

## 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ

### 4.1. Цели работы

Синтез дискретного фильтра нижних частот (ФНЧ), удовлетворяющего заданным требованиям, путем использования нескольких алгоритмов:

- билинейного преобразования и четырех стандартных аналоговых прототипов;
- синтеза с использованием оконных функций;
- минимаксного синтеза;
- минимизации среднеквадратической ошибки.

### 4.2. Индивидуальное задание

Требования к синтезируемому фильтру являются индивидуальными для каждой бригады и выдаются преподавателем в виде табл. 4.1.

**Таблица 4.1**

| Частота дискретизации | Граница полосы пропускания | Граница полосы задерживания | Допустимая неравномерность АЧХ в полосе пропускания | Требуемое подавление сигнала в полосе задерживания |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|
| $F_s$                 | $F_{\text{pass}}$          | $F_{\text{stop}}$           | $A_{\text{pass}}$                                   | $A_{\text{stop}}$                                  |
| кГц                   | кГц                        | кГц                         | дБ  | дБ   |
|                       |                            |                             |   |  |

Смысл задаваемых параметров иллюстрирует рис. 4.1. Серые области на рисунке демонстрируют допуски, в которые должна укладываться АЧХ фильтра в полосах пропускания и задерживания. В переходной зоне (диапазон частот  $F_{\text{pass}} \dots F_{\text{stop}}$ ) никаких требований к АЧХ рассчитываемого фильтра не предъявляется.

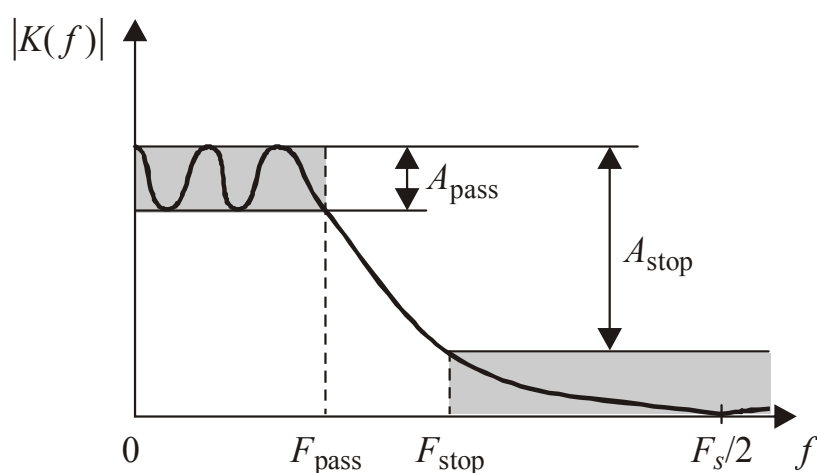


Рис. 4.1. Задание исходных параметров для расчета ФНЧ

Номинальное значение коэффициента передачи фильтра в полосе пропускания равно единице (0 дБ). В зависимости от способа расчета фильтра

отклонения коэффициента передачи в полосе пропускания от единицы могут быть как односторонними, так и двусторонними.

### 4.3. Указания к выполнению работы

Синтез фильтров выполняется с помощью графической среды **Filter Design and Analysis Tool**, входящей в состав пакета расширения *Signal Processing Toolbox* системы MATLAB.

#### 1. Подготовка к началу работы

Запустите MATLAB и сделайте текущей папкой папку вашей бригады на сервере дисплейного класса.

Для запуска среды **Filter Design and Analysis Tool** наберите в главном окне MATLAB следующую команду:

**fdatool**

Появится окно среды **Filter Design and Analysis Tool**.

Переключатель **Response Type** (тип синтезируемой АЧХ) в процессе выполнения работы должен оставаться в положении по умолчанию — **Low-pass** (ФНЧ).

#### 2. Метод билинейного преобразования

Установите переключатель **Design Type** (метод синтеза) в положение **IIR** (рекурсивные фильтры).

В выпадающем списке, расположенном справа от пункта **IIR**, выберите фильтр Баттерворта (**Butterworth**) и выполните следующие действия.


1. Установите переключатель **Filter Order** в положение автоматического определения порядка фильтра (**Minimum Order**).

2. В разделе **Frequency Specifications** задайте частоту дискретизации (**Fs**) и граничные частоты полосы пропускания (**Fpass**) и задерживания (**Fstop**). В выпадающем списке **Units** должны быть выбраны абсолютные единицы измерения частоты, удобные для ввода чисел (Гц или кГц).

3. В разделе **Magnitude Specifications** задайте величину неравномерности АЧХ в полосе пропускания (**Apass**) и подавление сигнала в полосе задерживания (**Astop**). В выпадающем списке **Units** должен быть выбран вариант **dB** (децибелы).

4. Произведите синтез фильтра, щелкнув на кнопке **Design Filter**. Занесите порядок полученного фильтра в табл. 4.2 (он отображается в строке **Order** раздела **Current Filter Information** в левом верхнем углу окна среды FDATool).

5. Сохраните в отчете графики АЧХ, ФЧХ, групповой задержки, импульсной характеристики и расположения нулей и полюсов.

**Справка.** Для переноса необходимых графиков в документ Word следует щелкнуть в панели инструментов среды FDATool на кнопке **Full View Analysis**  или выбрать команду меню **View > Filter Visualization Tool**. Откроется окно визуализатора характеристик фильтров, в котором можно копировать графики в буфер обмена с помощью команды меню **Edit > Copy Figure**.

6. По графику АЧХ определите *реальные* границы переходной зоны получившегося фильтра, то есть определите частоты  $F_{\text{pass}}$  и  $F_{\text{stop}}$ , на которых коэффициент передачи в последний раз достигает значения  $-A_{\text{pass}}$  дБ и в первый раз достигает значения  $-A_{\text{stop}}$  дБ. Измерения производятся визуально, с использованием средств масштабирования графика. Занесите результаты в табл. 4.2.

7. По графику групповой задержки (**Group Delay Response**) определите минимальную ( $\tau_{\text{min}}$ ) и максимальную ( $\tau_{\text{max}}$ ) величину задержки (в отсчетах), вносимой фильтром *в полосе пропускания* (то есть в диапазоне частот  $0 \dots F_{\text{pass}}$ ). Измерения производятся визуально, с использованием средств масштабирования графика. Занесите результаты в табл. 4.2.

Таблица 4.2

| Тип фильтра     | Порядок фильтра | $F_{\text{pass}}$ , кГц | $F_{\text{stop}}$ , кГц | $\tau_{\text{min}}$ , отсчеты | $\tau_{\text{max}}$ , отсчеты |
|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Баттерворта     |                 |                         |                         |                               |                               |
| Чебышева 1 рода |                 |                         |                         |                               |                               |
| Чебышева 2 рода |                 |                         |                         |                               |                               |
| Эллиптический   |                 |                         |                         |                               |                               |

Повторите пункты 1–6 для оставшихся стандартных способов аппроксимации прямоугольных АЧХ:

- фильтр Чебышева 1 рода (**Chebyshev Type I**);
- фильтр Чебышева 2 рода (**Chebyshev Type II**);
- эллиптический фильтр (фильтр Золотарева—Кауэра) (**Elliptic**).

### 3. Синтез с использованием окон

Установите переключатель **Design Method** в положение **FIR** (нерекурсивный фильтр) и выберите метод синтеза с использованием окон (**Window**).

Задайте автоматический расчет порядка фильтра (переключатель **Filter Order** в положении **Minimum order**) и убедитесь, что в разделах **Frequency Specifications** и **Magnitude Specifications** указаны требуемые значения. В разделе **Options** будет автоматически выбрано окно Кайзера (**Kaiser**), так как только для него поддерживается автоматический выбор порядка фильтра.

Синтезируйте фильтр, занесите порядок получившегося фильтра в табл. 4.3 (он отображается в строке **Order** раздела **Current Filter Information** в левом верхнем углу окна среды FDATool), сохраните для отчета гра-

фики его АЧХ, импульсной характеристики и расположения нулей на комплексной плоскости.

Измерьте по графику АЧХ минимальный и максимальный коэффициенты передачи фильтра в полосе пропускания ( $K_{p \min}$  и  $K_{p \max}$ ), а также максимальный коэффициент передачи в полосе задерживания ( $K_{s \max}$ ). Измерения производятся визуально, с использованием средств масштабирования графика. Занесите результаты в табл. 4.3.

Таблица 4.3

| Метод синтеза        | Порядок фильтра | $K_{p \min}$ ,<br>дБ | $K_{p \max}$ ,<br>дБ | $K_{s \max}$ ,<br>дБ | $W_{\text{stop}}$ |
|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Оконный              |                 |                      |                      |                      | —                 |
| Минимаксный          |                 |                      |                      |                      |                   |
| Среднеквадратический |                 |                      |                      |                      |                   |

#### 4. Синтез по минимаксному критерию (метод Ремеза)

Установите переключатель **Design Method** в положение **FIR** (нерекурсивный фильтр) и выберите минимаксный метод синтеза (**Equiripple**).

Задайте автоматический расчет порядка фильтра (переключатель **Filter Order** в положении **Minimum order**) и убедитесь, что в разделах **Frequency Specifications** и **Magnitude Specifications** указаны требуемые значения.

Синтезируйте фильтр, занесите порядок получившегося фильтра в табл. 4.3 (он отображается в строке **Order** раздела **Current Filter Information** в левом верхнем углу окна среды FDATool), сохраните для отчета графики его АЧХ, импульсной характеристики и расположения нулей на комплексной плоскости.

Измерьте по графику АЧХ минимальный и максимальный коэффициенты передачи фильтра в полосе пропускания ( $K_{p \min}$  и  $K_{p \max}$ ), а также максимальный коэффициент передачи в полосе задерживания ( $K_{s \max}$ ). Измерения производятся визуально, с использованием средств масштабирования графика. Занесите результаты в табл. 4.3.

Задайте ручной выбор порядка фильтра (переключатель **Filter Order** в положении **Specify order**) и установите порядок фильтра, получившийся при автоматическом его выборе.

Постепенно увеличивая значение весового коэффициента для полосы задерживания (поле **Wstop** в разделе **Magnitude Specifications**) и синтезируя фильтр заново, добейтесь того, чтобы уровень боковых лепестков АЧХ удовлетворял требованиям к подавлению сигнала в полосе задерживания (то есть не превышал  $-A_{\text{stop}}$  дБ). Занесите найденное значение **Wstop** в табл. 4.3.

## 5. Синтез путем минимизации среднеквадратической ошибки

Установите переключатель **Design Method** в положение **FIR** (нерекурсивный фильтр) и выберите метод синтеза по минимуму среднеквадратической ошибки (**Least-squares**).

Задайте ручное указание порядка фильтра (переключатель **Filter Order** в положении **Specify order**) и введите значение порядка фильтра, полученное при автоматическом выборе порядка для минимаксного метода ранее в п. 4.

Убедитесь, что в разделах **Frequency Specifications** и **Magnitude Specifications** указаны требуемые значения. Синтезируйте фильтр.

Постепенно увеличивая значение весового коэффициента для полосы задерживания (поле **Wstop** в разделе **Magnitude Specifications**) и синтезируя фильтр заново, добейтесь того, чтобы уровень боковых лепестков АЧХ удовлетворял требованиям к подавлению сигнала в полосе задерживания (то есть не превышал  $-A_{\text{stop}}$  дБ). Занесите найденное значение **Wstop** в табл. 4.3.

Сохраните в отчете графики АЧХ фильтра, его импульсной характеристики и расположения нулей на комплексной плоскости.

Измерьте по графику АЧХ минимальный и максимальный коэффициенты передачи фильтра в полосе пропускания ( $K_{p \min}$  и  $K_{p \max}$ ), а также максимальный коэффициент передачи в полосе задерживания ( $K_{s \max}$ ). Измерения производятся визуально, с использованием средств масштабирования графика. Занесите результаты в табл. 4.3.

## 6. Сохранение результатов синтеза

В завершение работы сохраните сеанс среды FDATool командой меню **File > Save session** или **Save session as**. В сохраненном файле содержатся последние значения всех введенных во время работы параметров, что позволит при необходимости легко восстановить все полученные графики.

### 4.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- исходные данные в виде табл. 4.1;
- формулу (получить самостоятельно) и построенный по ней график импульсной характеристики *идеального дискретного ФНЧ* с частотой среза, равной границе полосы пропускания  $F_{\text{pass}}$ .
- результаты измерений в виде заполненных табл. 4.2 и 4.3;
- перечисленные выше графики АЧХ, ФЧХ, групповой задержки, импульсных характеристик, расположения нулей/полюсов для синтезированных фильтров;
- выводы по результатам работы.