

Лабораторная работа №3

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ В СРЕДЕ MATLAB

Цель работы: Изучение набора программных средств SPTool пакета MATLAB для автоматизированного синтеза цифровых фильтров

Цифровые фильтры

Цифровой фильтр – это линейная дискретная система, предназначенная для извлечения цифрового сигнала из действующей на входе фильтра смеси сигнала и помехи (см. рисунок 3.1).

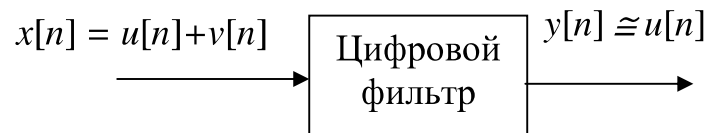


Рисунок 3.1 Цифровой фильтр

На рисунке введены следующие обозначения: $u[n]$ – сигнал; $v[n]$ – помеха; $x[n]$ – воздействие; $y[n]$ – реакция цифрового фильтра.

Сигнал на выходе цифрового фильтра должен как можно точнее соответствовать исходному сигналу $u[n]$ и по возможности полностью подавить помеху $v[n]$. Поскольку степень соответствия входного $u[n]$ и выходного $y[n]$ сигналов может быть определена по-разному, параметры фильтра (тип фильтра, его порядок, коэффициенты, разрядность, точность алгебраических вычислений) рассчитываются различными методами.

Наиболее простым типом цифровых фильтров являются частотно-избирательные фильтры, задачей которых является селекция цифровых сигналов по частоте. К таким фильтрам относятся фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовой и режекторный фильтры (ПФ и РФ).

В данной лабораторной работе будут рассматривать линейные стационарные (см. лаб. раб. №2) частотно-избирательные фильтры.

Физическая реализуемость. Фильтр является физически реализуемым, если для него выполняется принцип причинности, то есть реакция фильтра не опережает соответствующее воздействие: из условия $x[n] = 0$ при $n < n_0$ следует, что $y[n] = 0$ при $n < n_0$.

Как и любые линейные дискретные системы, цифровые фильтры делятся на два класса: фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтры) и фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ фильтры).

Проектирование цифрового фильтра – это процесс, результатом которого является определение коэффициентов фильтра и способа его практической реализации, параметры которого отвечают заданным техническим характеристикам. Процесс проектирования состоит из следующих этапов:

1. задание требований к техническим характеристикам разрабатываемого устройства;
2. задание требований к параметрам фильтра;
3. синтез соответствующей передаточной функции или разностного уравнения;
4. проверка синтезированного фильтра методом математического моделирования;
5. практическая реализация на выбранной элементной базе и отладка.

На первом и втором этапах, исходя из условий применения фильтра и характеристик сигналов и помех, определяются параметры фильтра (полосы пропускания и режекции, допустимый уровень пульсации частотой характеристики в полосах пропускания, уровень подавления сигнала в

полосах режекции). Настоящая лабораторная работа посвящена изучению третьего и четвертого этапов процесса разработки.

Требования, предъявляемые к частотно-избирательным цифровым фильтрам

При проектировании частотно-избирательных фильтров определяют частоту дискретизации f_d и предъявляют требования к виду амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в основной полосе частот $(0, f_d/2)$. Идеальные амплитудно-частотные характеристики частотно-избирательных фильтров представлены на рисунках 3.2 – 3.5.

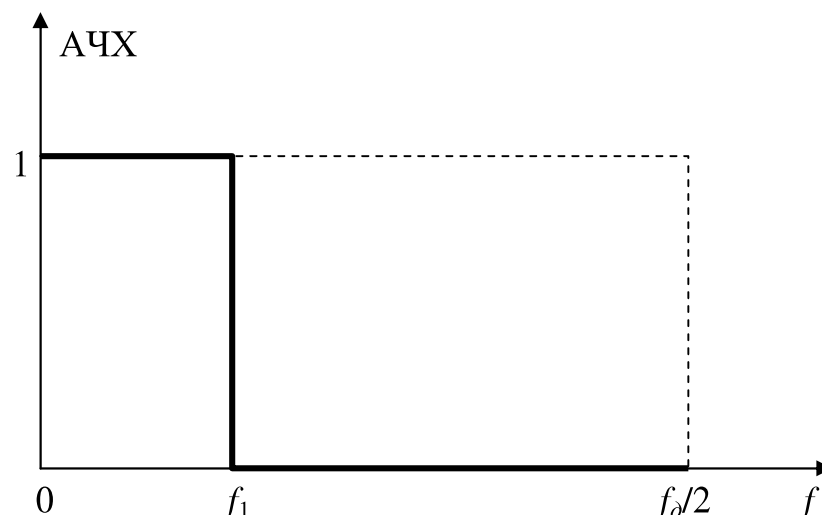


Рисунок 3.2 АЧХ идеального ФНЧ

Полосой пропускания идеального фильтра нижних частот (ФНЧ) является область $(0, f_1)$, а полосой режекции – область $(f_1, f_d/2)$.

Полосой пропускания идеального фильтра верхних частот (ФВЧ) является область $(f_1, f_d/2)$, а полосой режекции – область $(0, f_1)$.

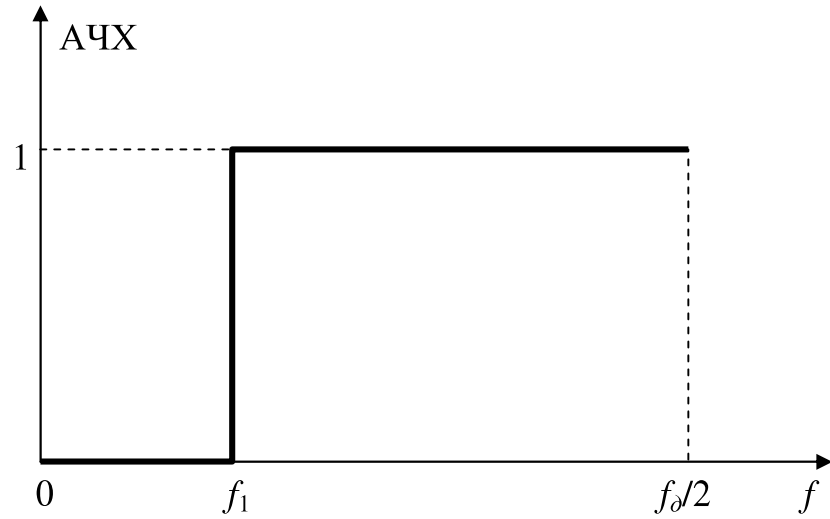


Рисунок 3.3 АЧХ идеального ФВЧ

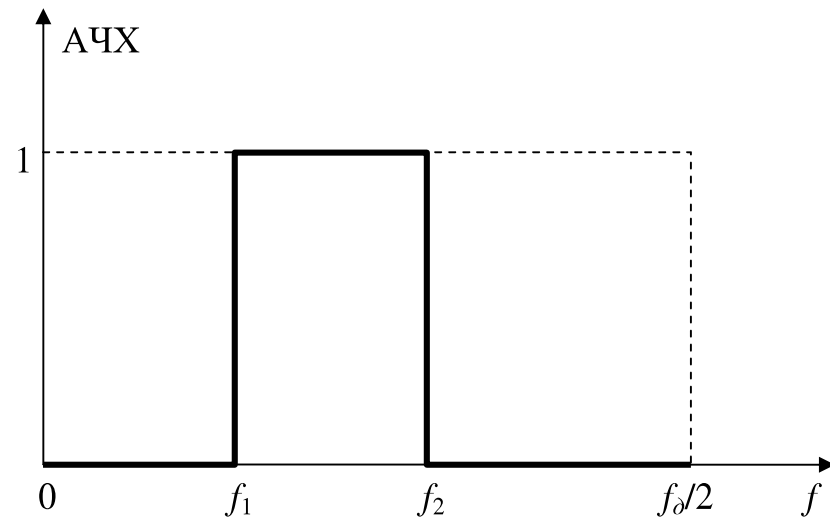


Рисунок 3.4 АЧХ идеального ПФ

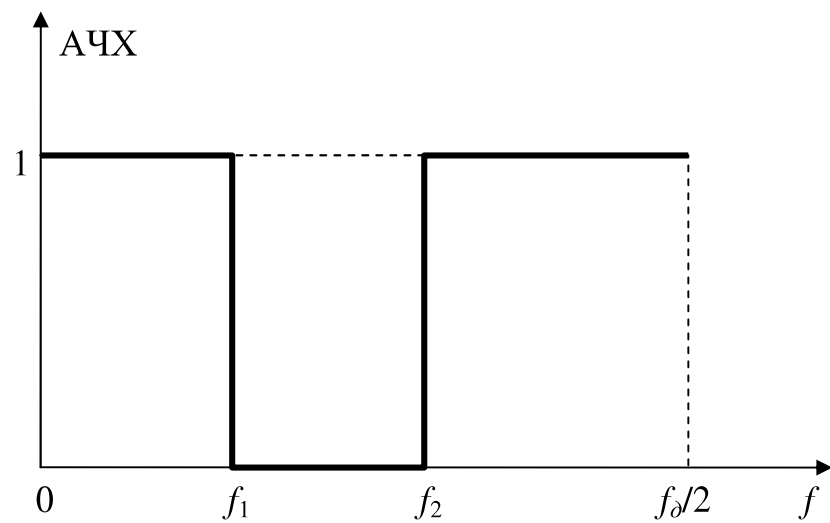


Рисунок 3.5 АЧХ идеального РФ

Полосой пропускания идеального полосового фильтра (ПФ) является область (f_1, f_2) , а полосой режекции – область $(0, f_1) \cup (f_2, f_d/2)$.

Полосой пропускания идеального режекторного фильтра (РФ) является область $(0, f_1) \cup (f_2, f_d/2)$, а полосой режекции – область (f_1, f_2) .

Идеальные частотно-избирательные фильтры являются физически нереализуемыми, что приводит к необходимости пересмотра требований к форме АЧХ физически реализуемых цифровых фильтров. Для этого вводят допустимые отклонения АЧХ синтезируемого фильтра в полосах пропускания и задерживания от АЧХ идеального фильтра. Кроме того, вводят дополнительные, так называемые *переходные полосы*, расположенные между полосами пропускания и задерживания в которых требования к АЧХ синтезируемого фильтра не предъявляют. Установленные границы допустимой АЧХ полосового фильтра, а также сама допустимая АЧХ показаны на рис. 3.6.

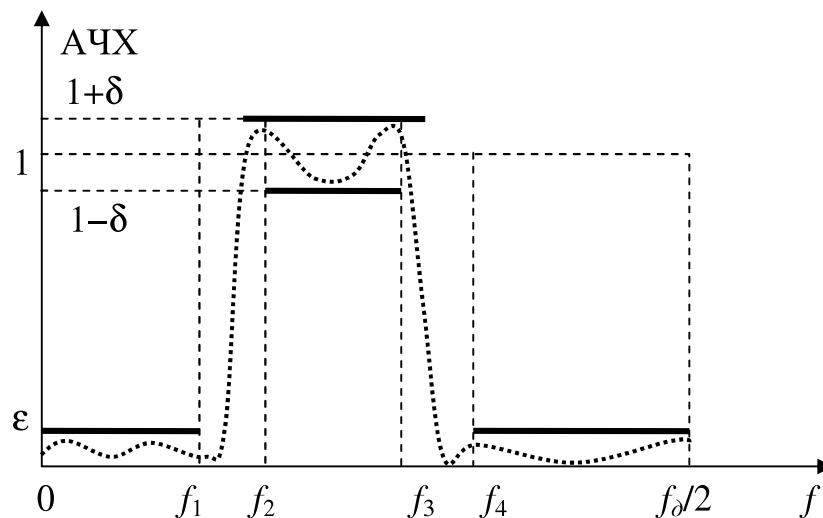


Рисунок 3.6 Допустимая АЧХ ПФ и ее границы

В полосе пропускания (f_2, f_3) допускают отклонение АЧХ от единицы на величину $\pm\delta$. В полосах задерживания ($0, f_1$) \cup ($f_4, f_d/2$) допускают отклонение АЧХ от нуля на величину ϵ . Дополнительно к полосам пропускания и задерживания вводят переходные полосы (f_1, f_2) \cup (f_3, f_4), в которых

требования к АЧХ синтезируемого фильтра не предъявляются. Аналогичным образом задаются требования и к другим частотно-избирательным фильтрам.

В общем случае требования к синтезируемому частотно-избирательному фильтру включают следующие параметры:

1. тип избирательности фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и т.п.);
2. частота дискретизации f_s ;
3. значения граничных частот (в основной полосе частот), разделяющих полосы пропускания, задерживания, а также переходные полосы;
4. допустимые отклонения АЧХ синтезируемого фильтра от идеальной АЧХ в полосах пропускания (δ) и режекции (ϵ);
5. выбор метода аппроксимации АЧХ.

Указанные требования могут предъявляться как к нормированной амплитудно-частотной характеристике $A(f) \in [0,1]$, так и к характеристике затухания $a(f) = 20 \lg A(f) \in (-\infty, 0]$.

Автоматизированное проектирование фильтров

В настоящей лабораторной работе рассматривается автоматизированное проектирование цифровых фильтров на примере программных средств Signal Processing Toolbox из состава программного комплекса MATLAB. Вызов пакета Signal Processing Toolbox (SPTool) осуществляется с помощью команды `sptool`, вводимой в основном командном окне программы MATLAB, как это показано на рисунке 3.7.

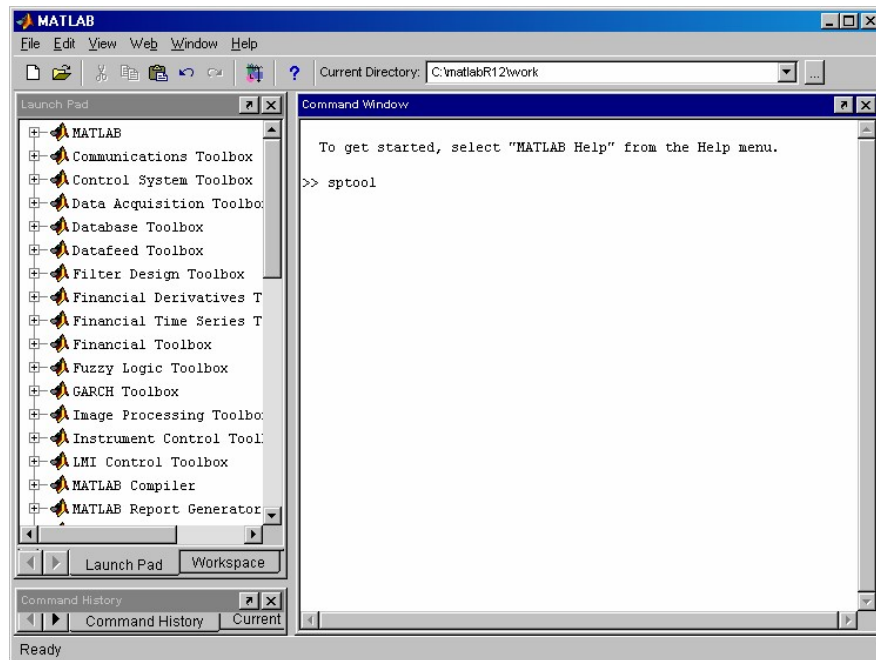


Рисунок 3.7 Запуск пакета Signal Processing Toolbox

В результате введенной команды на экране компьютера должно отобразиться главное окно для работы с пакетом SPTool, представленное на рисунке 3.8.

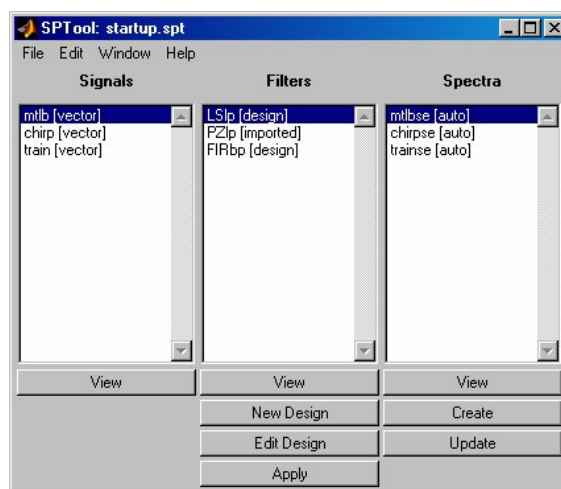


Рисунок 3.8 Главное окно SPTool

Главное окно SPTool состоит из строки меню и трех полей: Signals, Filters и Spectra. Поля Signal и Spectra предназначены для расчета и просмотра спектров сигналов на входе и выходе синтезированного фильтра.

Поле Filters предназначено для автоматизированного процесса синтеза цифрового фильтра. Кнопка View предназначена для просмотра характеристик существующего фильтра, кнопка New Design предназначена

для синтеза нового фильтра, кнопка Edit Design предназначена для изменения характеристик существующего (выделенного) фильтра и кнопка Apply предназначена для моделирования процесса фильтрации (с помощью выделенного фильтра).

Рассмотрим процесс автоматизированного синтеза фильтра. Для этого в поле Filters нажмем на кнопку New Design. При этом на экране должно отобразиться окно «Filter Design», представленное на рисунке 3.9.

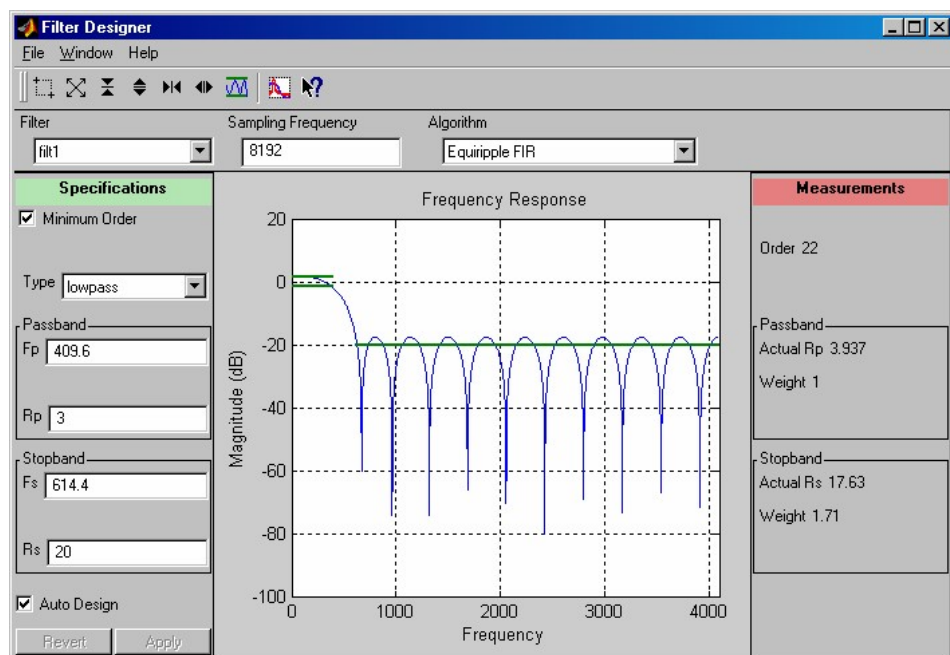


Рисунок 3.9 Окно «Filter Design»

Поле «Filter» содержит имя фильтра.

Поле «Sampling Frequency» содержит значение частоты дискретизации.

Поле «Algorithm» отображает выбранный алгоритм аппроксимации:

- Equiripple FIR – оптимальный фильтрации Чебышева (КИХ);
- Least Squares FIR – метод наименьших квадратов (КИХ);
- Kaiser Window FIR – окно Кайзера (КИХ);
- Butterworth IIR – фильтр Баттерворта (БИХ);
- Chebyshev Type 1 IIR – фильтр Чебышева 1-го рода (БИХ);
- Chebyshev Type 2 IIR – фильтр Чебышева 2-го рода (БИХ);

- Elliptic PR – фильтр Золотарева – Кауэра (эллиптический) (БИХ);
- Pole/Zero Editor – синтез фильтра методом задания полюсов и нулей передаточной функции в Z-области.

Флажок «Minimum Order» служит для синтеза фильтра минимального порядка, удовлетворяющего введенным требованиям.

Поле «Type» содержит информацию о типе избирательности фильтра:

- lowpass – ФНЧ;
- highpass – ФВЧ;
- bandpass – ПФ;
- bandstop – РФ.

Поля «Passband» и «Stopband» служат для ввода параметров полос пропускания и задерживания соответственно. Подполя «Fp1 (Fp2)» и «Fs1 (Fs2)» служат для ввода границ полос пропускания и режекции, а подполя «Rp» («Rs») служат для ввода максимально (минимально) допустимого ослабления в полосе пропускания (режекции).

После ввода параметров синтезируемого фильтра необходимо нажать на флажок «Auto Design» для автоматического расчета цифрового фильтра. При успешном выполнении расчета в поле «Frequency Response» отобразится АЧХ синтезированного фильтра.

На рисунке 3.10 представлены результаты синтеза полосового фильтра со следующими параметрами:

1. частота дискретизации: 8000 Гц;
2. полоса пропускания
область: (800 Гц, 1200 Гц);
максимально допустимое ослабление: 6 dB;
3. полоса пропускания
область: (0, 600 Гц) U (1400 Гц, 4000 Гц);

минимально допустимое ослабление: 40 dB;

4. метод аппроксимации: БИХ фильтр Баттерворта.

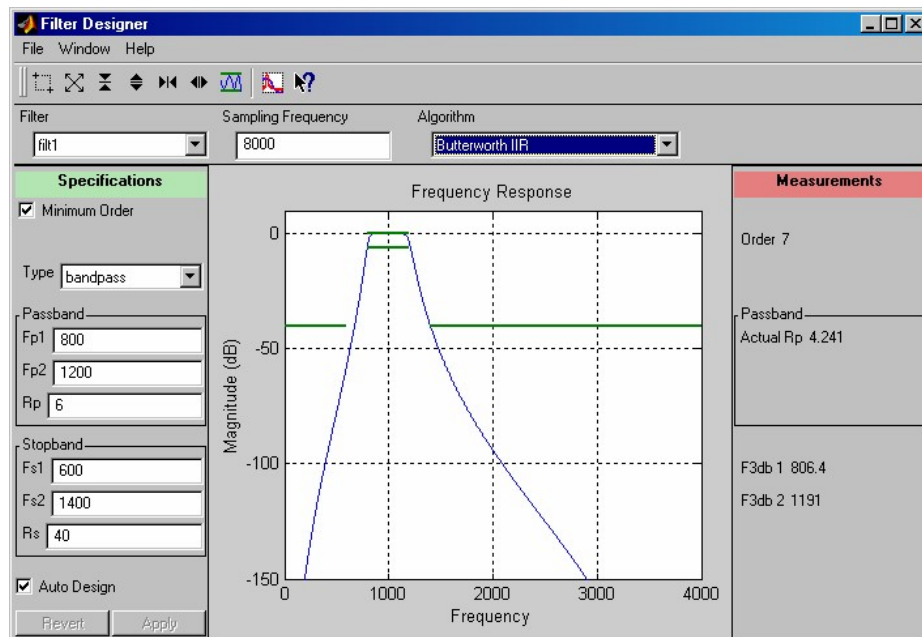


Рисунок 3.10 Результаты синтеза полосового фильтра

В правой части окна в поле «Measurements» отображается порядок (Order) синтезированного фильтра. В нашем случае он оказался равен 7.

Для анализа характеристик синтезированного фильтра необходимо закрыть окно «Filter Design» с помощью пункта меню «File\Close» и в окне «SPTool» (см. рисунок 3.8) нажать кнопку «View». При этом на экране отобразится диалоговое окно «Filter Viewer», позволяющее просмотреть следующие характеристики синтезированного фильтра:

- АЧХ в линейном и логарифмическом масштабах (Magnitude);
- ФЧХ (Phase);
- время группового прохождения (Group Delay);
- карту нулей и полюсов (Zeros & Poles);
- импульсную характеристику (Impulse Response);
- переходную характеристику (Step Response).

Характеристики синтезированного фильтра представлены на рисунке 3.11.

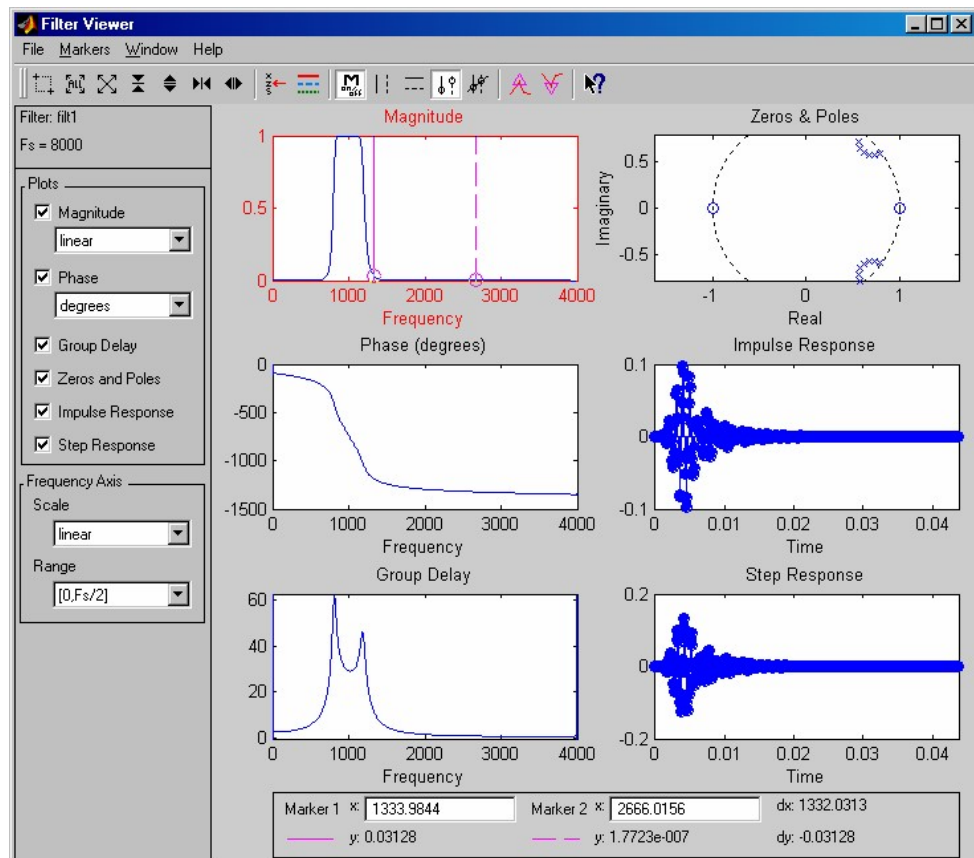


Рисунок 3.11 Характеристики синтезированного фильтра

Для экспортирования синтезированного фильтра в программу MATLAB необходимо в окне «SPTool» (см. рисунок 3.8) выбрать пункт меню «File\Export...». При этом на экране отобразится окно «Export from SPTool», представленное на рисунке 3.12.

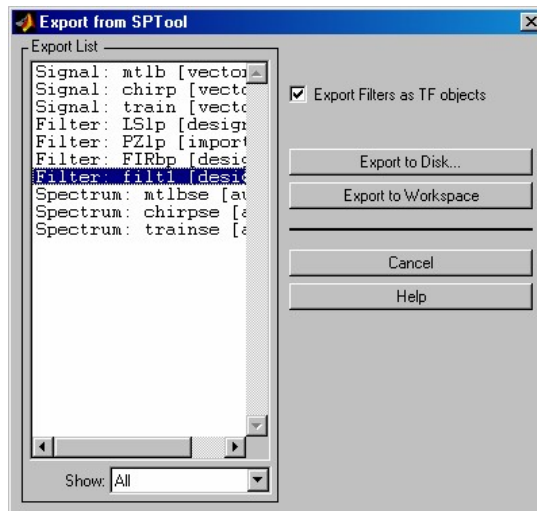


Рисунок 3.12 Окно «Export from SPTool»

В поле «Export List» необходимо:

- выбрать имя синтезированного фильтра (в нашем примере это «filt1»);
- установить флажок «Export Filters as TF objects»;
- нажать кнопку «Export to Workspace».

После экспортирования фильтра в программу MATLAB можно просмотреть передаточную функцию синтезированного фильтра, напечатав имя фильтра (filt1) в основном командном окне программы, как это показано на рисунке 3.13.

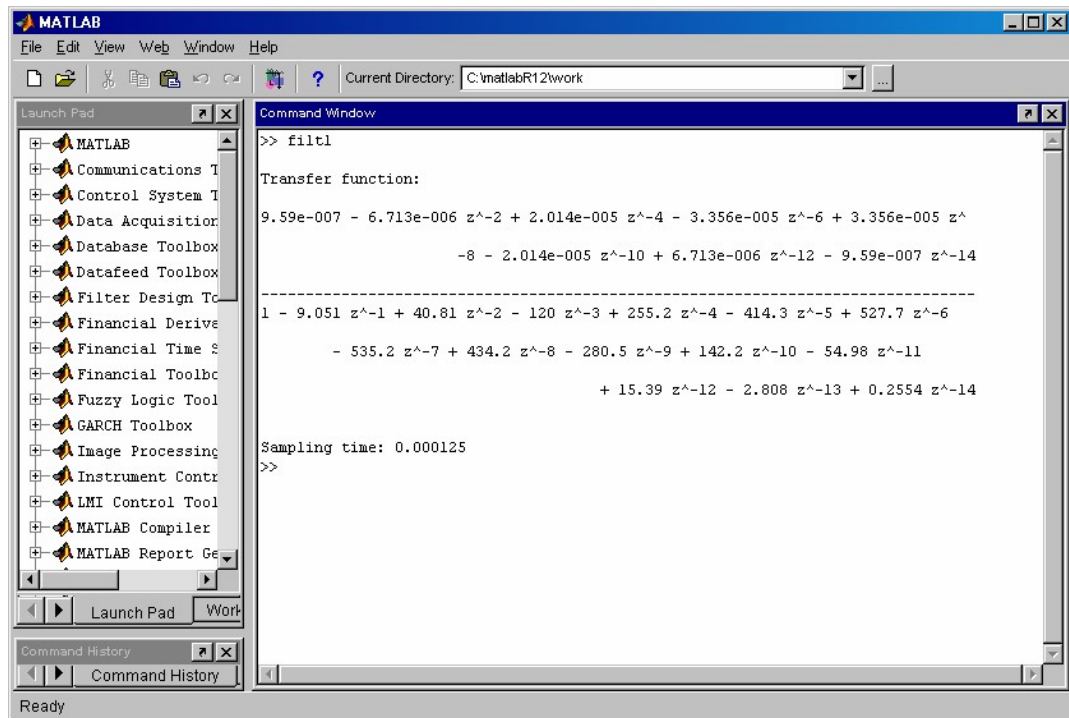


Рисунок 3.13 Вывод передаточной функции в командное окно MATLAB

После введенного имени фильтра программа отображает аналитическое выражение передаточной функции синтезированного фильтра.

Синтез цифровых фильтров с другим типом частотной избирательности и методом аппроксимации АЧХ проводится аналогично рассмотренному примеру синтеза полосового фильтра Баттерворта.

Индивидуальные задания к лабораторной работе

Таблица 3.1

№	Тип фильтра	Параметры полосы пропускания	Параметры полосы задерживания	Метод аппроксимации
1	ФНЧ	(0, 1000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(1400 Гц, 4000 Гц) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
2	ФНЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
3	ФНЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
4	ФНЧ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра
5	ФВЧ	(1400 Гц, 4000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(0, 1000 Гц) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
6	ФВЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
7	ФВЧ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
8	ФВЧ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра
9	ПФ	(800 Гц, 1200 Гц) max ослабл.: 6 dB	(0, 600 Гц) U (1400 Гц, 4000 Гц) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
10	ПФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.
11	ПФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
12	ПФ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра
13	РФ	(0, 600 Гц) U (1400 Гц, 4000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(800 Гц, 1200 Гц) min ослабл.: 40 dB	БИХ фильтр Баттерворта
14	РФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 1 р.

				р.
15	РФ	то же	то же	БИХ фильтр Чебышева 2 р.
16	РФ	то же	то же	БИХ фильтр Кауэра

Таблица 3.2

№	Тип фильтра	Параметры полосы пропускания	Параметры полосы задерживания	Метод аппроксимации
1	ФНЧ	(0, 1000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(1400м, 4000 Гц) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
2	ФНЧ	то же	то же	метод наименьших квадратов
3	ФНЧ	то же	то же	Окно Кайзера
4	ФНЧ	(0, 1200 Гц) max ослабл.: 6 dB	(1400 Гц, 4000 Гц) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
5	ФВЧ	(1400 Гц, 4000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(0, 1000 Гц) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
6	ФВЧ	то же	то же	метод наименьших квадратов
7	ФВЧ	то же	то же	Окно Кайзера
8	ФВЧ	(1400 Гц, 4000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(0, 1200 Гц) min ослабл.: 40 dB	метод наименьших квадратов
9	ПФ	(800 Гц, 1200 Гц) max ослабл.: 6 dB	(0, 600 Гц) U (1400 Гц, 4000 Гц) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
10	ПФ	то же	то же	метод наименьших квадратов

11	ПФ	то же	то же	Окно Кайзера
12	ПФ	(800 Гц, 1200 Гц) max ослабл.: 6 dB	(0, 600 Гц) U (1200 Гц, 4000 Гц) min ослабл.: 40 dB	Окно Кайзера
13	РФ	(0, 600 Гц) U (1400 Гц, 4000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(800 Гц, 1200 Гц) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева
14	РФ	то же	то же	метод наименьших квадратов
15	РФ	то же	то же	Окно Кайзера
16	РФ	(0, 600 Гц) U (1200 Гц, 4000 Гц) max ослабл.: 6 dB	(800 Гц, 1200 Гц) min ослабл.: 40 dB	оптимальный фильтр Чебышева

Порядок выполнения и требования к отчету

В соответствии с номером варианта необходимо синтезировать с помощью пакета SPTool линейные КИХ и БИХ фильтры. Задание на проектирование КИХ фильтра содержится в таблице 3.1, задание на проектирование БИХ фильтра содержится в таблице 3.2. Во всех вариантах частота дискретизации должна быть равна 8 кГц.

Отчет по лабораторной работе должен включать:

1. Титульный лист,
2. Номер задания из Таблицы 3.1 и Таблицы 3.2,
3. Результаты синтеза: передаточная функция;
 - график АЧХ;
 - график ФЧХ;
 - график времени групповой задержки;
 - карта нулей и полюсов, а также заключение об устойчивости фильтра;
 - импульсная характеристика;

- переходная характеристика;
 - структурная схема фильтра.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- a. Назовите основные типы частотно-избирательных фильтров.
- b. Какие исходные данные необходимы для синтеза частотно-избирательного фильтра?
- c. Назовите основные типы аппроксимаций АЧХ фильтров. Каковы их особенности?
- d. Почему для БИХ и КИХ фильтров применяются существенно различные методы синтеза?
- e. Каковы основные характеристики цифровых фильтров?

Литература: [1, с. 89-326; 2, с. 138-199; 3, с. 114-174; 4, с. 313-372; 5, с. 265-422; 6, с. 41-97; 8, с. 391-492]