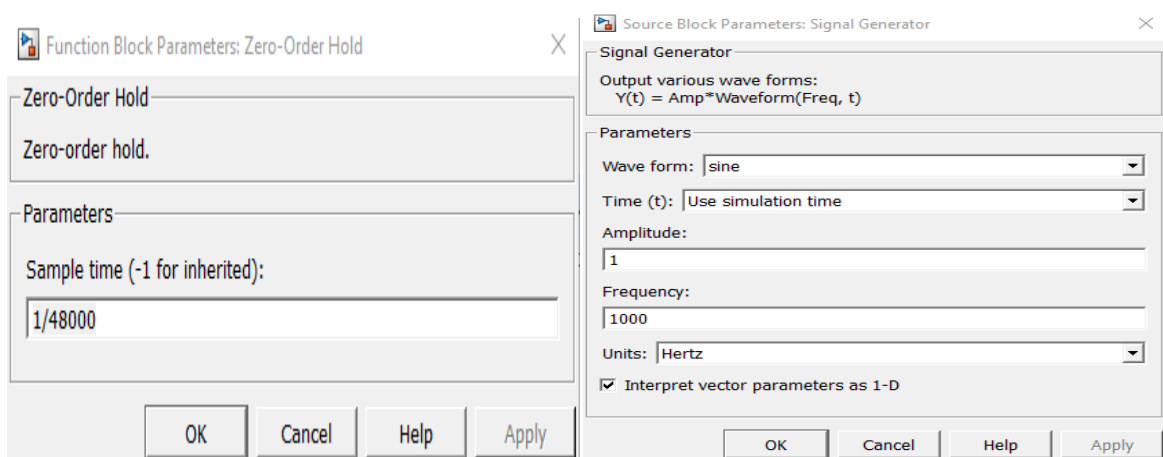


Рис. 3 – Окна настроек параметров экстраполятора нулевого порядка и генератора сигналов

Далее необходимо настроить осциллограф, рис. 4, причем во вкладке "история" ("History") необходимо убрать галочку ограничения объема отображаемых точек [1].

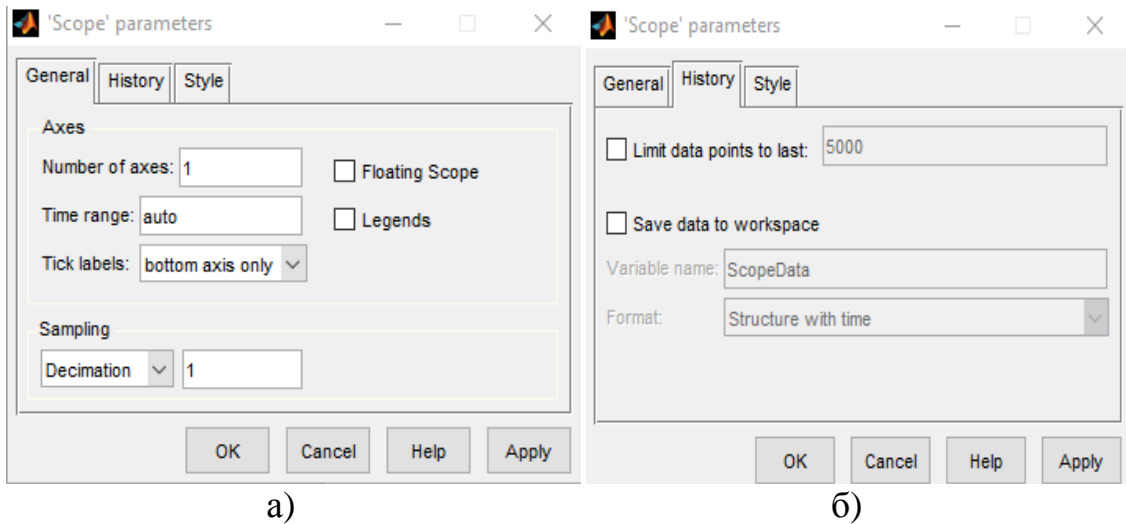


Рис. 4 – Окна настройки осциллографа

Анализатор спектра необходимо настроить, как показано на рис. 5, выбрав в (Spectrumunits) dBW, (Spectrumtype) «One-sided», размер входного буфера (Buffersize) 4096, перекрытие буферов (Bufferoverlap) 64 и длину БПФ (FFTLlength) 4096.

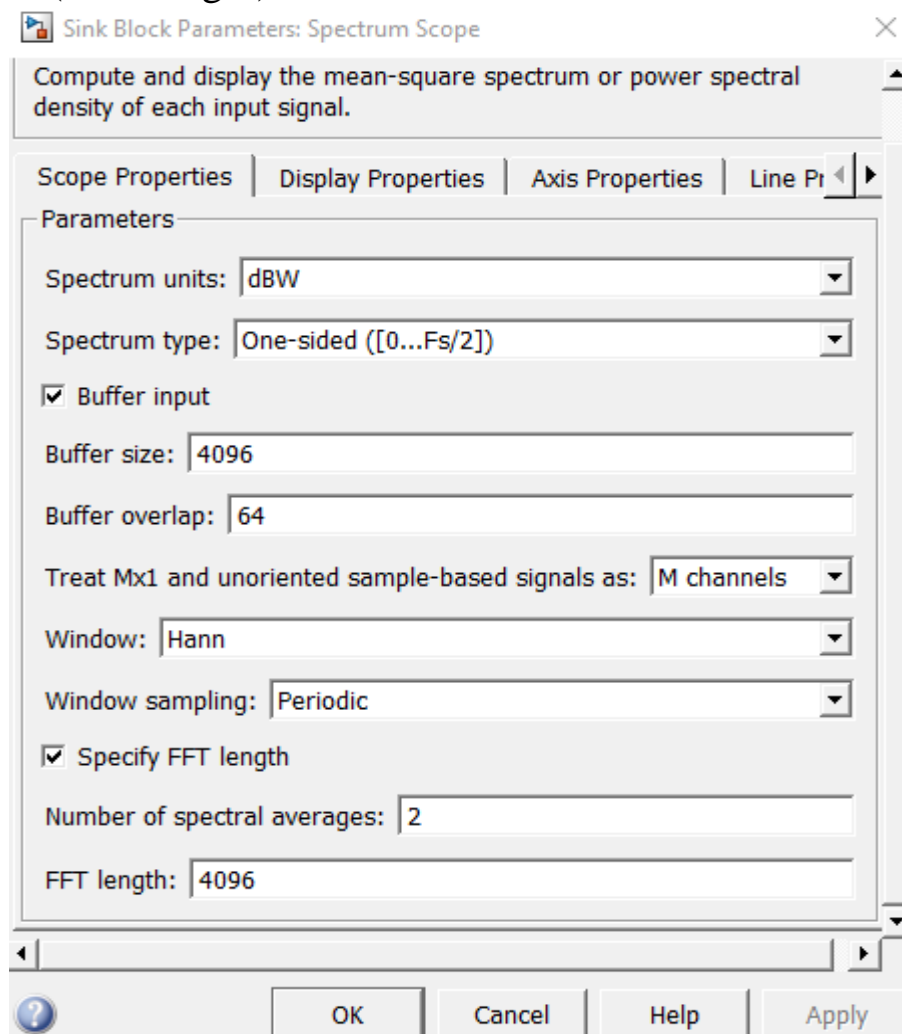


Рис. 5 – Окно настройки спектроанализатора

Запустив схему на выполнение необходимо посмотреть сигнал, получаемый в окнах Time Scope и Spectrum Scope. После чего требуется провести эксперимент для частот в диапазоне от 1 КГц до 96 КГц, с шагом 20 кГц. Отобразить получаемые результаты с объяснениями в отчете.

Примечание – для правильного отображения выходного сигнала необходимо увеличить его по оси «X», воспользовавшись функцией «Zoom X-axis» (Рис.6)

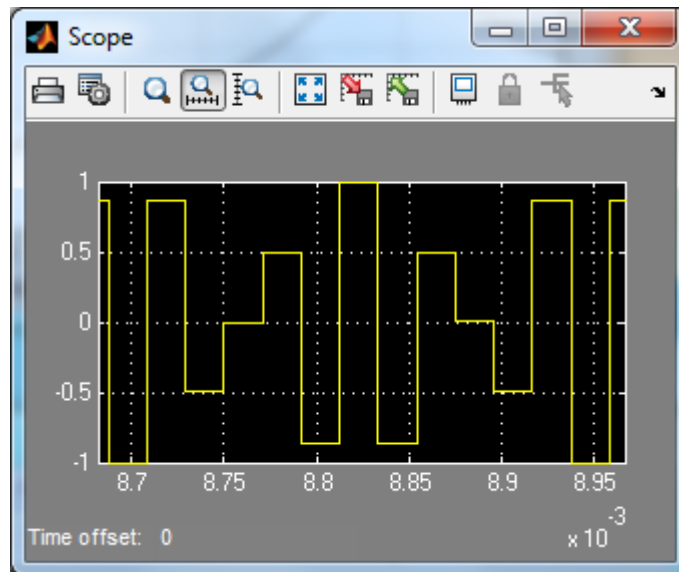


Рис. 6 – отображение выходного сигнала с помощью функции «Zoom X-axis»

### 3.2 Изучение влияния ограничения спектра аналогового сигнала при дискретизации

Собрать схему 2 рис.7. Провести настройку генератора импульсных сигналов (Pulse Generator) (согласно рисунку 8), выбрав амплитуду импульсов 1 вольт; частоту следования – 1КГц (так как частота - величина обратная периоду, то период следования равен 1/1000Гц) и длительность импульса 20%.

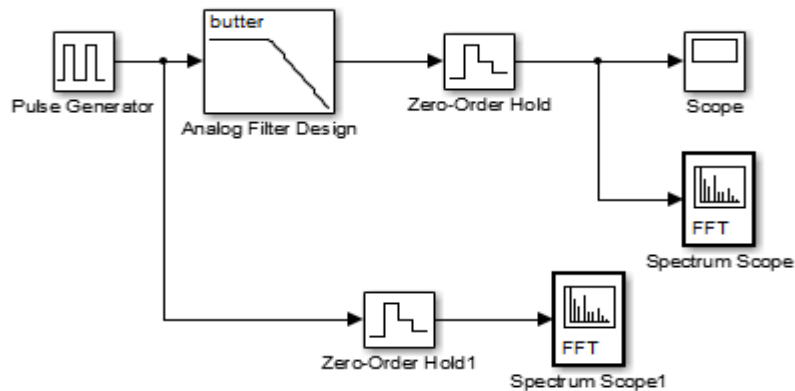


Рис. 7 – Схема 2 используемая для изучения влияния ограничения спектра аналогового сигнала при дискретизации

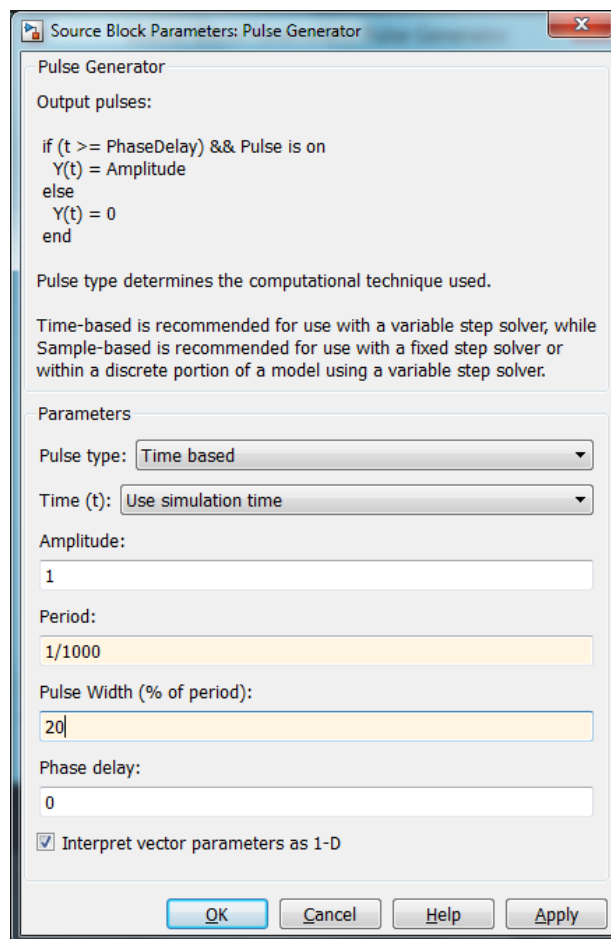


Рис. 8 – Настройка генератора импульсных сигналов (Pulse Generator)

Настроить аналоговый противомаскировочный фильтр (Analog Filter Design) рис.9 выбрав в качестве характеристики фильтра характеристику Батерворта, порядок 16 частоту среза 10 КГц. Частота

среза задается в виде  $2 \cdot \pi \cdot F_{\text{ср}}$ , так как в Matlab частота среза выражена в рад/с. Настроить и Spectrum Scope (рис. 10)

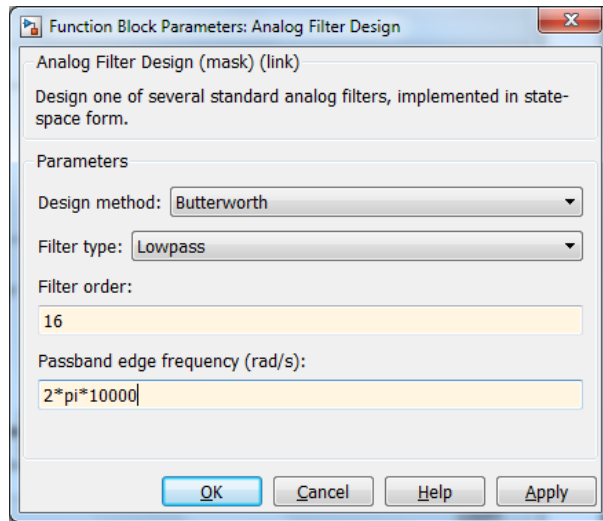


Рис. 9 – Окно настройки аналогового фильтра

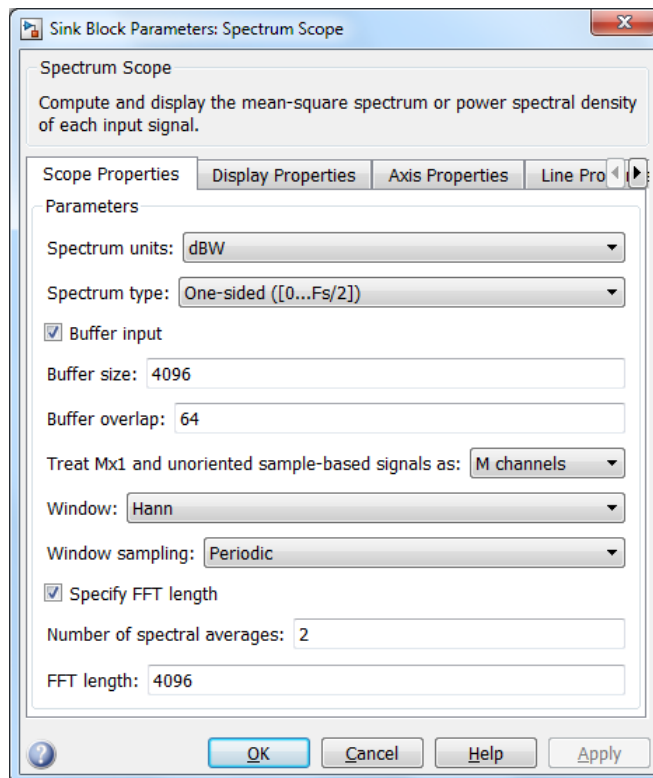



Рис.10 – Настройка Spectrum Scope

Запустить схему. Сравнить спектры, получаемые до аналогового фильтра и после него . Сделать эксперимент для различных частот среза фильтра, его характеристики и порядка. В качестве частот среза выбрать значения 2, 5 и 10 кГц. Эксперимент провести для фильтров с

характеристиками Чебышева и Эллиптической. Порядок фильтра выбрать равным: 16, 8 и 2 [1]. Полученные результаты с объяснениями отразить в отчете (в итоге требуется отобразить: спектрограмму исходного сигнала; спектрограммы и осциллограммы выходных сигналов с именованными параметрами).

### 3.3 Изучение квантования методом усечения

Собрать схему 3, приведенную на рис.11. Провести настройку генератора сигналов, выбрав вид сигнала SINE, амплитуду выходного сигнала 1 вольт и частоту 10Гц [1].

Примечание – блок Sum  находится в библиотеке Commonly Used Blocks

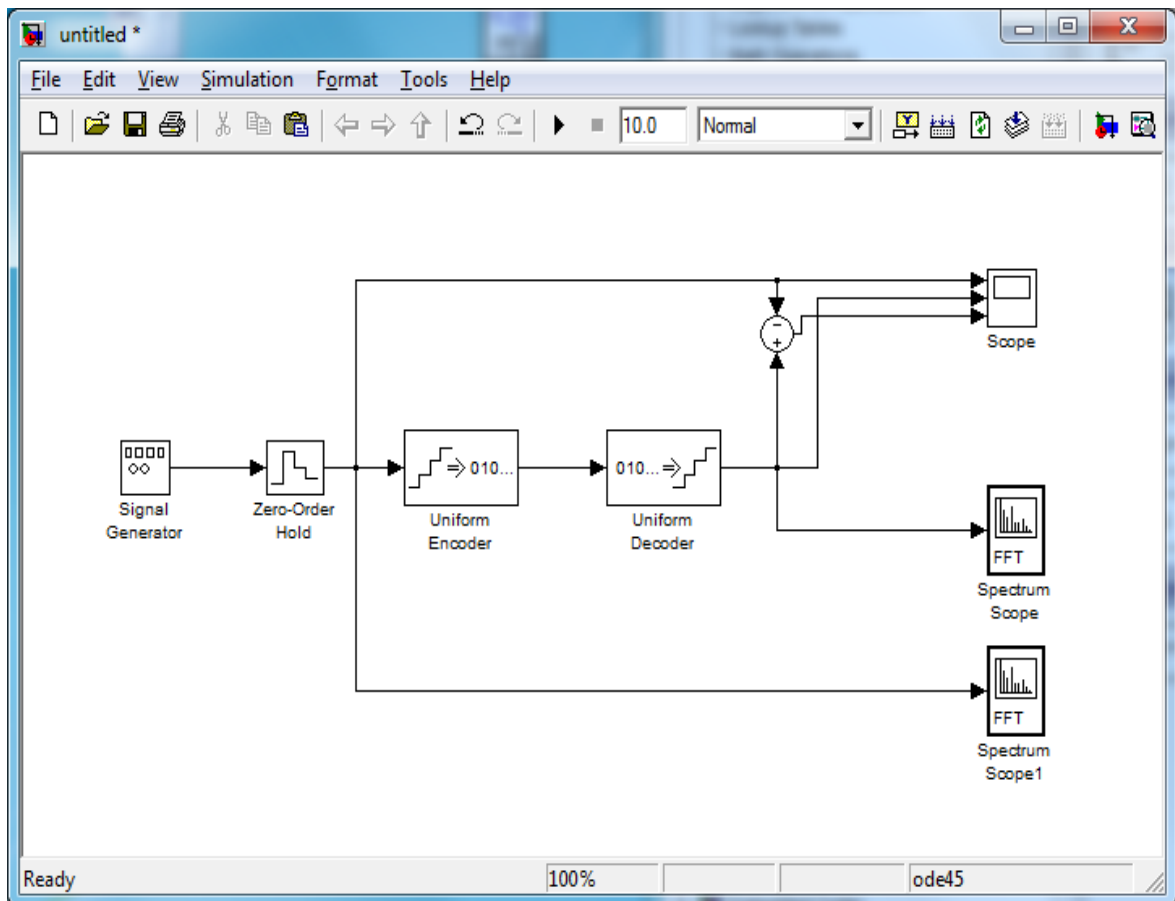


Рис. 11 – Схема 3 используемая для изучения квантования методом усечения

Далее необходимо установить частоту дискретизации 1кГц в блоке Zero-Order Hold. Сделать длительность симуляции 10 секунд. Для

проведения исследований необходимо выбрать разрядность АЦП (Uniform Encoder) и ЦАП (Uniform Decoder) – 2 разряда, рис.12.

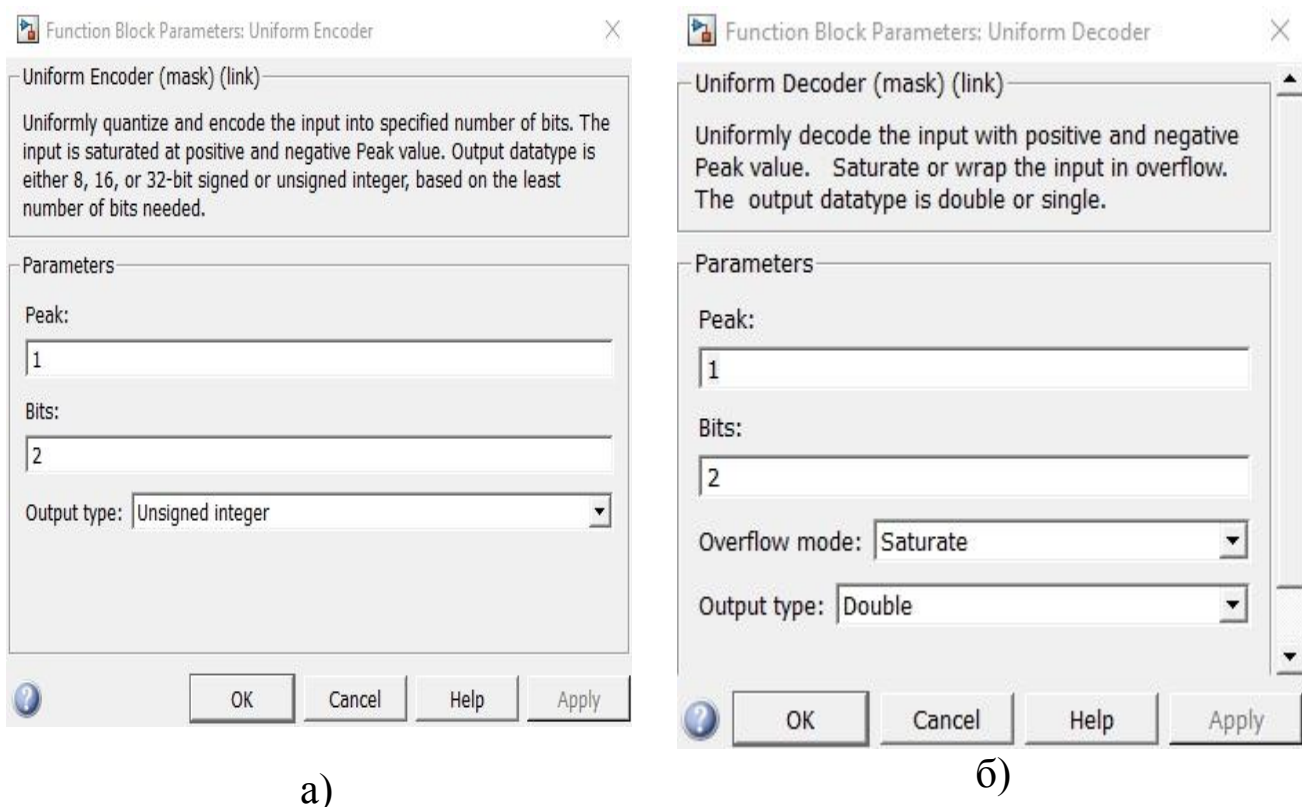


Рис. 12 – Окна настройки АЦП И ЦАП:  
а) окно настройки АЦП; б) окно настройки ЦАП

Анализаторы спектров необходимо настроить аналогично первому эксперименту.

Запустить модель. Проанализировать полученные результаты. Прodelать эксперимент для значений разрядности 4, 8, 16 ( в АЦП и ЦАП). Все полученные результаты с объяснениями привести в отчете.

### 3.4 Изучение квантования методом округления сигнала

Собрать схему 4, приведенную на рис.13.

Примечание – настройки блока Sum приведены на рис.14.

Провести настройку генератора сигналов, как показано на рис. 15, выбрав вид сигнала SINE, амплитуду выходного сигнала 1 вольт и частоту 10Гц.

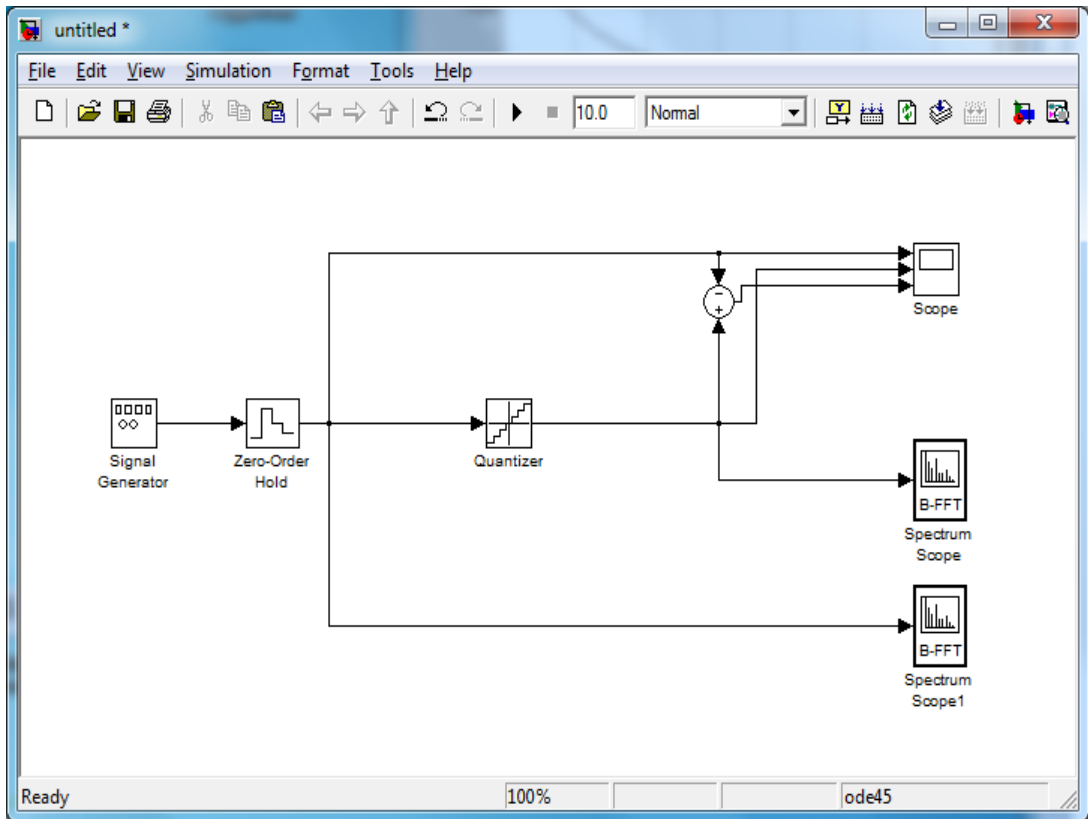


Рис. 13 – Схема 4 применяемая для изучения квантования сигналов округлением

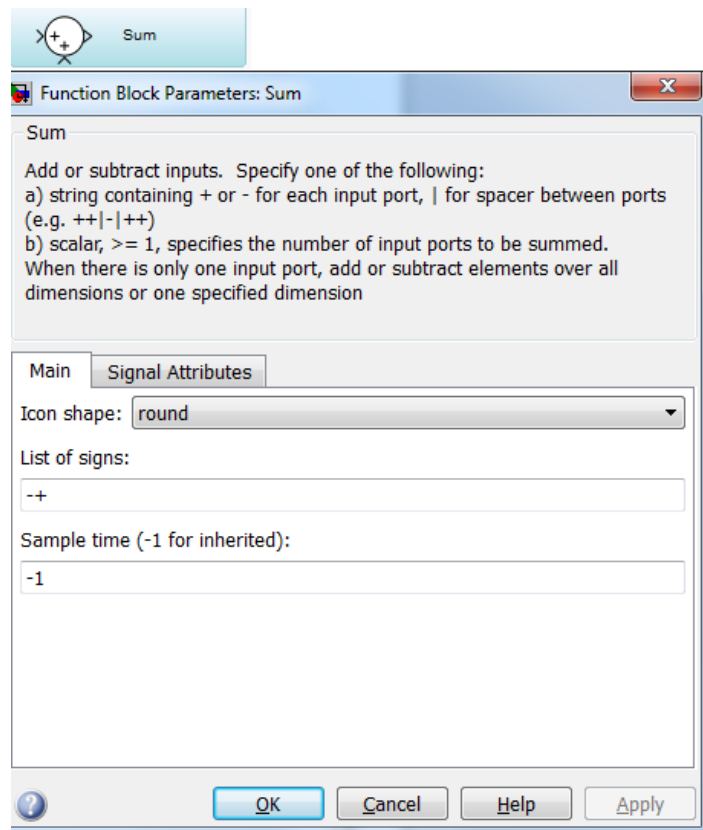


Рис. 14 – Блок Sum и его настройки



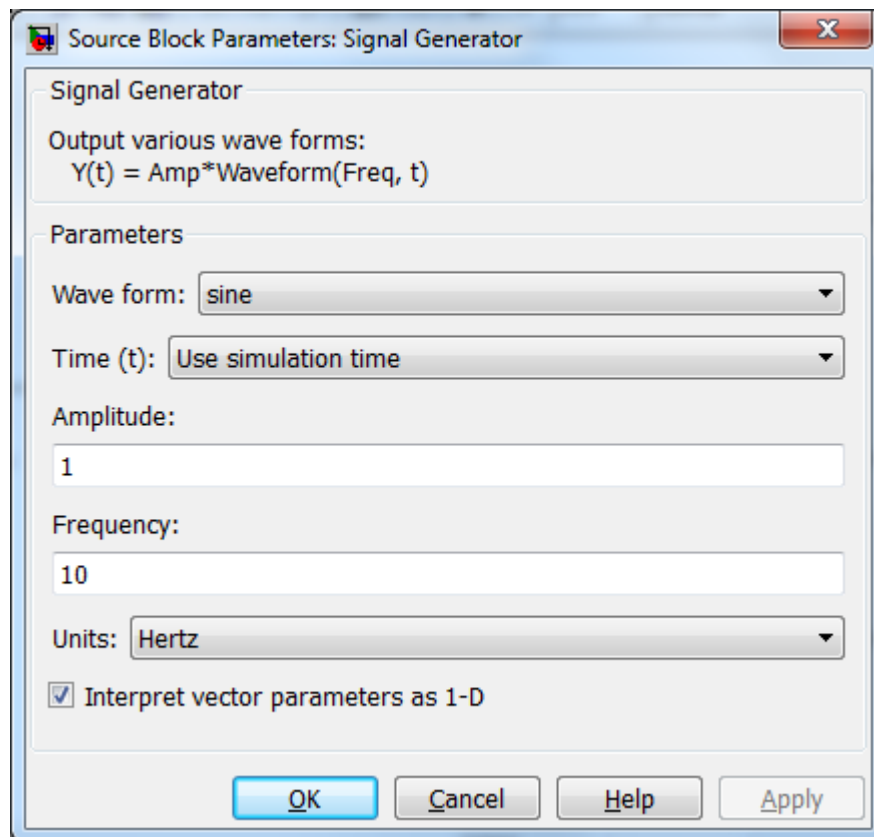


Рис. 15 – Окно настройки генератора сигналов

Анализатор спектра необходимо настроить, как показано на рис. 16, выбрав размер входного буфера (Buffersize) 4096, перекрытие буферов (Bufferoverlap) 64 и длину БПФ (FFTLlength) 4096.

Установить частоту дискретизации 1КГц. Сделать длительность симуляции 10 секунд. Выбрать число уровней квантования 2 (в настройках Quantizer задается интервал квантования, который равен единице деленной на уровень квантования) как показано на рис.17.

Запустить модель. Проанализировать полученные результаты. Провести эксперимент для значений числа уровней квантования равных 2, 8 и 16. Полученные результаты с объяснениями привести в отчете.

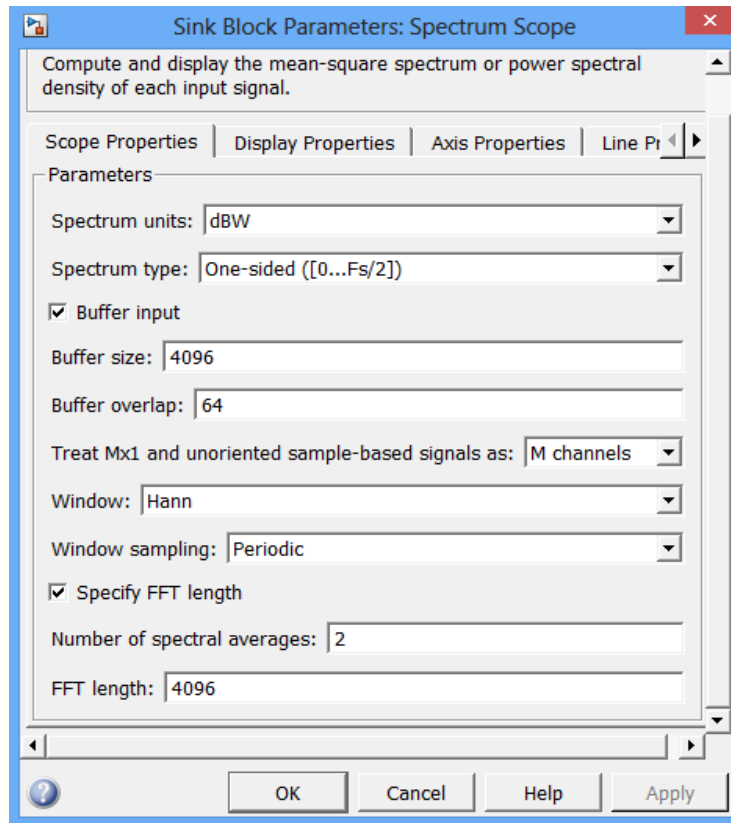


Рис. 16 – Окно настройки спектроанализатора

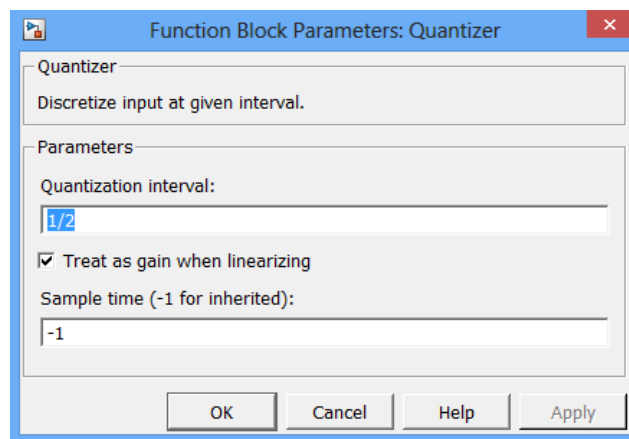


Рис. 17 – Окно настройки квантователя

#### **4 Содержание отчета лабораторной работы**

- Цель работы.
- Схемы моделей.
- Результаты экспериментов с объяснениями и выводами.
- Письменный ответ на контрольные вопросы.

## 5 Контрольные вопросы

1. Какие преобразования сигналов имеют место в системе цифровой обработки аналоговых сигналов?
2. Что такое дискретный сигнал и дискретная последовательность?
3. В чем заключаются взаимосвязь и отличие спектров дискретного и аналогового сигналов?
4. Можно ли по известному спектру дискретного сигнала найти спектр соответствующего ему аналогового сигнала?
5. Как по известному спектру аналогового сигнала определить спектр соответствующего ему дискретного сигнала?
6. В чем заключается и как проявляется наложение спектров при дискретизации сигналов?
7. Из каких условий выбирается частота дискретизации аналоговых сигналов?
8. Каким образом могут быть уменьшены искажения, связанные с дискретизацией сигнала?
9. Покажите, как преобразуется спектр периодического сигнала при дискретизации с частотой, меньшей частоты сигнала?
10. Как изменяется спектр сигнала при цифроаналоговом преобразовании?
11. Как зависят искажения восстановления сигнала от частоты дискретизации и максимальной частоты его спектра в основной полосе?
12. Какова математическая модель квантования сигнала по уровню, т. е. алгоритм преобразования дискретного сигнала в дискретный квантованный?
13. Как определяется погрешность квантования дискретного квантованного сигнала?
14. Каков алгоритм преобразования дискретного квантованного сигнала в цифровой (алгоритм цифрового кодирования)?
15. При каком условии цифровой и дискретный сигналы математически адекватны?
16. Как выражаются погрешности квантования для цифрового сигнала, представленного в дробном формате?
17. Как определяется автокорреляционная функция и спектральная плотность шума квантования АЦП?
18. Из каких условий выбирается необходимая разрядность АЦП?

**6 Список источников**

1 Копысов А.Н., Марков М.М. Цифровая обработка радиолокационных сигналов; цифровая обработка сигналов и сигнальные процессы в системах подвижной радиосвязи. Методическое пособие к лабораторным работам. Ижевск: изд-во Иж. ун-та, 2014. – 28 с.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
Учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



**СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ В СРЕДЕ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЛАВ**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
по курсу «Цифровая обработка сигналов»

Курск 2018

УДК 621.391.26 (076)

Составители: А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, А. Б. Шишков, В. В. Карелкин

Рецензент

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор кафедры *В.Г. Андронов*

**Синтез цифровых фильтров в среде математического моделирования Matlab:** методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; А.А. Тимофеева, И.Г. Бабанин, А. Б. Шишков, В. В. Карелкин. - Курск, 2017.- 15 с. : ил. 10, табл 4. – Библиогр.: с. 15.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат инструкции по методам проведения экспериментов при синтезе цифровых фильтров в среде математического моделирования MATLAB и пакете визуального моделирования Simulink, задания по выполнению работы, а также перечень вопросов для самоконтроля.

Полученные знания в результате выполнения работы позволят сформировать представления о синтезе цифровых фильтров и представляют собой фундаментальные понятия, необходимые для изучения остальных дисциплин профессионального цикла учебного плана.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 очной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x841/16.  
Усл. печ. л. 0,87 . Уч.-изд. 0,79 Л. Тираж 100 экз. Заказ Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## 1 Цель работы

Изучение реализации и синтеза цифровых фильтров в среде математического моделирования MATLAB

## 2 Средства, используемые при выполнении лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере в среде математического моделирования MATLAB и пакете визуального моделирования Simulink.

## 3 Ход работы

### 3.1 Методика проведения лабораторной работы

Лабораторная работа состоит из двух частей. В первой части изучается синтез и реализация рекурсивных фильтров во второй части нерекурсивных фильтров.

Для проведения эксперимента, необходимо собрать схему по рис. 2 из типовых элементов, используя при этом браузер библиотеки Simulink, рис 1. Схема включает в себя генератор нарастающей частоты (ChirpSignal), экстраполятор нулевого порядка (Zero-OrderHold), исследуемого цифрового фильтра (DigitalFilterDesign), блока вычисления амплитуды и фазы комплексного числа (ComplextoMagnitude-Angle), буфера (Buffer), векторного анализатора (VectorScope) [1].

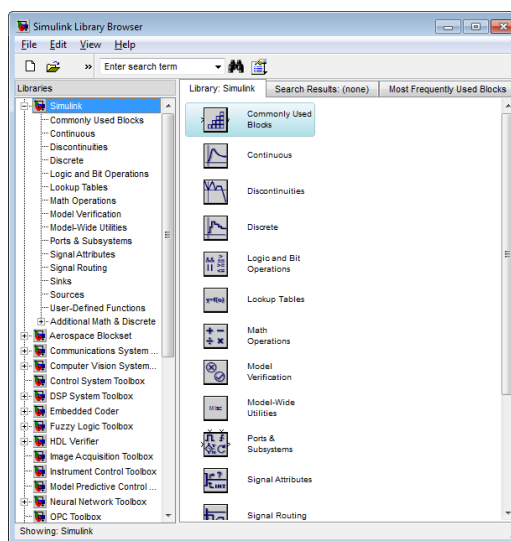


Рис. 1 – Окно браузера библиотеки Simulink



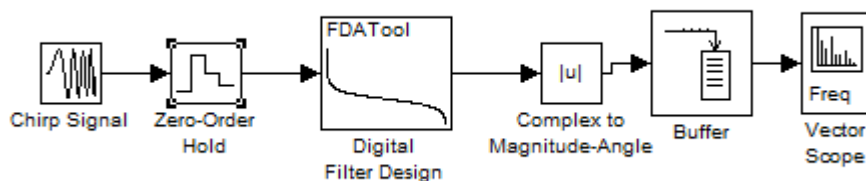


Рис. 2 – Схема, используемая в лабораторной работе

Произвести настройку параметров симулятора в соответствии с рис. 3.

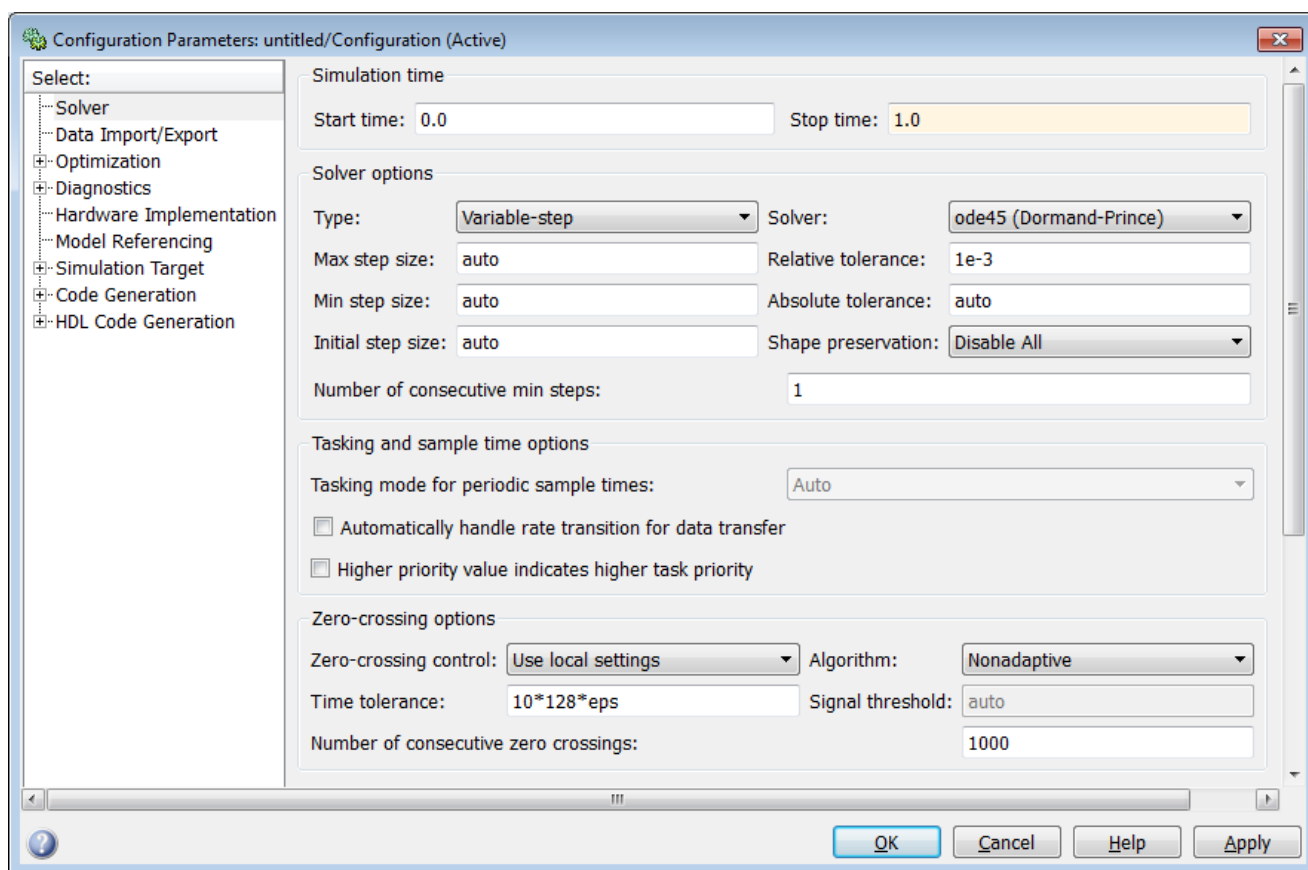


Рис. 3 – Окно настройки параметров Simulink

Установку основных параметров блоков, входящих в модель произвести в соответствии с рис. 4 – рис 8. Установив в генераторе нарастающей частоты изменение частоты от 0Гц до 24000Гц, а время нарастания 1 секунду [1].

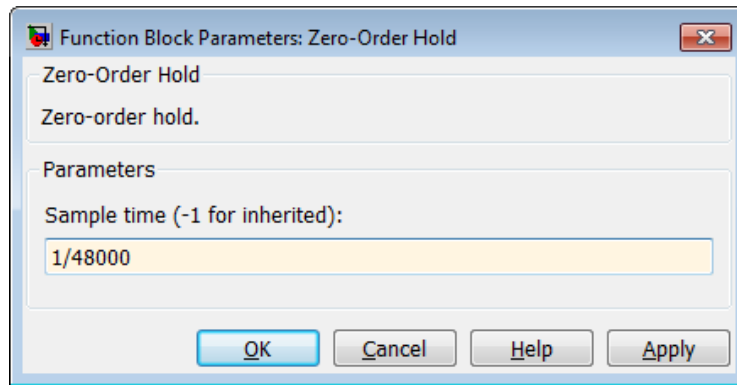


Рис. 4 – Окно настройки параметров экстраполятора нулевого порядка

В экстраполяторе нулевого порядка установить период дискретизации 1/48000 секунды.

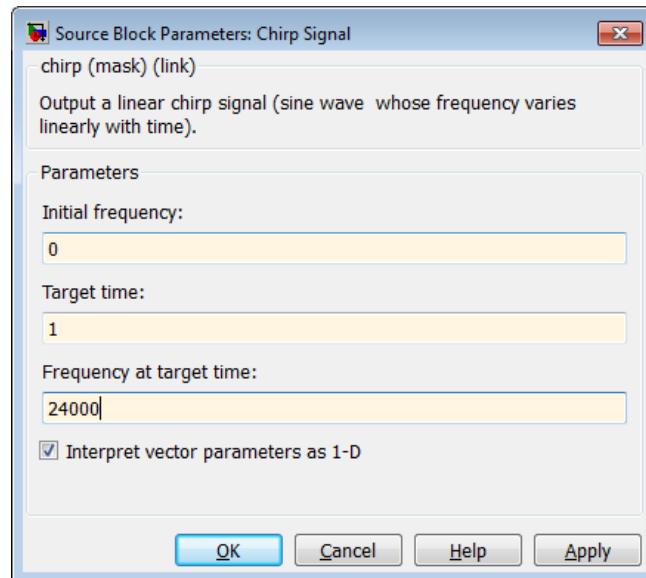


Рис. 5 – Окно настройки параметров генератора нарастающей частоты

Установить размер буфера 48000 отсчетов, рис. 6.

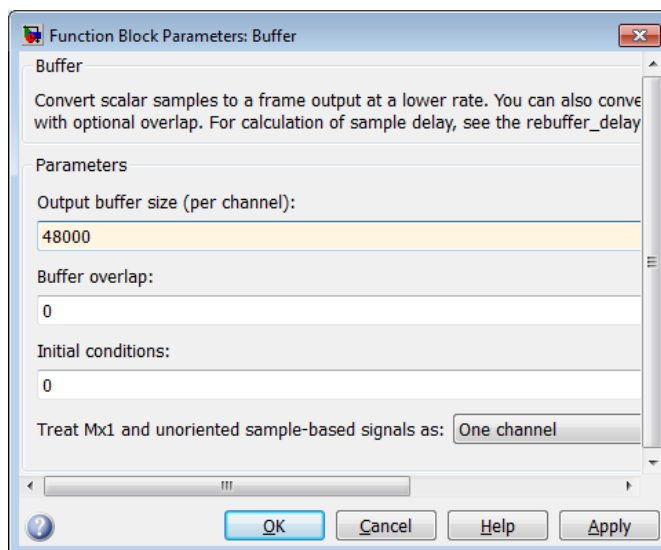


Рис. 6 – Окно настройки параметров буфера

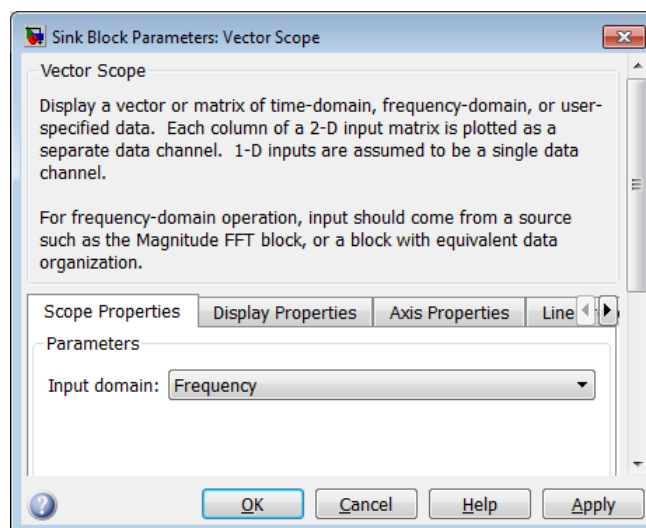


Рис. 7 – Окно настройки параметров входных данных векторного анализатора

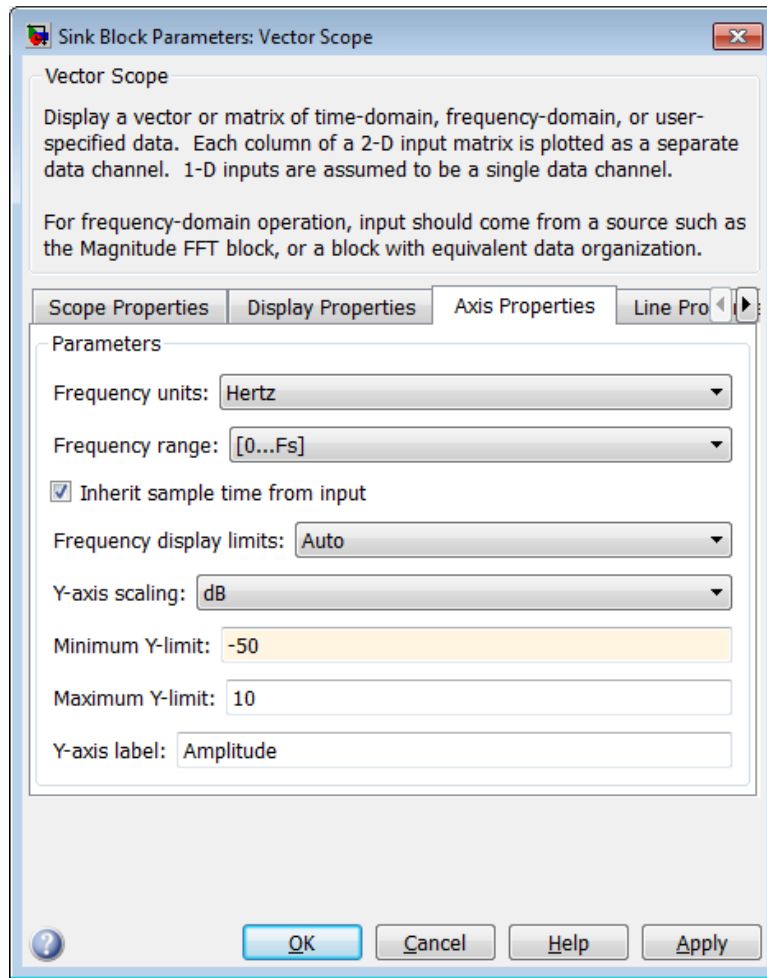


Рис. 8 – Окно настройки параметров осей векторного анализатора

Амплитудно-частотную характеристику моделируемого фильтра можно наблюдать в окне векторного анализатора рис. 9.

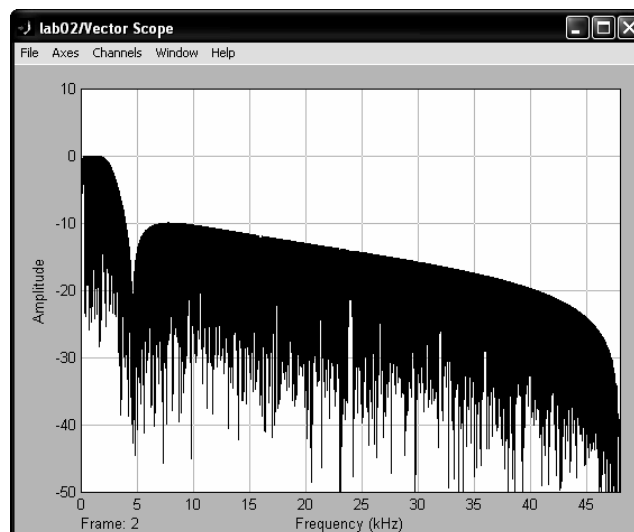


Рис. 9 – Окно векторного анализатора

Параметры исследуемого фильтра получить в соответствии с лабораторным заданием используя, конструктор цифровых фильтров рис. 10.

Необходимо учитывать, что на оси частот отложенная частота в два раза выше истинной частоты, а уровень амплитуды в дБ в два раза выше истинной [1].

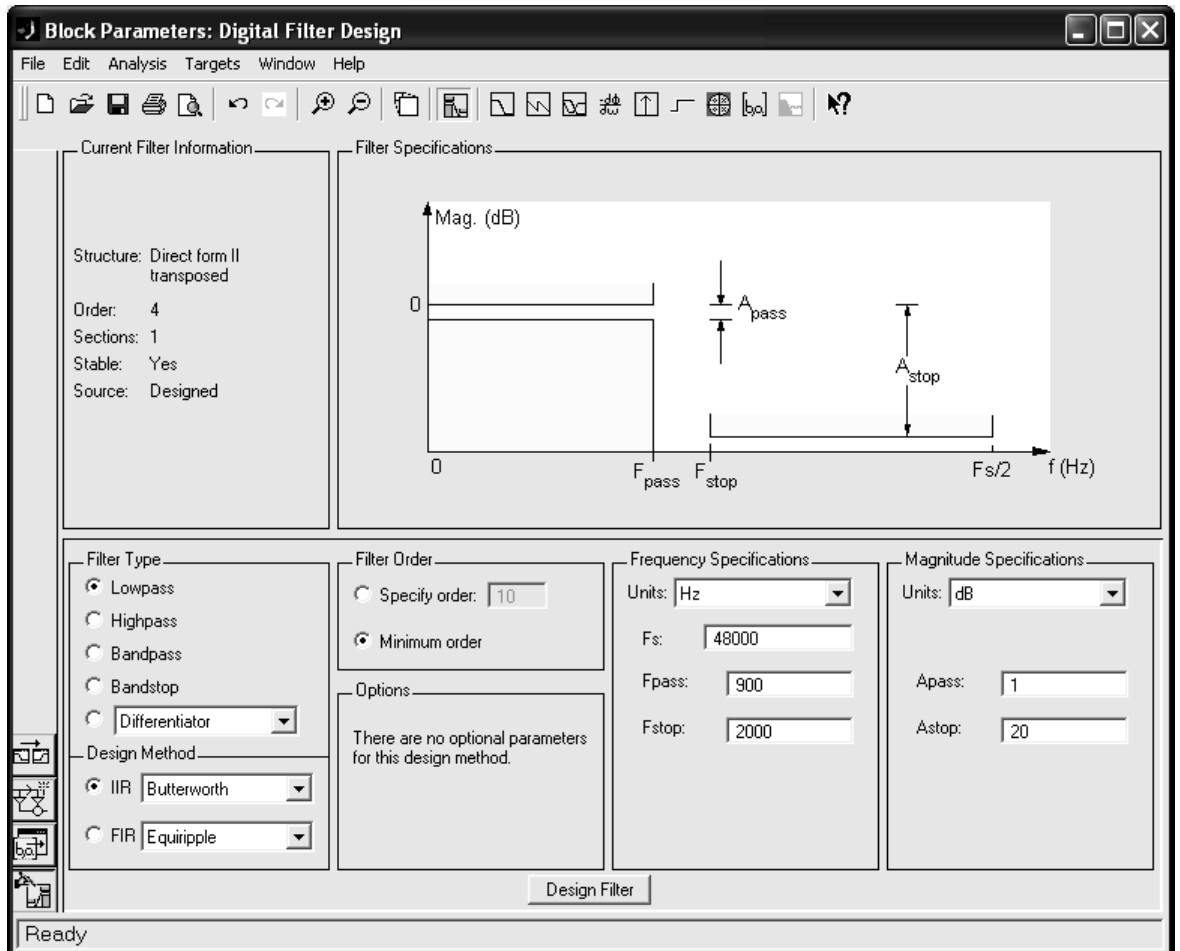


Рис. 10 – Окно блока DFD

### 3.2 Порядок выполнения работы

В первой части в соответствии с вариантом выданным преподавателем по характеристическим параметрам, приведенным в таблице 1 произвести расчет рекурсивных цифровых фильтров ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ для различных типов аппроксимирующих функций Баттерворта, Чебышева 1го типа, Чебышева 2го типа и эллиптического. Полученные порядки фильтров занести в отчете в таблицу 3 [1].

Провести моделирование одного из рассчитанных фильтров (согласно варианту) и сравнить полученную АЧХ с теоретической сделать выводы. Для одного из вариантов типа фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ), для одной из аппроксимирующих функций, привести АЧХ, ФЧХ, импульсную характеристику и ГВЗ. Проверить влияние для одного из фильтров неравномерности в полосе пропускания и величины затухания в полосе задержания на порядок фильтра. Отобразить полученные результаты в отчете.

Во второй части в соответствии с вариантом выданным преподавателем по характеристическим параметрам приведенным в таблице 2 произвести расчет одного из нерекурсивных цифровых фильтров (ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ) для заданного типа оконной функции(прямоугольной, треугольной, Хана, Хэмминга, Блэкмана и Кайзера и по методу Ремеза). Полученные порядки фильтров занести в лабораторном отчете в таблицу 4 [1]. В случае если для выбранного окна получить необходимое затухание невозможно, то произвести расчет для максимально возможного.

Провести моделирование каждого из рассчитанных фильтров и сравнить полученную АЧХ с теоретической, сделать выводы. Привести расчетные АЧХ, ФЧХ, импульсную характеристику ГВЗ для каждого типа фильтров (ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ) для одной из оконных функций. Проверить влияние для одного из фильтров неравномерности в полосе пропускания и величины затухания в полосе задержания на порядок фильтра. Отобразить полученные результаты в отчете..

Сравнить фильтры реализованные рекурсивные и нерекурсивные фильтры между собой.

Таблица 1 – Характеристические параметры

Номер варианта	Частота среза $f_{c1}$ [Гц]	Частота задержания $f_{z1}$ [Гц]	Частота среза $f_{c2}$ [Гц]	Частота задержания $f_{z2}$ [Гц]	Неравномерность в полосе пропускания [дБ]	Величина затухания в полосе задержания [дБ]	Тип фильтра для моделирования
1	200	100	900	1000	1	40	ФНЧ Баттерворта
2	500	400	1100	1200	1	40	ФНЧ Чебышева 1го типа
3	1000	900	1100	1200	1	40	ФНЧ Чебышева 2го типа
4	300	100	600	800	3	60	ФНЧ эллиптический
5	2000	1800	2200	2400	3	60	ФВЧ Баттерворта
6	3100	2600	3200	3700	3	60	ФВЧ Чебышева 1го типа
7	4000	3800	4100	4300	3	80	ФВЧ Чебышева 2го типа
8	5000	4600	5200	5600	0,1	80	ФВЧ эллиптический
9	7000	7500	8000	8500	0,1	80	ППФ Баттерворта
10	10000	8000	12000	14000	1	100	ППФ Чебышева 1го типа
11	10000	9000	12000	13000	1	100	ППФ Чебышева 2го типа
12	10000	7000	12000	15000	1	100	ППФ эллиптический
13	20000	19900	21000	21100	2	40	ПЗФ Баттерворта
14	20000	19900	20500	20600	2	40	ПЗФ Чебышева 1го типа
15	22000	21000	22500	23500	2	40	ПЗФ Чебышева 2го типа
16	14500	14000	16000	16500	2	60	ПЗФ эллиптический
17	16000	15000	16100	17100	0,5	60	ФВЧ Чебышева 2го типа
18	17000	16000	18000	19000	0,5	80	ФНЧ Баттерворта
19	18000	17500	18200	18700	0,5	80	ППФ эллиптический
20	19000	18500	19200	19700	0,5	80	ПЗФ Чебышева 2го типа

Для ФНЧ характеристическими частотами считать  $f_{c2}f_{32}$ , а для ФВЧ  $f_{c1}f_{31}$ . Для ПЗФ частоты среза и задержания поменять местами.

Таблица 2 – Характеристические параметры

№ варианта	Тип фильтра	Тип оконной функции
1	ФНЧ	Кайзера
2	ФНЧ	Блэкмана
3	ФНЧ	Прямоугольное
4	ФНЧ	Хэмминга
5	ФНЧ	Методом Ремеза
6	ФВЧ	Кайзера
7	ФВЧ	Треугольное
8	ФВЧ	Хэмминга
9	ФВЧ	Блэкмана
10	ФВЧ	Ханна
11	ППФ	Треугольное
12	ППФ	Прямоугольное
13	ППФ	Кайзера
14	ППФ	Хэмминга
15	ППФ	Ханна
16	ПЗФ	Прямоугольное
17	ПЗФ	Треугольное
18	ПЗФ	Блэкмана
19	ПЗФ	Ханна
20	ПЗФ	Методом Ремеза

Таблица 3 – Вид таблицы для первой части

	ФНЧ	ФВЧ	ППФ	ПЗФ
<b>Баттерворта</b>				
<b>Чебышева</b>				
<b>Чебышева 2</b>				
<b>Эллиптический</b>				



Таблица 4 – Вид таблицы для второй части

	<b>ФНЧ</b>	<b>ФВЧ</b>	<b>ППФ</b>	<b>ПЗФ</b>
<b>Прямоугольное</b>				
<b>Треугольное</b>				
<b>Ханна</b>				
<b>Хэмминга</b>				
<b>Блэкмана</b>				
<b>Кайзера</b>				
<b>Методом Ремеза (Equiripple)</b>				

#### **4 Содержание отчета лабораторной работы**

- Цель работы.
- Схема модели.
- Таблицы порядков фильтров.
- Результаты моделирования и расчетные значения с объяснениями.
- Письменные ответы на контрольные вопросы.

#### **5 Контрольные вопросы**

1. В соответствии с каким алгоритмом осуществляется обработка сигнала рекурсивным цифровым фильтром?
2. Как определяется импульсная характеристика цифрового фильтра, какие цифровые фильтры называют фильтрами БИХ и КИХ типа?
3. Какой смысл имеют коэффициенты нерекурсивных цифровых фильтров?
4. Возможна ли практическая реализация рекурсивных фильтров на основе дискретной временной свертки?
5. Как определяется Z-преобразование дискретных последовательностей, каковы его основные свойства и какую роль оно играет в теории цифровых фильтров?
6. Как определяются передаточная функция и частотная характеристика цифрового фильтра и какова их связь с его импульсной характеристикой?
7. В чем особенности частотных характеристик цифровых

фильтров и чем они обусловлены?

8. Как определяется передаточная функция рекурсивного фильтра по его разностному уравнению?

9. Какой вид имеет нуль-полюсная форма передаточной функции рекурсивного фильтра и каково ее практическое значение?

10. Как отображаются нули и полюсы цифрового фильтра на комплексной  $Z$ -плоскости и какую информацию о фильтре можно получить по картине его нулей и полюсов?

11. Какие возможны формы реализации рекурсивных фильтров и как они описываются математически?

12. Каковы структура и математическое описание прямой и канонической форм реализации рекурсивных звеньев второго порядка?

13. Какова связь между коэффициентами и нулями / полюсами для каскадной и параллельной форм реализации РФ?

14. Какова структура и математическое описание нерекурсивного фильтра на основе ДВС?

15. Каково условие линейности фазочастотной характеристики нерекурсивного фильтра?

16. Какой объем вычислительных операций выполняется в рекурсивном и нерекурсивном фильтрах при обработке одного отсчета сигнала?

17. Как аналитически может быть найден отклик рекурсивного и нерекурсивного фильтров на заданное входное воздействие?

18. Покажите, как найти отклик рекурсивного и нерекурсивного фильтров на сигнал типа единичный скачок в соответствии с алгоритмами обработки, которые они реализуют?

19. Каковы задачи и методы синтеза ЦФ по заданной частотной характеристике?

20. Что понимается под преобразующей функцией в методе синтеза РФ по аналоговому прототипу?

21. Каковы свойства билинейных преобразующих функций?

22. Как отображаются точки из комплексной  $P$ -плоскости на комплексную  $Z$ -плоскость при билинейном преобразовании?

23. Какова взаимосвязь между частотами аналогового и цифрового фильтров при билинейном преобразовании?

24. В чем преимущества применения обобщенных преобразований при синтезе РФ заданного типа (ФВЧ, ППФ, ПЗФ)?

25. Как определяются требования к аналоговому фильтру-

прототипу при синтезе РФ?

26. Каковы свойства и особенности аппроксимирующих функций, используемых при синтезе РФ по аналоговому прототипу?

27. От чего зависит порядок синтезируемого РФ в методе билинейного преобразования?

28. Как определяются нули и полюсы РФ по значению нулей и полюсов аналогового ФНЧ-прототипа?

29. Как конструируется требуемая импульсная характеристика синтезируемого НФ в методе весовых функций?

30. Как связана частотная характеристика синтезируемого НФ с частотной характеристикой весовой функции?

31. Каковы параметры и типичный вид частотных характеристик весовых функций, используемых при синтезе НФ?

32. Как связаны параметры частотной характеристики синтезируемого НФ с параметрами весовой функции?

33. Какие требования предъявляются к весовым функциям при синтезе НФ и почему?

34. В чем особенность и преимущество использования семейства весовых функций Кайзера для синтеза НФ?

35. Как конструируется требуемая импульсная характеристика НФ в методе синтеза на основе частотной выборки?

36. Как обеспечивается требуемое качество аппроксимации при синтезе НФ методом частотной выборки?

37. Почему методы синтеза НФ на основе весовых функций относятся к итерационным и каковы соответствующие им процедуры оптимизации?

38. Каковы возможные способы реализации НФ, синтезированных методами весовых функций?

**6 Список использованных источников**

1 Копысов А. Н. Марков М. М. Цифровая обработка радиолокационных сигналов; цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры в системах подвижной радиосвязи. Методическое пособие к лабораторным работам. – Ижевск: изд-во Иж. ун-та, 2014. - 28 с.