

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы

«Цифровые фильтры»

по дисциплине «Цифровая обработка сигналов»

для студентов всех форм обучения

специальностей «Промышленная электроника» и «Биомедицинская
электроника»

Харьков
НТУ «ХПИ»
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы
«Цифровые фильтры»
по дисциплине «Цифровая обработка сигналов»
для студентов всех форм обучения
специальностей «Промышленная электроника» и «Биомедицинская
электроника»

Утверждено
редакционно-издательского
совета университета,
протокол № 3 от 22.12.2016 г.

Харьков
НТУ «ХПИ»
2017

Лабораторная работа

ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Цель – проектирование цифровых фильтров с заданными параметрами, используя основные возможности среды MATLAB.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В широком смысле слова в теории преобразования сигналов под термином «цифровой фильтр» (ЦФ) подразумевается любая система, преобразующая входной сигнал $x(n)$ в выходной $y(n)$ по определенному закону. В общем случае ЦФ, имеющий один вход и один выход, описывается разностным уравнением вида:

$$y(n) = (\sum_{i=1}^m b_i \cdot x(n - i) + (\sum_{j=1}^n a_j \cdot y(n - j))/a_0,$$

где a_j и b_i – постоянные коэффициенты, они же фигурируют в знаменателе и числителе соответствующей дискретной z -передаточной функции. Это уравнение отражает взаимосвязь между n -м выходным значением и рядом предыдущих значений на входе и выходе в количестве m и n соответственно. Если коэффициенты a_j равны нулю (при этом $a_0 = 1$), то разностное уравнение является *нерекурсивным*, фильтр обладает конечной импульсной характеристикой и называется *КИХ-фильтром*. Если коэффициенты a_j не равны нулю, то фильтр будет рекурсивным и иметь бесконечную импульсную характеристику и иметь название *БИХ-фильтр*.

ЦФ отображается заданной структурой, реализованной программно или аппаратно. В зависимости от того, являются ли параметры структуры ЦФ неизменными или меняющимися во времени, его называют *стационарным* или *адаптивным*. В лабораторной работе по умолчанию рассматриваются только линейные стационарные ЦФ.

Также полагается, что рассматриваемые фильтры обладают свойством причинности (казуальности). Это означает, что сигнал на выходе появляется не ранее, чем сигнал на входе.

Как в аналоговой, так и в цифровой схемотехнике под термином «*фильтр*» понимается устройство, которое служит для выделения частотных составляющих входного сигнала, расположенных в полосе пропускания фильтра, и подавления частотных составляющих в полосе задержки. Задача проектирования именно таких частотно-избирающих устройств часто встречается на практике.

Проектирование ЦФ выполняется в несколько этапов. В первый этап включают задание требований к характеристикам фильтра (спецификация); определение типа фильтра (БИХ, КИХ); выбор метода синтеза; вычисление коэффициентов a_j и b_i выбор структурной реализации.

Второй этап связан с моделированием структуры ЦФ с учетом эффектов квантования. И третий заключительный этап – реализация ЦФ на программной уровне и/или аппаратной платформе.

Следует учитывать, что такое последовательное выполнение этапов не является строго обязательным. Например, при определении требований к ЦФ сразу может быть указана его аппаратная реализация и архитектура, что предопределяет структурную реализацию (например, в виде каскадного соединения звеньев). Или на втором этапе при определении ошибок квантования окажется, что необходимо изменить спецификацию фильтра. Тогда необходимо итерационно повторить первый и второй этапы, скорректировав принятые решения.

Первый этап. Синтез ЦФ, включающий следующие основные шаги:

1) Задание требований к характеристикам ЦФ.

Спецификация требований к ЦФ обычно включает задание частоты дискретизации; требования к частотным характеристикам и

устойчивости; задание цифрового формата отсчетов выходного и входного сигналов; требования к аппаратной платформе (разрядность регистров памяти, тактовая частота процессора и т.п.).

Требования к характеристикам ЦФ зависят от его типа (КИХ или БИХ) и назначения ЦФ. Выделяют четыре основные типа избирательности ЦФ:

ФНЧ – фильтр нижних частот (lowpass filter);

ФВЧ – фильтр верхних частот (highpass filter);

ПФ – полосовой фильтр (bandpass filter);

РФ – режекторный фильтр (bandstop filter).

При задании требований к характеристикам фильтра часто ограничиваются заданием требований к АЧХ фильтра. Кроме того, дополнительно могут быть заданы требования к иным характеристикам, например, к линейности ФЧХ, групповому времени задержки (ГВЗ), импульсной и переходной характеристикам.

Спецификация фильтра чаще всего задается в виде допусков отклонения от АЧХ соответствующих идеальных фильтров, которые являются физически нереализуемыми. Пример такой спецификации для ФНЧ приведен на рис.1.

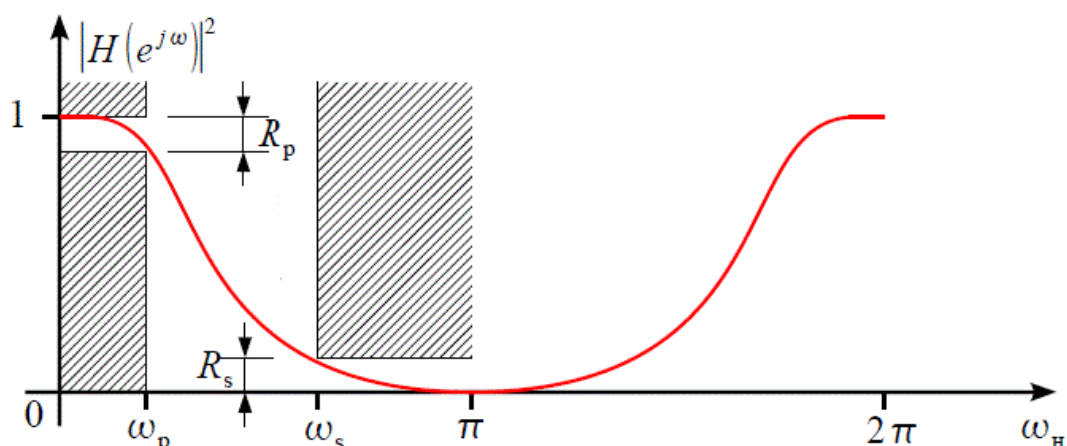


Рисунок 1

Поскольку фильтр цифровой, то его АЧХ $|H(e^{j\omega})|$, является периодической с периодом равным 2π и симметрична относительно нормированной частоты $\omega_H = \pi$, данные задаются относительно нормированной частоты ω_H в интервале от 0 до π .

Многие пакеты задают параметры фильтра относительно нормированной частоты ω_H/π , в интервале от 0 до 1, что необходимо учитывать при задании граничных частот фильтра. Например, пакет Signal Processing MATLAB содержит функции, где линейные частоты среза в Гц для ЦФ нормируются к частоте Найквиста в интервале от 0 до 1.

Существует несколько способов задания требований к ЦФ. Например, можно задать неравномерность АЧХ в полосе пропускания или задерживания, при этом порядок фильтра выбирается таким, чтобы обеспечить АЧХ внутри коридора. Также можно задать порядок фильтра и частоту среза, а частота задерживания ω_s и частота пропускания ω_p получаются в зависимости от порядка фильтра. Допустимые отклонения АЧХ чаще всего выражают в децибелах: неравномерность в полосе пропускания R_p и затухание в полосе задерживания R_s .

При формулировке требований к ФЧХ чаще всего учитывают ее близость к линейной в полосе пропускания. В ситуации, при которой форма сигнала имеет первостепенное значение, желательно иметь в распоряжении линейно-фазовый фильтр (фильтр с постоянным временем запаздывания). Предъявление к фильтру требования обеспечения линейного изменения сдвига фазы в зависимости от частоты эквивалентно требованию постоянства времени запаздывания для сигнала, спектр которого расположен в полосе пропускания, т. е. отсутствия искажений формы сигнала.

2) Выбор типа ЦФ.

Первая задача разработчика ЦФ выбрать тип фильтра: КИХ-фильтр (FIR – Finite Impulse Response Filter) или БИХ-фильтр (IIR –

Infinite Impulse Response Filter). Решение в большинстве случаев не является однозначным. Поэтому необходимо указать на некоторые особенности, которые учитываются при проектировании фильтров.

КИХ-фильтров могут обеспечить строго линейную характеристику, что является важным во многих приложениях, например, в мультимедийных. БИХ-фильтры характеризуются существенно нелинейной ФЧХ, особенно на краях полос пропускания.

КИХ-фильтры обладают устойчивостью по определению. БИХ-фильтры имеют рекурсивную структуру, подвержены негативному влиянию эффектов квантования коэффициентов фильтра и необходимостью проверки на устойчивость.

При одинаковых требованиях к спецификации фильтра порядок проектируемого БИХ-фильтра оказывается существенно ниже (меньше умножений и соответственно регистров памяти), чем порядок КИХ-фильтра.

Для КИХ-фильтров разработаны прямые методы, реализующие произвольную АЧХ. Для БИХ-фильтров преимущественно используют аппроксимацию идеальных фильтров, т.е. имеющих прямоугольную форму.

3) Выбор метода синтеза.

Метод синтеза зависит от типа ЦФ (КИХ или БИХ), а в рамках одного типа – от специфики конкретных дополнительных требований (простоты метода, оптимальности проектируемого фильтра и др.).

Для синтеза БИХ-фильтров используют аналоговые фильтры-прототипы. При этом необходимо преобразовать аналоговую функцию передачи, заданную в s -области, в дискретную функцию передачи, заданную в z -области. В пакете Signal Processing реализованы два метода такого преобразования: метод инвариантной импульсной характеристики и метод билинейного z -преобразования. Оба метода в

результате дают рекурсивные дискретные фильтры. При использовании метода инвариантной импульсной характеристики происходит дискретизация импульсной характеристики аналогового прототипа. Частотная характеристика получающегося дискретного фильтра, соответственно, представляет собой периодически повторенную частотную характеристику аналогового прототипа. По этой причине данный метод непригоден для синтеза фильтров верхних частот и вообще фильтров, коэффициент передачи которых не стремится к нулю с ростом частоты.

Цифровой фильтр по этому методу проектируется при помощи функции $[bz1 \ az1] = \text{impinvar}(b,a,fs)$, где bz , az – коэффициенты числителя и знаменателя передаточной функции цифрового фильтра; b , a – коэффициенты числителя и знаменателя передаточной функции аналогового прототипа; fs – частота дискретизации в Гц (по умолчанию он принимается равным 1 Гц).

При использовании метода билинейного z -преобразования происходит искажение характеристики аналогового прототипа только вдоль частотной оси. При этом частотный диапазон аналогового фильтра (от нуля до бесконечности) преобразуется к рабочему диапазону частот дискретного фильтра (от нуля до половины частоты дискретизации). Преобразование частотной оси описывается функцией арктангенса, поэтому частоты, значительно меньшие частоты дискретизации, преобразуются приблизительно линейно. Данный метод реализуется с помощью функции `bilinear` для произвольного аналогового прототипа.

Синтаксис функции следующий: $[bz1 \ az1] = \text{bilinear}(b,a,fs)$.

Кроме того, имеются готовые функции расчета фильтров нижних и верхних частот, полосовых и режекторных фильтров методом билинейного z -преобразования по аналоговым прототипам с АЧХ

Баттерворта, Чебышева первого и второго рода, а также Кауэра (эллиптические фильтры). Это соответственно функции `butter`, `cheby1`, `cheby2`, `ellip` и `besself`. Все эти функции могут использоваться и для расчета аналоговых фильтров.

Фильтр Баттерворта обеспечивает наилучшее приближение ряда Тейлора к идеальной характеристике фильтра нижних частот на аналоговых частотах $\Omega = 0$ и $\Omega = \infty$; для любого порядка n АЧХ фильтра монотонно убывает с ростом частоты. По этой причине фильтры Баттерворта называют *фильтрами с максимально плоскими характеристиками*.

Фильтр Чебышева I типа минимизирует абсолютную разницу между идеальной и реальной частотными характеристиками по всей полосе пропускания, имеет равные пульсации в полосе пропускания и в полосе задерживания характеристика является максимально плоской. Переход от полосы пропускания к полосе подавления является более крутым, чем для фильтра Баттерворта.

Фильтр Чебышева II типа минимизирует абсолютную разницу между идеальной и реальной частотными характеристиками по всей полосе задерживания, имеет равные пульсации в полосе задерживания и в полосе пропускания характеристика является максимально плоской. Сравнение АЧХ фильтров Баттерворта и Чебышева показывает, что фильтр Чебышева обеспечивает большее ослабление в полосе пропускания, чем фильтр Баттерворта такого же порядка. Недостаток фильтров Чебышева заключается в том, что их фазочастотные характеристики в полосе пропускания значительно отличаются от линейных.

Эллиптический фильтр (фильтр Кауэра) имеет равноволновые характеристики в полосе пропускания и полосе задерживания,

обеспечивая крутизну переходного участка даже большую, чем у характеристики фильтров Чебышева.

Фильтр с плоской амплитудно-частотной характеристикой может иметь большие сдвиги фаз. В результате этого форма сигнала, спектр которого лежит в полосе пропускания, будет искажена при прохождении через фильтр.

Фильтр Бесселя (также называемый фильтр Томсона) имеет наиболее плоский участок кривой времени запаздывания в полосе пропускания, подобно тому как фильтр Баттерворта имеет наиболее плоскую амплитудно-частотную характеристику.

Еще один подход к созданию фильтров с постоянным временем запаздывания - это применение всепропускающих фильтров, называемых иначе *корректорами во временной области*. Эти фильтры обладают постоянной амплитудно-частотной характеристикой, а сдвиг фазы может меняться согласно конкретным требованиям. Таким образом, их можно применять для выравнивания времени запаздывания любых фильтров, в частности фильтров Баттерворта и Чебышева.

Если заданы граничные частоты, допустимые затухания, тип фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ), класс фильтра (Баттерворта, Чебышёва, инверсный Чебышёва, эллиптический, Бесселя), то рассчитать коэффициенты передаточной функции фильтра можно, используя одну из следующих функций MATLAB:

`butter (n, wo, type, 's')` – расчёт фильтра Баттерворта;

`cheby1 (n, Rp, wo, type, 's')` – расчёт фильтра Чебышёва;

`cheby2 (n, Rs, wo, type, 's')` – расчёт инверсного фильтра Чебышёва;

`ellip (n, Rp, Rs, wo, type, 's')` – расчёт эллиптического фильтра;

`besself (n, wo, type, 's')` – расчёт фильтра Бесселя.

Здесь n – порядок ФНЧ-фильтра-прототипа; R_p – неравномерность характеристики затухания в полосе пропускания (в дБ); R_s –

минимальное затухание в полосе задерживания (в дБ); ω_0 – скаляр или двухэлементный вектор частот среза (границ полосы пропускания) (в рад/с) (для фильтра Баттерворта частота среза задаётся по уровню 3 дБ).

При синтезе ФНЧ: ω_0 – скаляр, параметр `type` отсутствует. При синтезе ФВЧ: ω_0 – скаляр, `type = 'high'`.

При синтезе ПФ: ω_0 – вектор [ω_{01} ω_{02}], причём $\omega_{01} < \omega_{02}$. Параметр `'type'` отсутствует. При синтезе РФ: ω_0 – вектор [ω_{01} ω_{02}], причём $\omega_{02} < \omega_{01}$, `type='stop'`.

Признаком дискретного варианта расчета является отсутствие строки `'s'` в списке входных параметров. Частоты среза в этом случае нормируются к частоте Найквиста (определяется как половина частоты дискретизации) и их значения находятся в диапазоне от 0 до 1. Например, для частоты дискретизации $f_s = 10000$ Гц и частоты среза $f = 400$ Гц нормированная частота равна $nf = 400/(f_s/2) = 0,08$.

Имеются также функции определения требуемого порядка этих фильтров по заданным параметрам АЧХ (граничным частотам полос пропускания и задерживания, а также допустимым пульсациям в этих полосах). Это соответственно функции `buttord`, `cheb1ord`, `cheb2ord`, `ellipord`. Так же, как и функции синтеза фильтров, данные функции позволяют определять требуемый порядок и для аналоговых фильтров.

Возвращаемыми параметрами этих функций будут n – минимальный порядок фильтра; ω_n – частота среза фильтра (для фильтра Баттерворта она определяется по уровню 3 дБ).

`[n,wn]=buttord (wp, ws, Rp, Rs, 's');`

`[n,wn]=cheb1ord (wp, ws, Rp, Rs, 's');`

`[n,wn]=cheb2ord (wp, ws, Rp, Rs, 's');`

`[n,wn]=ellipord (wp, ws, Rp, Rs, 's');`

где ω_p – граничная частота полосы пропускания (в рад/с);
 ω_s – граничная частота полосы задерживания (в рад/с).

Для ПФ и РФ ω_p и ω_s – двухэлементные векторы: $[\omega_{p1} \ \omega_{p2}]$ и $[\omega_{s1} \ \omega_{s2}]$. Для дискретного фильтра все задаваемые граничные частоты должны быть меньше единицы (приведены к частоте Найквиста).

Синтезируем эллиптический ПФ с заданными параметрами:
 $R_p = 0.01$ дБ, $R_s = 41$ дБ, $F_{p1} = 8060$ кГц, $F_{p2} = 10050$ кГц, $F_{s1} = 6500$ кГц,
 $F_{s2} = 12450$ кГц, $F_s = 60000$ кГц:

```
Fp1=8600; Fp2=10050; Fs1=6500; Fs2=12450; Fs=60000; Rp=0.01;  
Rs=41;  
[n,w0]=ellipord([Fp1 Fp2],[Fs1 Fs2],Rp,Rs,'s') ;  
[b,a]=ellip(n,Rp,Rs,w0/Fs*2);  
figure  
freqz(b,a,[],Fs)  
title('Amplitude-frequency and phase-frequency Response');grid on
```

Методы синтеза, не использующие аналоговый прототип, называются *прямыми*. Их, в свою очередь, можно также разделить на две группы: методы синтеза рекурсивных и нерекурсивных фильтров.

К функциям прямого синтеза рекурсивных фильтров относятся следующие:

`yulewalk` – синтез рекурсивного фильтра с произвольной кусочно-линейной АЧХ методом Юла-Уолкера.

Вызов функции $[b,a] = \text{yulewalk}(n,f,m)$.

Возвращает векторы-строки b и a , содержащие по $n+1$ коэффициентов соответственно числителя и знаменателя функции передачи рекурсивного фильтра порядка n , АЧХ которого примерно соответствует желаемой, которая задается с помощью векторов f и m :

f – вектор значений нормированных частот, заданных в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует половине частоты дискретизации (частоте

Найквиста). Первый элемент вектора f должен быть равен 0, а последний – 1, промежуточные значения должны монотонно возрастать. Допустимы дублирующиеся значения, соответствующие скачкам в задаваемой АЧХ;

m – вектор, содержащий значения желаемой АЧХ фильтра на частотах, заданных вектором f . Между этими точками производится линейная интерполяция АЧХ.

Спроектируем ФНЧ 8-го порядка методом Юла-Уолкера и построим идеальную АЧХ и АЧХ полученного фильтра:

```
figure (2);  
f = [0 0.3 0.5 0.6 1];  
m = [1 1 1 0 0];  
[b a] = yulewalk(12,f,m);  
[h w] = freqz(b,a,128);  
plot(f,m,'r--',w/pi,abs(h),'b-')  
legend('Ideal','Yule-Walker Design')  
title('Comparison of Response Magnitudes')
```

`prony` – данная функция позволяет синтезировать рекурсивный фильтр по заданной импульсной характеристике.

Вызов функции: `[b,a] = prony(h,nb,na)`,

где h – отсчеты дискретной импульсной характеристики, порядки полиномов числителя nb и знаменателя na передаточной функции рекурсивного фильтра.

Синтезируем рекурсивный фильтр с треугольной импульсной характеристикой:

```
h=[1 2 3 4 5 4 3 2 1 zeros(1,9)];  
[b, a] = prony(h,6,6); Fs=1000;  
impz(b,a)  
[freqz(b,a,[],Fs)  
title('Amplitude-frequency and phase-frequency Response');grid on
```

К функциям прямого синтеза нерекурсивных фильтров относятся следующие:

– функции, реализующие синтез фильтров путем обратного преобразования Фурье от желаемой АЧХ с последующим умножением

получившейся импульсной характеристики на некоторую весовую функцию (окно) для ослабления пульсаций АЧХ, появляющихся из-за эффекта Гиббса. Это функции `fir1` и `fir2`. Сюда же можно отнести функцию синтеза ФНЧ с косинусоидальным сглаживанием АЧХ – `firrcos`. Кроме того, функция `kaiserord` позволяет по заданным параметрам АЧХ оценить требуемый порядок фильтра при синтезе с использованием окна Кайзера.

Группа функций `fir1` предназначена для расчета коэффициентов \mathbf{b} цифрового КИХ-фильтра с линейной фазой методом взвешивания с использованием окна. Общий вид обращения к этой процедуре имеет вид

$$\mathbf{b} = \text{fir1}(n, Wn, \text{'ftype'}, \text{window}).$$

Процедура вычисляет вектор $n+1$ коэффициентов \mathbf{b} КИХ-фильтра с нормализованной частотой среза Wn . Параметр `'ftype'` задает желаемый тип фильтра (ФНЧ, ФВЧ, полосовой или режекторный). Он может отсутствовать и тогда по умолчанию рассчитываются параметры ФНЧ с частотой среза Wn , если последняя задана как скаляр, или полосовой фильтр с полосой пропускания от $w1$ до $w2$, если Wn задан в виде вектора из двух элементов $[w1 \ w2]$, – или принимать одно из четырех значений: `'high'`, `'stop'`, `'DC-1'` и `'DC-0'`. В первом случае синтезируется ФВЧ с частотой среза Wn . Во втором, режекторный фильтр (при этом Wn должен быть вектором из двух элементов, значения которых определяют границы полосы задерживания по отношению к частоте Найквиста). В третьем случае рассчитываются параметры многополосного фильтра, первая полоса которого является полосой пропускания, а в четвертом, тоже многополосный фильтр, первая полоса которого является полосой задерживания. При расчете режекторных фильтров и ФВЧ порядок фильтра следует назначать четным числом.

Параметр `window` позволяет задавать отсчеты окна в векторе-столбце `window` длины $n+1$. Если этот параметр не указан, то, по умолчанию, будет использовано окно Хемминга.

Спроектируем полосовой фильтр методом окна Кайзера и получим его частотную характеристику:

```
fcc=[6500 8060 10050 12450];  
[n,Wn,beta,ftype] = kaiserord (fcc,[0 1 0],[0.00056 0.001 0.00056],Fs);  
b= fir1(n,Wn,ftype,kaiser(n+1,beta),'noscale');  
[h,f] = freqz(b,1,4096,Fs);  
plot(f,m,w/pi,abs(h)), grid  
title('FIR1') xlabel('Normalized frequency '), ylabel('Magnitude')  
title('Amplitude-frequency and phase-frequency Response');grid on
```

Группа процедур `fir2` служит для расчета коэффициентов цифрового КИХ-фильтра с произвольной амплитудно-частотной характеристикой, задаваемой векторами `f` частот и `m` – соответствующих желаемых значений АЧХ. Обращение к процедуре следующее: `b = fir2(n, f, m, npt,lap, window)`.

Вектор `f` должен содержать значения нормализованной частоты в неубывающем порядке от 0 до 1. Вектор `m` должен быть той же длины, что и вектор `f`, и содержать желаемые значения АЧХ на соответствующих частотах. Параметр `npt` позволяет задать число точек, по которым выполняется интерполяция АЧХ. Параметр `lap` определяет размер (число точек) области около точек скачкообразного изменения АЧХ, в которой выполняется сглаживание. Если эти параметры не указаны, то, по умолчанию, принимается `npt = 512` и `lap = 25`.

Спроектируем полосовой фильтр 20-го порядка методом `fir2`, задав вектор частот и желаемые значения АЧХ:

```
figure (4);  
f = [0 0.2 0.2 0.6 0.6 0.8 0.8 1];  
m = [ 0 0 1 1 1 1 0 0]; b = fir2(20,f,m);
```

```
[h,w] = freqz(b,1,512);
plot(f,m,w/pi,abs(h)), grid
title('FIR2'), xlabel('Normalized frequency '), ylabel('Magnitude')
```

– функции, реализующие минимизацию среднеквадратического отклонения АЧХ получающегося фильтра от заданной. Это функции `firls`, `fircls` и `fircls1`. Последние две функции решают оптимизационную задачу с ограничением максимального отклонения АЧХ от заданной. Это позволяет избежать появления больших выбросов АЧХ вблизи переходных полос.

– функции, реализующие минимаксную оптимизацию, то есть минимизацию пикового отклонения АЧХ получающегося фильтра от заданной. В результате получаются фильтры с равномерными пульсациями АЧХ. К данной группе относятся функции `remez` (стандартный вариант метода Ремеза, реализованный еще в самых первых версиях пакета `Signal Processing`) и `cremez` (расширенный вариант, поддерживающий синтез фильтров с нелинейной ФЧХ и с комплексными коэффициентами). Кроме того, функция `remezord` позволяет по заданным параметрам АЧХ оценить требуемый порядок фильтра при синтезе методом Ремеза.

Синтезируем ПФ 20-порядка методом Ремеза, задав вектор частот и желаемые значения АЧХ:

```
f = [0.0.3 0.4 0.6 0.7 1];
a = [0 0 1 10 0];
b = remez(20,f,a);
[h, w] = freqz(b, 1, 512);
plot(f,a,w/pi,abs(h)), grid
```

Синтез КИХ-фильтра методом чебышевской аппроксимации производят при помощи функции `firpm(n,fo,mo,w)`.

Вычислить порядок фильтра n , получить вектор нормированных частот f_0 , вектор значений АЧХ m_0 и вектор весовых функций в полосе

пропускания и полосе задерживания можно при помощи функции `firpmord`. Спроектировать полосовой фильтр, используя функцию `firpm`, можно следующим образом:

```
fcc=[6000 8000 10000 12000]; Fs=60000;
[n,fo,mo,w] = firpmord( fcc, [0 1 0], [0.01 0.01 0.01], Fs );
br = firpm(n,fo,mo,w);
[h1,f1] = freqz(br,1,7000,Fs);
figure, plot(f1,abs(h1))
xlabel('Frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude');
title('Amplitude-frequency Response ');
grid on
```

4) Расчет передаточной функции ЦФ.

После того как определились с методом синтеза, приступают к расчету коэффициентов передаточной функции a_i и b_i , при которых характеристики проектируемого фильтра удовлетворяют заданным требованиям. Кроме прямых расчетов, в пакете Signal Processing можно использовать две графические среды, позволяющих рассчитывать и анализировать ЦФ: SPTool и FDATool. Они построены на основе GUI-программ (Graphic User Interface – графический интерфейс пользователя) – это интерактивные системы, предназначенные для моделирования сигналов, устройств и процессов с графическим выводом результатов. Они позволяют выполнять следующие операции: импортирование входного сигнала и анализ его спектра; синтез ЦФ и анализ его характеристик; моделирование процесса фильтрации; анализ выходного сигнала и его спектра.

5) Выбор структуры ЦФ.

Структура ЦФ отображает алгоритм вычисления реакции по разностному уравнению и определяется видом передаточной функции. Этап включает преобразование данной передаточной функции $H(z)$ в подходящую структуру. Для этой цели часто используются блок-схемы или функциональные схемы, на которых для облегчения реализации цифрового фильтра показывается ход вычислений. Используемая структура зависит от выбора КИХ или БИХ-фильтра. Для БИХ-фильтров широко используются три формы реализации: прямая, каскадная и параллельная. При разработке БИХ-фильтров наиболее широко используются параллельная и каскадная структуры, поскольку они предоставляют более простые алгоритмы фильтрации и менее чувствительны к эффектам реализации с использованием конечного числа битов, чем фильтры с прямой структурой.

Прямую форму для БИХ-фильтров используют тогда, когда ошибками, вызванными конечной разрядностью умножителей и сумматоров можно пренебречь при использовании многоразрядных и высокопроизводительных процессоров.

Для КИХ-фильтров широко используется три формы: прямая, частотной выборки, дискретной свертки. Наиболее используемой является прямая структура, поскольку ее проще всего реализовать. Если же, например, импульсная характеристика имеет большую длительность, используют не операцию дискретной свертки, а схему с использованием ДПФ.

Второй этап. Моделирование структуры ЦФ с учетом эффектов квантования. Округление коэффициентов b и a передаточной функции цифрового фильтра, т.е. представление их числами с ограниченным количеством двоичных разрядов, приводит к искажению частотных и временных характеристик фильтров. При проектировании цифровых

фильтров желательно установить, какова минимально допустимая разрядность представления коэффициентов фильтра, при которой характеристики не выходят за пределы заданных полей допусков, а дисперсия шума квантования при обработке какого-либо цифрового сигнала данным фильтром не превышает допустимой величины. Если коэффициенты и переменные фильтра представлены числами с меньшим количеством двоичных разрядов, то достигается экономия памяти и повышается

При квантовании коэффициентов возможно смещение полюсов рекурсивных фильтров за пределы единичной окружности, что ведет к потере устойчивости. Во избежание этого необходимо контролировать значения полюсов фильтра в процессе квантования коэффициентов.

Для анализа квантованных фильтров можно использовать программу `fdatool`. Необходимо установить флажок `Turn quantization on` и перейти на вкладку `Set quantization parameters`. В левой части вкладки есть кнопка `Show filter structures`. Это окно содержит раскрывающийся список всевозможных форм реализации квантованного фильтра. Автоматическое масштабирование коэффициентов можно выполнить, используя кнопку `Scale transfer-fcn coeff`. Шесть групп элементов настройки квантователей позволяют задать класс объекта, тип квантователя, режим округления, режим обработки переполнений и формат представления чисел. Задавая настройки, можно получить все характеристики квантованного фильтра [1, 2].

Третий этап. Реализация структуры ЦФ.

Структура ЦФ может быть реализована программно или аппаратно, преимущественно программно на базе цифрового устройства – цифрового процессора обработки сигналов (DSP), системы на кристалле (System on Chip) или программируемой логической интегральной схеме (PLD).

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Согласно варианту, задать параметры ЦФ – граничные частоты, допустимые затухания, тип фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ), класс фильтра (Баттерворта, Чебышёва, инверсный Чебышёва, эллиптический), определить порядок фильтра. Рассчитать векторы a и b коэффициентов передаточной функции, используя указанный в задании метод синтеза. Для построения графиков АЧХ и ФЧХ используют функцию *freqz*. Затем построить графики временных характеристик при помощи функций *impz*, *stepz*, *grpdelay*, *phasedelay* и карту нулей и полюсов *zplane*.

Также для просмотра частотных и временных характеристик синтезированного цифрового фильтра можно использовать оператор: *fvtool(a, b)* или использовать специальный пакет программ *fdatool*(filter design & analysis tool).

Варианты заданий для расчета

№ Варианта	Тип ЦФ	Fд, Гц	Fp1, Гц	Fp2, Гц	Rp, дБ	F s1, Гц	F s2, Гц	Rs
1	ФНЧ	12000	—	2000	3	—	3000	60
2	ФВЧ	6000	1500	—	2	1000	—	50
3	ПФ	70000	14000	16000	2	13000	17000	40
4	РФ	70000	13000	17000	2	14000	16000	40

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: цель работы; задание на проектирование цифрового фильтра, полученное от преподавателя; тексты программ (m-файлы) и графики построенных характеристик; выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое импульсная характеристика и передаточная функция ЦФ?
2. Что такое порядок ЦФ и как сказывается его значение при реализации фильтра?
3. Какие основные структуры ЦФ существуют и как они влияют на качество фильтров?
4. Какие основные методы и разновидности методов используются в пакете программ MATLAB для расчета КИХ и БИХ-фильтров?
5. Какие методы используются при синтезе передаточной функции цифрового БИХ-фильтра?
6. Назовите этапы проектирования цифрового БИХ-фильтра с использованием аналогового прототипа. Каково содержание каждого этапа?
7. Почему при определении параметров аналогового прототипа осуществляется пересчет параметров, заданных для цифрового фильтра?
8. Что такое билинейное преобразование? Когда оно используется?
9. Как с использованием передаточной функции цифрового БИХ-фильтра записать разностное уравнение фильтра? Как найти выражение для импульсной характеристики фильтра?
10. Опишите метод инвариантного преобразования импульсной характеристики и объясните эффект наложения при формировании АЧХ ЦФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – 3-е издание – С.Пб. : Питер, 2011. – 758 с.
2. Солонина А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB / А. И. Солонина, С. М. Арбузов. – С.Пб. : БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.
3. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов. Практический подход 2-е издание / Э. Айфичер, Б. Джервис: пер. с англ. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
4. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. Додэка XXI, 2012. – 718 с.
5. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: Второе издание: пер. с англ. – М. : ООО Бином-Пресс, 2006. – 656 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа	
Цифровые фильтры	3
Необходимые теоретические сведения	3
Индивидуальное задание	20
Содержание отчета	20
Контрольные вопросы	21
Список литературы	22

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи
«Цифрові фільтри»
з дисципліни «Цифрова обробка сигналів»
для студентів усіх форм навчання
спеціальностей «Промислова електроніка » і
«Біомедична електроніка»

Російською мовою

Укладачі: ФЕТЮХІНА Людмила Вікторівна
 БУТОВА Ольга Анатоліївна

Відповідальний за випуск проф. Сокол Є. І.

Роботу до видання рекомендував доц. Воїнов В. В.

В авторській редакції

План 2017, поз. 23

Підписано до друку 11.12.2017 р.

Формат 60x84 1/16. Папір офсет. Друк – ризографія.

Гарнітура – Times New Roman. Ум. друк. арк.1.4.

Наклад 50 прим. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5475 від 21.08.2017 р.

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня НТУ «ХП», м. Харків, вул. Кирпичова 2
