Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования

«Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»

Кафедра вычислительной техники

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2**

**Проектирование, реализация и исследование характеристик цифрового фильтра**

Вариант 10

Выполнил: Иванов В.С.

студент группы ИВТ-41-22

Проверила:

Доцент Андреева А.А.

Чебоксары, 2025

Часть 1

1.1. В системе MATLAB cоставить программу расчета БИХили КИХ-фильтра, параметры которого и требования к нему приведены в табл. 2.3.

1.2. Построить частотные характеристики фильтра (АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, характеристика групповой задержки)

1.3. Построить импульсную и временные характеристики.

1.4. Получить реакцию фильтра на синусоидальный входной сигнал с частотами из полосы пропускания или полосы непропускания.

1.5. Получить коэффициенты последовательной и параллельной (только для БИХ-фильтра) форм реализации фильтра.

Код программы

Fd = 2000;

Rp = 1.2;

Rx = 75;

Fp = [600,850];

Fx = [650,800];

Fd2 = Fd/2;

Wp = Fp / Fd2;

Ws = Fx / Fd2;

% Расчет порядка фильтра и коэффициентов

[n, Wn] = ellipord(Wp, Ws,Rp,Rx);

[b, a] = ellip(n, Rp, Rx, Wn, 'stop');

% АЧХ

[H, w] = freqz(b, a); % Вычисляем частотную характеристику

ff = w/pi\*Fd2; % Задаем сетку частот

figure(1);

plot(ff,abs(H));

grid;

title('АЧХ');

xlabel('Частота (Гц)');

ylabel('Амплитуда'); % Cтроим АЧХ

%ФЧХ

Ph=unwrap(angle(H));

figure(2);

plot(ff,Ph);

title('ФЧХ');

%ЛАЧХ

figure(3)

plot(ff, 20 \* log10(abs(H)));

title('ЛАЧХ');

xlabel('Frequency');

ylabel('Amplitude');

grid;

% Построение групповой задержки

figure(4)

gd = grpdelay(b, a);

plot(ff, gd);

xlabel('Frequency');

ylabel('delay');

title('Групповая задержка');

% Импульсная характеристика

figure(5)

imp = impz(b,a,100);

plot(0:99, imp);

title('Импульсная хар-ка');

%Временная хар-ка

i=ones(1,101);

h = filter(b, a, i);

figure(6);

title('Временная хар-ка');

plot(0:100,h);

title('Временная характеристика');

% Вычисление и построение реакции фильтра

% на синусоидальный сигнал в полосе пропускания

nn = (0:99);

f1 = 470;

x1 = sin(2\*pi\*f1\*nn/Fd);

y1 = filter(b, a, x1);

figure(7)

plot(nn,x1, nn, y1);

title('Реакция на синусоидальный сигнал в полосе пропускания');

% Вычисление и построение реакции фильтра

% на синусоидальный сигнал в полосе непропускания

f2 = 720;

x1 = sin(2\*pi\*f2\*nn/Fd);

y1 = filter(b, a, x1);

figure(8)

plot(nn,x1,nn,y1);

title('Реакция на синусоидальный сигнал в полосе непропускания');

% Получаем коэффициенты последовательной и параллельной % форм реализации фильтра

% Построение последовательной формы фильтра

disp('Коэффициенты последовательной формы:')

[sos, g] = tf2sos(b,a)

% Построение параллельной формы фильтра

disp('Коэффициенты параллельной формы:')

[r p k] = residuez(b, a);

Bi = [];

Ai = [];

for i = 1:2:length(r)

[bi, ai] = residuez(r(i:i+1), p(i:i+1), []);

Bi = [Bi; real(bi)'];

Ai = [Ai; real(ai)'];

end

disp('k = ');

disp(k);

disp('Bi = ');

disp(Bi);

disp('Ai = ');

disp(Ai);

Изображение выглядит как текст, линия, диаграмма, График

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как диаграмма, линия, График, текст

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как текст, линия, диаграмма, График

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как текст, диаграмма, линия, График

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как текст, линия, диаграмма, График

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как текст, линия, снимок экрана, График

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, линия, Параллельный

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Изображение выглядит как текст, линия, Параллельный, снимок экрана

Содержимое, созданное искусственным интеллектом, может быть неверным.

Часть 2

Программно реализовать на языке высокого уровня фильтр в прямой, канонической (БИХ-фильтр), последовательной и параллельной (БИХ-фильтр) формах при представлении коэффициентов разностного уравнения в форматах

а) с плавающей точкой,

б) с фиксированной точкой (16 бит)

и получить реакцию фильтра на единичный импульс, единичный ступенчатый и синусоидальный сигналы.



Код программы

% Задаём характеристики фильтра

% Частота дискретизации

Fd = 2000;

% Величины затуханий;

Rp = 1.2; % неравномерность в полосе пропускания (дБ)

Rs = 75; % затухание в полосе заграждения (дБ)

% Границы полосы заграждения (режекторный фильтр)

fp\_low = 600; % Нижняя граница нижней полосы пропускания

fp\_high = 850; % Верхняя граница верхней полосы пропускания

fs\_low = 650; % Нижняя граница полосы заграждения

fs\_high = 800; % Верхняя граница полосы заграждения

% Нормируем частоты

fd2 = Fd / 2;

Wp = [fp\_low fp\_high] / fd2; % Полосы пропускания

Ws = [fs\_low fs\_high] / fd2; % Полоса заграждения

% Расчёт фильтра

% Вычисляем порядок фильтра и частоту среза

[n, Wn] = ellipord(Wp, Ws, Rp, Rs);

global a;

global b;

[b, a] = ellip(n, Rp, Rs, Wn, 'stop');

disp('Коэф b:'); b

disp('Коэф a:'); a

[h,w] = freqz(b,a);

ff = w/pi\*fd2;

% Получаем коэффициенты для разных форм реализации

disp('Коэффициенты последовательной формы:');

global sos

global g

[sos, g] = tf2sos(b, a)

disp('Коэффициенты параллельной формы:');

global k;

[r,p,k] = residuez(b,a);

r

p

k

global Ai;

global Bi;

Bi=[];

Ai=[];

for i=1:2:floor(n)\*2

[bi, ai] = residuez(r(i : i+1), p(i : i+1), 0);

Bi((i+1)/2, :) = bi;

Ai((i+1)/2, :) = ai;

end

Bi = real(Bi)

% Тестовые сигналы

max = 100;

nn = 0:max-1;

testImp = impz(b,a,max);

testStep = stepz(b,a,max);

testXPass = sin(2\*pi\*(300/Fd)\*nn);

testXStop = sin(2\*pi\*(700/Fd)\*nn);

testSinPass = filter(b,a,testXPass);

testSinStop = filter(b,a,testXStop);

%% 1. Каноническая форма (прямая форма II)

figure(1);

sgtitle('Каноническая форма (прямая форма II)');

% Импульсная характеристика

subplot(3,1,1);

x = eye(1,max);

y = zeros(1,max);

oldw = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterCanon(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Импульсная характеристика');

% Синус 300 Гц (полоса пропускания)

subplot(3,1,2);

f = 300;

x = sin(2\*pi\*(f/Fd)\*nn);

y = zeros(1,max);

oldw = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterCanon(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Синус 300 Гц (полоса пропускания)');

% Ступенчатый сигнал

subplot(3,1,3);

x = ones(1,max);

y = zeros(1,max);

oldw = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterCanon(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Ступенчатый сигнал');

%% 2. Последовательная форма (SOS)

figure(2);

sgtitle('Последовательная форма (SOS)');

% Импульсная характеристика

subplot(3,1,1);

x = eye(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b));

oldy = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterSerial(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Импульсная характеристика');

% Синус 300 Гц (полоса пропускания)

subplot(3,1,2);

f = 300;

x = sin(2\*pi\*(f/Fd)\*nn);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b));

oldy = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterSerial(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Синус 300 Гц (полоса пропускания)');

% Ступенчатый сигнал

subplot(3,1,3);

x = ones(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b));

oldy = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterSerial(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Ступенчатый сигнал');

%% 3. Параллельная форма

figure(3);

sgtitle('Параллельная форма');

[t, s] = size(Ai);

% Импульсная характеристика

subplot(3,1,1);

x = eye(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = 0;

oldy = zeros(1, 2\*t);

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterParallel(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Импульсная характеристика');

% Синус 300 Гц (полоса пропускания)

subplot(3,1,2);

f = 300;

x = sin(2\*pi\*(f/Fd)\*nn);

y = zeros(1,max);

oldx = 0;

oldy = zeros(1, 2\*t);

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterParallel(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Синус 300 Гц (полоса пропускания)');

% Ступенчатый сигнал

subplot(3,1,3);

x = ones(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = 0;

oldy = zeros(1, 2\*t);

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterParallel(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Ступенчатый сигнал');

%% 4. Прямая форма I

figure(4);

sgtitle('Прямая форма I');

% Импульсная характеристика

subplot(3,1,1);

x = eye(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b));

oldy = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterDirect(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Импульсная характеристика');

% Синус 300 Гц (полоса пропускания)

subplot(3,1,2);

f = 300;

x = sin(2\*pi\*(f/Fd)\*nn);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b));

oldy = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterDirect(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Синус 300 Гц (полоса пропускания)');

% Ступенчатый сигнал

subplot(3,1,3);

x = ones(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b));

oldy = zeros(1, length(b));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterDirect(x(temp));

end

plot(nn, x, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Ступенчатый сигнал');

%% Целочисленные реализации

m = 1024;

sos\_int = round(m\*sos);

g\_int = round(m\*g);

Ai\_int = round(m\*Ai);

Bi\_int = round(m\*Bi);

k\_int = round(m\*k);

a\_int = round(m\*a);

b\_int = round(m\*b);

%% 5. Последовательная форма (целочисленная)

figure(5);

sgtitle('Последовательная форма (целочисленная, m=1024)');

% Импульсная характеристика

subplot(3,1,1);

x\_int = m \* eye(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b\_int));

oldy = zeros(1, length(b\_int));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterSerialInt(x\_int(temp));

end

plot(nn, x\_int, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Импульсная характеристика');

% Синус 300 Гц (полоса пропускания)

subplot(3,1,2);

f = 300;

x = sin(2\*pi\*(f/Fd)\*nn);

x\_int = round(m\*x);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b\_int));

oldy = zeros(1, length(b\_int));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterSerialInt(x\_int(temp));

end

plot(nn, x\_int, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Синус 300 Гц (полоса пропускания)');

% Ступенчатый сигнал

subplot(3,1,3);

x\_int = m \* ones(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = zeros(1, length(b\_int));

oldy = zeros(1, length(b\_int));

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterSerialInt(x\_int(temp));

end

plot(nn, x\_int, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Ступенчатый сигнал');

%% 6. Параллельная форма (целочисленная)

figure(6);

sgtitle('Параллельная форма (целочисленная, m=1024)');

[t, s] = size(Ai\_int);

% Импульсная характеристика

subplot(3,1,1);

x\_int = m \* eye(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = 0;

oldy = zeros(1, 2\*t);

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterParallelInt(x\_int(temp));

end

plot(nn, x\_int, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Импульсная характеристика');

% Синус 300 Гц (полоса пропускания)

subplot(3,1,2);

f = 300;

x = sin(2\*pi\*(f/Fd)\*nn);

x\_int = round(m\*x);

y = zeros(1,max);

oldx = 0;

oldy = zeros(1, 2\*t);

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterParallelInt(x\_int(temp));

end

plot(nn, x\_int, 'r', nn, y, 'g');

legend('Вход', 'Выход');

title('Синус 300 Гц (полоса пропускания)');

% Ступенчатый сигнал

subplot(3,1,3);

x\_int = m \* ones(1,max);

y = zeros(1,max);

oldx = 0;

oldy = zeros(1, 2\*t);

for temp = 1:max

y(temp) = myFilterParallelInt(x\_int(temp));

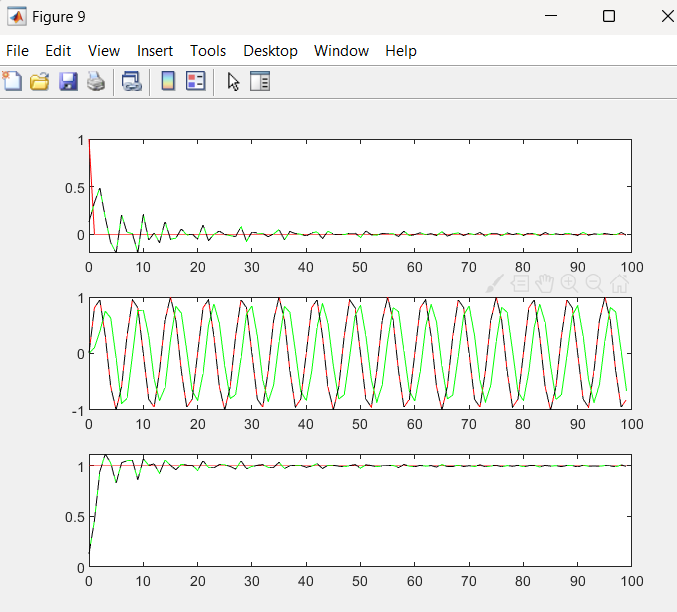
end

plot(nn, x\_int, 'r', nn, y, 'g');

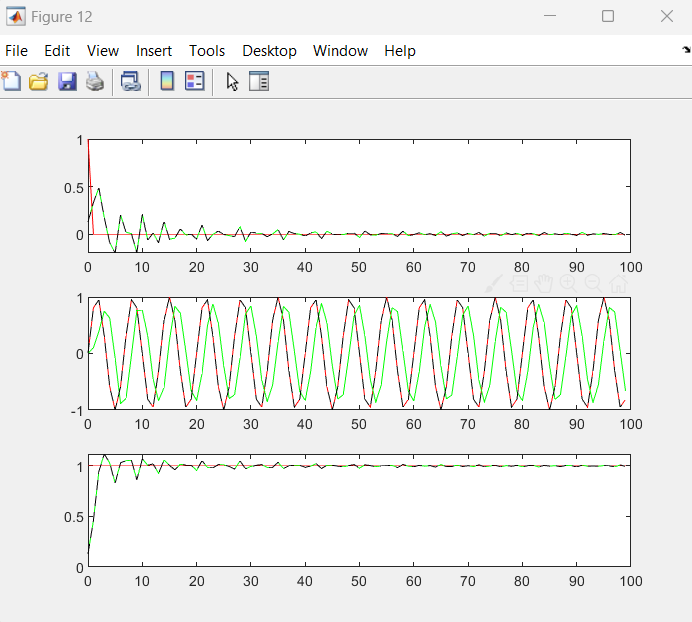
legend('Вход', 'Выход');

title('Ступенчатый сигнал');

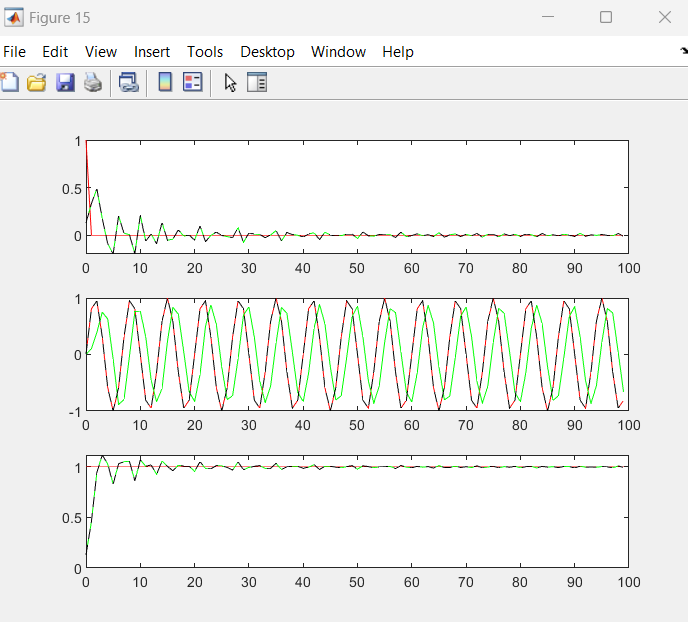
Каноническая форма



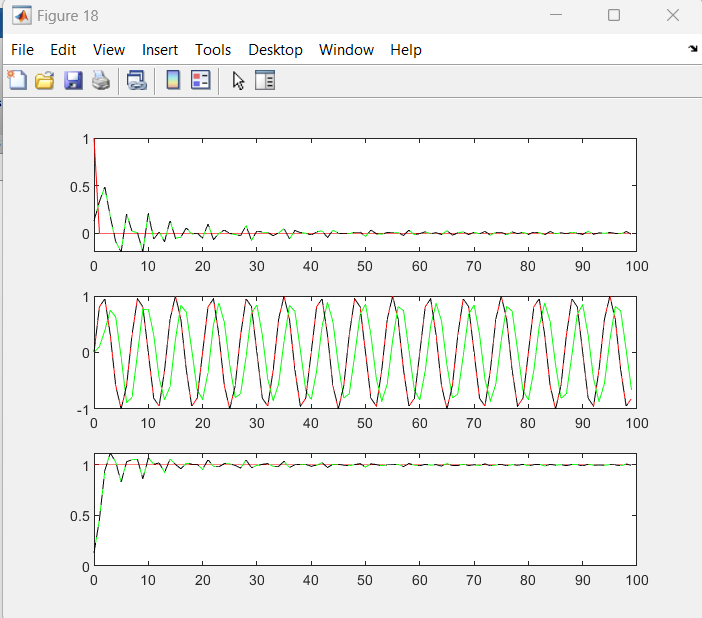
Последовательная форма



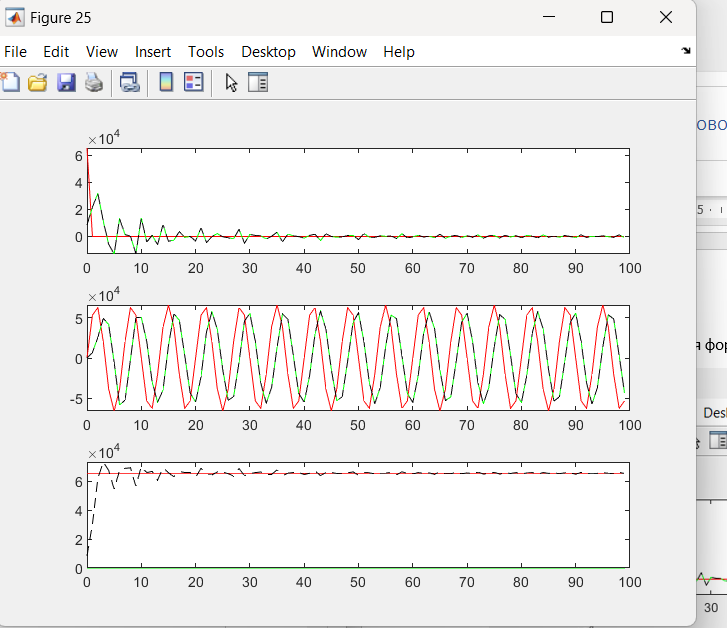
Параллельная форма



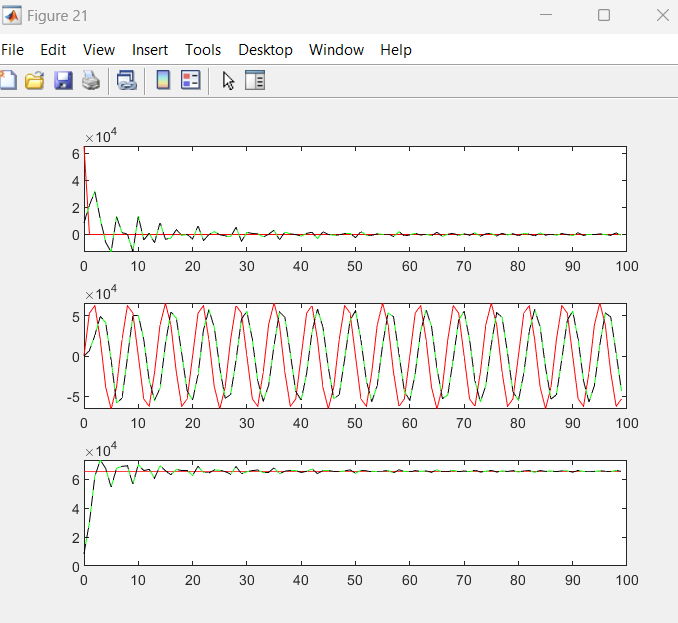
Прямая форма



Целочисленная последовательная форма



Целочисленная параллельная форма



**Ответы на вопросы:**

**1.АЧХ идеального фильтра. Переход к реальной АЧХ. Параметры** fd, fs, fp,rp ,rs

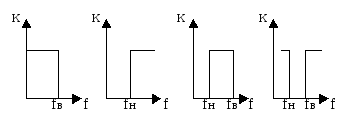


Рисунок 1 Различные АЧХ идеальных фильтров:   
нижних частот(1), верхних частот(2), полосовой(3), режекторный(4)

Для реальных АЧХ характерно непостоянство коэффициента передачи фильтра, как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания. Кроме того, в реальных фильтрах невозможно получить скачкообразное изменение коэффициента передачи при переходе от полосы пропускания к полосе непропускания. В реальных АЧХ всегда существует полоса перехода, в которой коэффициент передачи фильтра непрерывно изменяется от значения минимально допустимого в полосе пропускания, до значения, максимально допустимого в полосе непропускания.

Fd – частота дискретизации фильтра

fs – частота среза полосы непропускания/ полоса непропускания

fp – частота среза полосы пропускания/ полоса пропускания

rp - максимальное значение пульсаций в полосе пропускания в децибеллах

rs - минимальное затухание в полосе непропускания в децибеллах

**2.Математическое определение и физический смысл**

**АЧХ** называют модуль частотной характеристики . График АЧХ показывает то, как изменяется амплитуда входного сигнала на различных частотах при проходе через фильтр.

**ФЧХ** называют аргумент arg . График ФЧХ показывает зависимость разности [фаз](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B1%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9) между выходным и входным сигналами от частоты сигнала.

**ЛАЧХ** называют 20\*log10(). График ЛАЧХ показывает то же самое, что и АЧХ, но логарифмическом масштабе и в децибеллах.

**Импульсная характеристика** показывает реакцию фильтра на сигнал δ(n).

Это график реакции фильтра на единичный отсчет.

**Временная характеристика** показывает реакцию фильтра при нулевых начальных условиях на единичную ступенчатую функцию u(n).

**3.Сравнение БИХ- и КИХ- фильтров(заполнить таблицу)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Параметр** | **БИХ-фильтр** | **КИХ-фильтр** |
| 1 | Разностное уравнение |  |  |
| 2 | Передаточное уравнение |  |  |
| 3 | Импульсная характеристика | Бесконечная | Конечная |
| 4 | Линейность ФЧХ | В общем случае нелинейна | Может быть линейной |
| 5 | Устойчивость | Устойчив, если полюса системы находятся внутри единичной окружности | Нерекурсивные КИХ-фильтры всегда устойчивы |
| 6 | Порядок фильтра | Порядок фильтра (M+N) мал для обеспечения заданных требований к частотной характеристике | Гораздо больший  порядок фильтра для обеспечения заданных требований к частотной характеристике |
| 7 | Методы проектирования | Метод аналогового прототипа цифрового фильтра(Баттерворт,Чебышев и т.д.), метод параметрического моделирования | Метод окна, метод частотной выборки |
| 8 | Реализация на ограниченной разрядной сети | Чувствителен к квантованию | Простая структура свёртки, более устойчива к ошибкам округления |

**4.Особенности различных форм реализации цифровых фильтров**

**Прямая форма**

1)Прямое применение разностного уравнения.

2)Простота структуры.

3)Требуется много памяти, чувствительность к квантованию.

**Прямая каноническая форма**

1)Разбиение структуры на две секции: сначала все задержки, затем сумматоры и умножители.

2)Минимум задержек.

3)Более компактна по памяти, но повышенная чувствительность к квантованию.

**Последовательная форма**

1)Передаточная функция разбивается на произведение выходных сигналов нескольких вторичных фильтров низкого порядка.

2)Каждая ступень малоуровневая, устойчивость к квантованию

3)Больше сумматоров и умножителей по сравнению с канонической формой.

**Параллельная форма**

1)Передаточная функция разбивается на сумму выходных сигналов нескольких вторичных фильтров низкого порядка.

2)Каждая ветвь независима.

Динамический диапазон коэфов фильтра.

Коэффициенты b и a фильтра:

*b =* [0.1286 1.2060 5.6987 17.7335 40.3258 70.5855 97.8295 108.9124 97.8295 70.5855 40.3258 17.7335 5.6987 1.2060 0.1286];

*a =* [1.0000 6.7965 22.9979 51.5398 85.3010 109.5627 111.7613 91.1407 58.7124 28.6084 9.2729 0.8846 -0.9653 -0.5702 -0.1148];

Порядок фильтра *n* *=* 7, частота среза *Wn =* [0.6000 0.8500].

Коэффициенты последовательной формы:

*g =* 0.1286*;*

*sos =*1.0000 1.4059 1.0000 1.0000 0.5062 -0.2800  
1.0000 1.1560 1.0000 1.0000 -0.0418 0.6028  
1.0000 1.5914 1.0000 1.0000 1.7449 0.8486  
1.0000 0.9587 1.0000 1.0000 0.4459 0.8821  
1.0000 1.6817 1.0000 1.0000 1.7639 0.9469  
1.0000 0.8661 1.0000 1.0000 0.6065 0.9727  
1.0000 1.7143 1.0000 1.0000 1.7711 0.9869

Коэффициенты параллельной формы:

*k = -1.1201*

*Bi =* 1.8485 1.2994 0.0000  
 -0.0166 0.0172 0.0000  
 0.0510 0.0566 0.0000  
 0.1218 -0.0241 0.0000  
 -0.1854 -0.1621 0.0000  
 -0.5628 -0.0871 0.0000  
 -0.0077 -0.0120 0.0000

*Ai =* 1.0000 0.5062 -0.2800  
 1.0000 0.6065 0.9727  
 1.0000 1.7639 0.9469  
 1.0000 0.4459 0.8821  
 1.0000 1.7449 0.8486  
 1.0000 -0.0418 0.6028  
 1.0000 1.7711 0.9869

B

Максимум 108.9124, минимум 0.1286, отношение= 847

А

Максимум 111.7613, минимум 0.1148, отношение=974

SOS

Макс 1.7711, минимум 0.0418, отношение=42

Параллельная

B

Макс 1.8485, мин 0.0077, отношение=240

A

Макс 1.7711, мин 0.0418, отношение=42