

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению лабораторных работ № 5 по дисциплине «Цифровая обработка
сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и
комплексы» очной формы обучения**

Воронеж 2022

УДК 621.391.083.92
ББК 32.811.3

Составитель:
д. ф.-м.н. Кузьменко Р.В

Цифровая обработка сигналов: методические указания к выполнению лабораторных работ № 5 по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Р.В. Кузьменко. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 35 с.

Основной целью указани к выполнению лабораторных работ является поддержка выработка навыков цифровой обработки сигналов и средств их компьютерного моделирования в системе MATLAB.

Издание предназначено для проведения лабораторных работ по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов 4-го курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЦОС Лаб. работа № 5.docx

Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.391.083.92
ББК 32.811.3

Рецензент: Доктор технических наук, заведующий кафедрой
«Конструирования и производства радиоаппаратуры»
Башкиров А.В.

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

Лабораторная работа №5

Синтез КИХ-фильтров методом окон

Цель работы: изучить процедуру синтеза КИХ-фильтров методом окон и овладеть программными средствами MATLAB для синтеза и анализа КИХ-фильтров; познакомиться с GUI WinTool (Window Design and Analysis Tool — средство создания и анализа окон) и GUI FVTool (Filter Visualization Tool — средство визуализации фильтра).

11.1. Краткая теоретическая справка

Цифровой фильтр (ЦФ) представляет собой линейную дискретную систему (ЛДС), выполняющую преобразование входной последовательности в выходную по алгоритму, описываемому разностным уравнением, который отображается заданной структурой, реализованной аппаратно, программно или аппаратно-программно.

Проектирование ЦФ выполняется в три этапа:

1. Синтез ЦФ, включающий следующие основные шаги:

1.1. Выбор типа ЦФ.

Двум типам ЛДС — нерекурсивная (КИХ) и рекурсивная (БИХ) — соответствуют два типа ЦФ:

КИХ-фильтр (FIR Filter — Finite Impulse Response Filter); БИХ-фильтр (IIR Filter — Infinite Impulse Response Filter).

1.2. Задание требований к характеристикам ЦФ.

Требования к характеристикам ЦФ зависят от его типа (КИХ или БИХ) и назначения ЦФ (частотно-избирательный, преобразователь Гильберта, дифференциатор, амплитудный или фазовый корректор и т. д.).

По умолчанию подразумевают *частотно-избирательные* ЦФ, выполняющие селекцию спектральных составляющих входной последовательности.

Выделяют четыре основных 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).

1.3. Выбор метода синтеза.

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

1.4. Расчет передаточной функции ЦФ.

1.5. Выбор структуры ЦФ.

2. Моделирование структуры ЦФ с учетом эффектов квантования.

3. Реализация структуры ЦФ.

Структура ЦФ может быть реализована на базе цифрового устройства — цифрового процессора обработки сигналов (ЦПОС), программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) и т. п.

Рассмотрение этого этапа выходит за рамки данной книги.

11.1.1. Свойства КИХ-фильтров

КИХ-фильтр описывается передаточной функцией $H(z)$ (см. (8.3)):

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n} \quad (11.1)$$

Длиной и порядком КИХ-фильтра называют соответственно число коэффициентов N и порядок R передаточной функции, равный:

$$R = N - 1 \quad (11.2)$$

КИХ-фильтры характеризуются следующими особенностями:

☞ возможностью обеспечить строго линейную ФЧХ (ЛФЧХ);

☞ устойчивостью по определению.

Линейная ФЧХ (с точностью до скачков на π)¹ КИХ-фильтра обеспечивается в том случае, если для его импульсной характеристики (ИХ) $h(n)$ выполняется одно из условий:

☞ симметрии:

$$h(n) = h(N - 1 - n); \quad (11.3)$$

☞ антисимметрии:

$$h(n) = -h(N - 1 - n), \quad (11.4)$$

где ось симметрии/антисимметрии ИХ $h(n)$ проходит через точку $n=R/2$.

По двум признакам — симметрии/антисимметрии ИХ и четности/нечетности порядка R выделяют четыре типа КИХ-фильтров с ЛФЧХ (табл. 11.1), на базе которых синтезируется ЦФ.

Помимо частотно-избирательных ЦФ, в табл. 11.1 включены два специальных КИХ-фильтра — цифровой преобразователь Гильберта (ЦПГ) и цифровой дифференциатор (ЦД) [1].

Таблица 11.1. Четыре типа КИХ-фильтров с ЛФЧХ

Тип КИХ-фильтра	ЛФЧХ (с точностью до скачков на π)	ЦФ
Тип 1 (Type-1): порядок R — четный; ИХ $h(n)$ — симметричная	$\phi(\omega) = -\frac{\hat{\omega}R}{2}$	ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ

Тип 2 (Type-2): порядок R — нечетный; $h(n)$ — симметричная	$\phi(\omega) = -\frac{\hat{\omega}R}{2}$	ФНЧ, ПФ
Тип 3 (Type-3): порядок R — четный; $h(n)$ — антисимметричная; $p = \left(\frac{R}{2}\right) = 0$	$\phi(\hat{\omega}) = \frac{\pi}{2} - \frac{\hat{\omega}R}{2}$	ПФ ЦПГ ЦД
Тип 4 (Type-4): порядок R — нечетный; $h(n)$ — антисимметричная	$\phi(\hat{\omega}) = \frac{\pi}{2} - \frac{\hat{\omega}R}{2}$	ФВЧ, ПФ ЦПГ ЦД

11.1.2. Задание требований к АЧХ

Методы синтеза частотно-избирательных КИХ-фильтров изначально предполагают ЛФЧХ, поэтому требования задаются к нормированной АЧХ $\hat{A}(f)$ в основной полосе частот $[0; f_d/2]$ и включают в себя:

✿ частоту дискретизации f_d ;

✿ граничные частоты полос пропускания (ПП) и полос задерживания (ПЗ), для которых введены условные обозначения:

- f_χ — граничная частота ПП для ФНЧ и ФВЧ;
- f_k — граничная частота ПЗ для ФНЧ и ФВЧ;
- $f_{-\chi}, f_\chi$ — левая и правая граничные частоты ПП для ПФ и РФ;
- f_{-k}, f_k — левая и правая граничные частоты ПЗ для ПФ и РФ;

✿ максимально допустимые отклонения АЧХ $\hat{A}(f)$, для которых введены условные обозначения:

- δ_1 — от единицы в ПП (для ФНЧ, ФВЧ и ПФ);
- δ_2 — от нуля в ПЗ (для ФНЧ, ФВЧ и РФ);
- δ_{11} — от единицы в левой полосе пропускания — ПП1 (для РФ);
- δ_{12} — от единицы в правой полосе пропускания — ПП2 (для РФ);
- δ_{21} — от нуля в левой полосе задерживания — ПЗ1 (для ПФ);
- δ_{22} — от нуля в правой полосе задерживания — ПЗ2 (для ПФ).

На рис. 11.1—11.4 приведены примеры идеальной АЧХ и требований к АЧХ для фильтров различного типа избирательности.

Требования могут задаваться к АЧХ в децибелах — к характеристике ослабления:

$$\hat{A}(f)(\text{дБ}) = 20 \lg(\hat{A}(f)) \quad (11.5)$$

или к характеристике затухания:

$$\hat{A}(f)(\text{дБ}) = 20 \lg(\hat{A}(f)) \quad ($$

В MATLAB требования задаются к характеристике затухания — АЧХ (дБ).

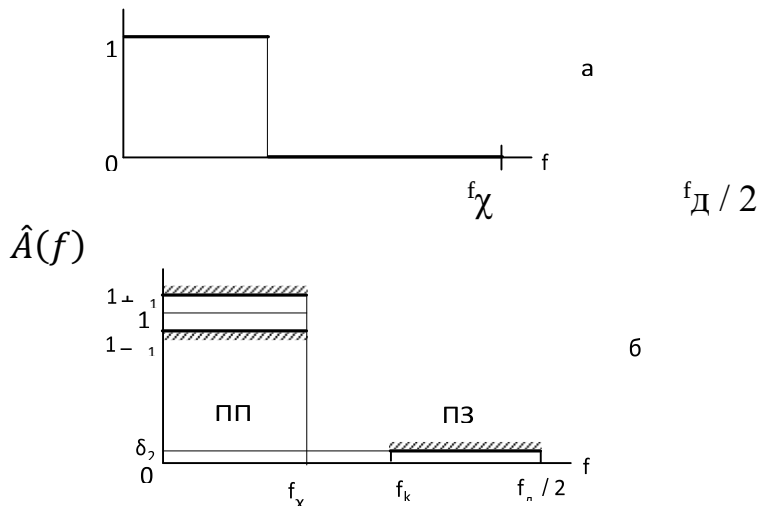


Рис. 11.1. Идеальная АЧХ ФНЧ (а), требования к АЧХ ФНЧ (б)

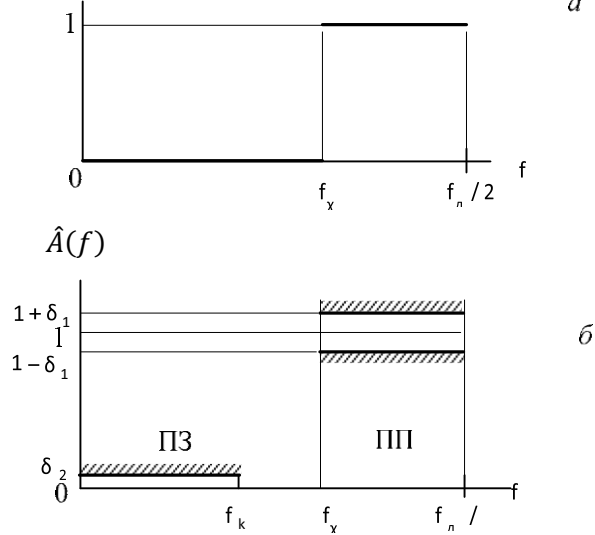


Рис. 11.2. Идеальная АЧХ ФВЧ (а), требования к АЧХ ФВЧ (б)

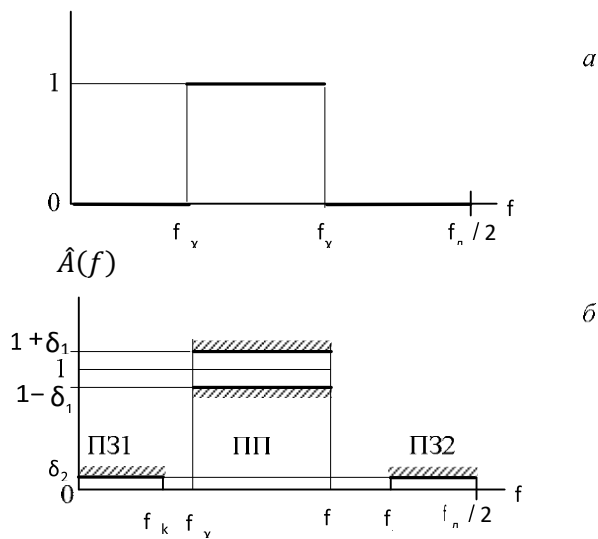


Рис. 11.3. Идеальная АЧХ ПФ (а), требования к АЧХ ПФ (б)

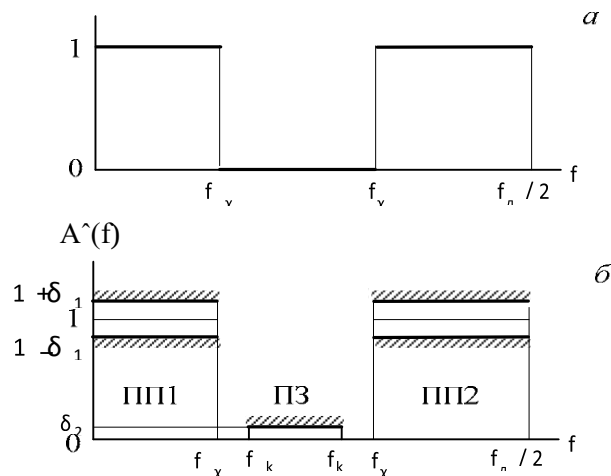


Рис. 11.4. Идеальная АЧХ РФ (а), требования к АЧХ (б) РФ (б)

В требованиях к характеристике затухания (11.6) вместо значений максимально допустимых отклонений δ_1 , δ_2 , δ_{11} , δ_{12} и δ_{22} задаются:

- $a_{\max}$ (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП (для ФНЧ, ФВЧ и ПФ);
- $a_{\min}$ (дБ) — минимально допустимое затухание в ПЗ (для ФНЧ, ФВЧ и РФ);
- $a_{1 \max}$ (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП1 (для РФ);
- $a_{2 \max}$ (дБ) — максимально допустимое затухание в ПП2 (для РФ);
- $a_{1 \min}$ (дБ) — минимально допустимое затухание в ПЗ1 (для ПФ);
- $a_{2 \min}$ (дБ) — минимально допустимое затухание в ПЗ2 (для ПФ).

На рис. 11.5 приведен пример требований к характеристике затухания ФНЧ.

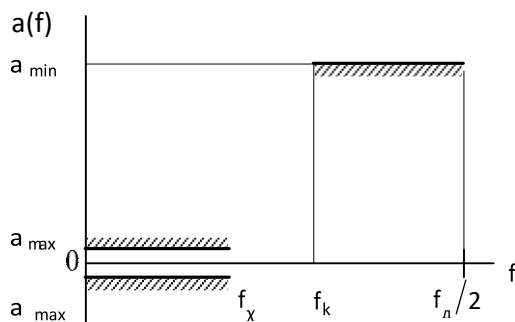


Рис. 11.5. Требования к характеристике затухания ФНЧ

Взаимосвязь между значениями максимально допустимых отклонений и их соответствующими значениями в децибелах, например, между δ_1 и δ_2 и $a_{\max}$ и $a_{\min}$ устанавливается формулами:

$$a_{\max} = -20 \lg(1 - \sigma_1) \text{ (дБ)} \quad ($$

11.7)

$$a_{min} = -20 \lg(\sigma_2) \text{ (дБ)} \quad (11.8)$$

и наоборот:

$$\sigma_1 = 1 - 10^{-a_{max}/20} \quad (11.9)$$

$$\sigma_2 = 10^{-a_{min}/20} \quad (11.10)$$

11.1.3. Структуры КИХ-фильтров

Структура (структурная схема) ЦФ отображает *алгоритм* вычисления реакции по разностному уравнению и определяется видом *передаточной функции*.

Структурные схемы КИХ-фильтров с ЛФЧХ приведены на рис. 11.6.

В MATLAB структура КИХ-фильтра с ЛФЧХ описывается в виде объекта dfilt:

`Hd = dfilt.structure(b)`

где Hd — имя объекта dfilt; dfilt — тип объекта; structure — функция, задающая конкретную структуру объекта Hd (табл. 11.2); b — параметр функции structure — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1).

Для КИХ-фильтров свойства объекта dfilt, выводимые по его имени, включают в себя:

✿ FilterStructure — структура КИХ-фильтра;

✿ Arithmetic — форма представления данных;

✿ Numerator — коэффициенты передаточной функции;

✿ PersistentMemory — начальные условия при вычислении реакции; значение false соответствует ННУ (см. разд. 8.1).

При синтезе КИХ-фильтров с ЛФЧХ методом окон ИХ может быть только симметричной, чему соответствует структура Direct-Form Symmetric FIR.

Таблица 11.2. Функции structure и структуры КИХ-фильтров с ЛФЧХ

Функция structure	Параметр функции structure	Структура КИХ-фильтра
dffir	b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1)	Direct-Form FIR (прямая)
dfsymfir	b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1), симметричных относительно N/2	Direct-Form Symmetric FIR (прямая приведенная с симметричной ИХ, см. рис. 11.6, а)
dfasymfir	b — вектор коэффициентов	Direct-Form Antisymmetric FIR

	передаточной функции (11.1), антисимметричных относительно $N/2$; при четном N — $b(N/2)=0$	(прямая приведенная с антисимметричной ИХ, см. рис. 11.6, б)
--	---	---

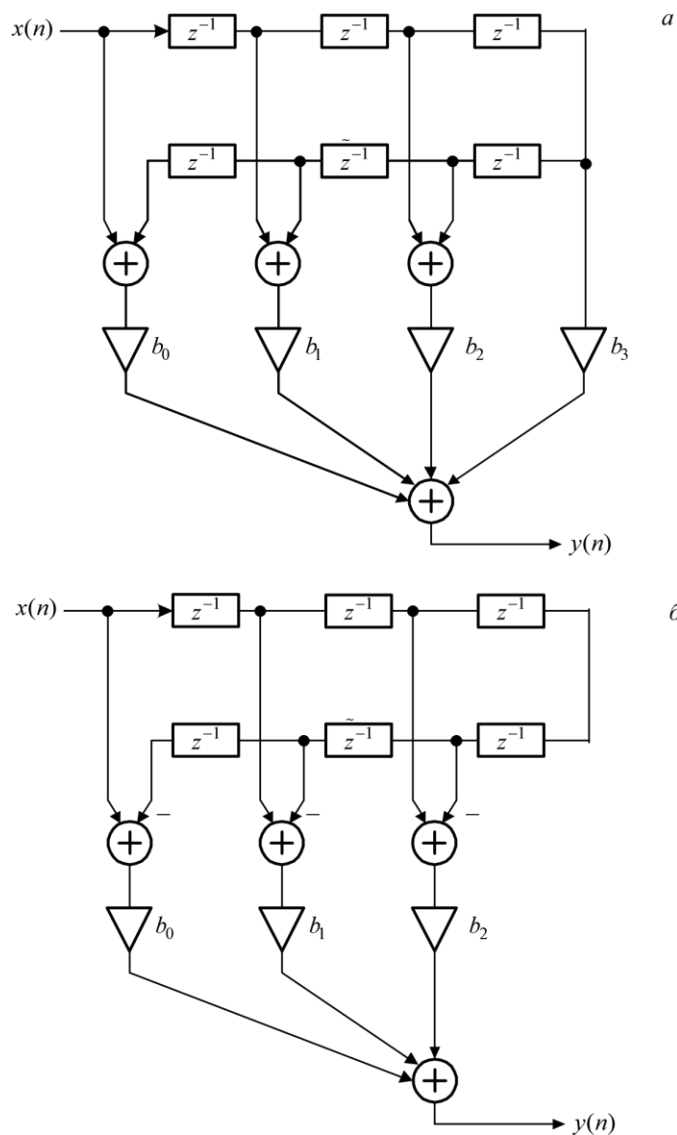


Рис. 11.6. Структурные схемы КИХ-фильтров с ЛФЧХ: прямая приведенная с симметричной ИХ (Direct-Form Symmetric FIR) для КИХ-фильтра 1-го типа длины $N = 7$ (а); прямая приведенная с антисимметричной

ИХ (Direct-Form Antisymmetric FIR) для КИХ-фильтра 3-го типа длины $N = 7$ ($b_2 = 0$) (б)

11.1.4. Процедура синтеза КИХ-фильтров методом окон

В общем случае синтез ЦФ заключается в расчете передаточной функции. Согласно (11.1), синтез КИХ-фильтра сводится к расчету его импульсной характеристики.

Процедура синтеза КИХ-фильтра методом окон является итерационной и включает в себя следующие шаги¹:

1. Задание требований к АЧХ.
2. Оценка порядка фильтра R и выбор окна.

Оценкой порядка R называют начальное значение порядка в итерационной процедуре синтеза фильтра.

Окном называют весовую функцию $w(n)$ — вещественную неотрицательную последовательность длины $N = R + 1$, максимальную в центре и монотонно спадающую к границам. Для стандартных окон MATLAB значения $w(n)$ вычисляются автоматически по известным аналитическим формулам.

3. Расчет импульсной характеристики идеального фильтра $h(n_i)$, симметрично усеченной до длины $N = R + 1$ (выделенной окном Дирихле).

Импульсная характеристика $h(n_i)$ может быть только симметричной и рассчитывается автоматически по известным для идеальных ФНЧ, ФВЧ, ПФ, РФ аналитическим формулам. Обязательным параметром усеченной ИХ $h(n_i)$ является частота разрыва (отсечки), на которой нормированная АЧХ равна 0,5.

Для ФНЧ и ФВЧ указывается одна частота разрыва, равная:

$$f_c = \frac{f_{\chi} + f_k}{2} \quad (11.11)$$

а для ПФ и РФ — две (левая и правая), равные:

$$f_{c1} = \frac{f_{-k} + f_{-\chi}}{2} \quad (11.12)$$

$$f_{c2} = \frac{f_k + f_{\chi}}{2} \quad (11.13)$$

4. Расчет импульсной характеристики реального фильтра с симметричной $h(n)$ длины N в виде произведения:

$$h(n) = h_i(n)w(n)$$

5. Проверка выполнения требований к АЧХ.

Проверка заключается в сравнении фактических максимальных по модулю отклонений АЧХ от идеальной АЧХ в ПП и ПЗ с заданными максимально допустимыми отклонениями.

Возможны две ситуации.

¹ С теоретическими основами метода окон можно познакомиться в [2, 3].

- Требования к АЧХ не выполняются.

В этом случае следует увеличить порядок R и вернуться к пп. 3—5.

- Требования к АЧХ выполняются.

В этом случае следует уменьшить порядок R и вернуться к пп. 3—5.

В обоих случаях увеличение/уменьшение порядка R продолжается до тех пор, пока не будет найден минимальный порядок $R_{\min}$, при котором выполняются требования к АЧХ.

6. Выбор структуры КИХ-фильтра.

11.1.5. Синтез КИХ-фильтров методом окон в MATLAB

Основной проблемой синтеза КИХ-фильтров методом окон является оценка порядка фильтра R (длины окна $N = R+1$) по заданным требованиям к АЧХ. В общем случае он может задаваться произвольно, а затем уточняться при проверке выполнения требований к АЧХ. Однако эта задача успешно решена для окна Кайзера, где порядок фильтра и требования к АЧХ связаны аналитической зависимостью [1, 2]. Поэтому далее процедура синтеза КИХ-фильтра методом окон рассматривается с применением окна Кайзера.

Синтез КИХ-фильтров методом окон с произвольным окном выполняется с помощью функции:

$b = \text{fir1}(R, wc, ftype, win, normalizasion)$

где R — порядок КИХ-фильтра $R(11.2)$; wc — вектор нормированных частот разрыва (см. разд. 11.1.4):

☞ для ФНЧ и ФВЧ — с одним элементом $wc(1)$, равным

$$\hat{f}_c = \frac{f_c}{f_d/2} \quad (11.14)$$

☞ для ПФ и РФ — с двумя элементами $wc(1)$ и $wc(2)$, соответственно равными:

$$\hat{f}_{c1} = \frac{f_{c1}}{f_d/2} \quad (11.15)$$

$$\hat{f}_{c2} = \frac{f_{c2}}{f_d/2} \quad (11.16)$$

$ftype$ — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

☞ 'high' — для ФВЧ;

☞ 'stop' — для РФ;

по умолчанию (если значение параметра не задано), синтезируется ФНЧ или ПФ. win — имя стандартной функции для расчета окна $w(n)$ длины $N = R+1$; для окна Кайзера — $\text{kaiser}(R+1, beta)$, где $beta$ — параметр β окна Кайзера.

$normalizasion$ — параметр (флаг), управляющий нормированием АЧХ таким образом, чтобы обеспечить ее значение, равное единице, в центре ПП (для РФ — в центре ПП1), и принимающий значения:

☞ 'scale' (по умолчанию) — нормирование выполняется;

☞ 'noscale' — нормирование не выполняется;

b — вектор коэффициентов передаточной функции (11.1) длины $N = R + 1$.

Для окна Кайзера входные параметры функции `fir1` — порядок R и вектор ws , а также тип избирательности `ftype` и параметр окна Кайзера β — определяются по заданным требованиям к АЧХ с помощью функции:

`[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs)`

где f — вектор граничных частот ПП и ПЗ в порядке их следования слева направо в шкале частот f (Гц) в основной полосе частот $[0; f_d/2]$; m — вектор значений идеальной АЧХ (единица — в ПП и нуль — в ПЗ) в порядке их следования слева направо; соблюдается условие $\text{length}(f) = 2 * \text{length}(m) - 2$; `ripple` — вектор максимально допустимых отклонений АЧХ в порядке их следования слева направо; F_s — частота дискретизации f_d (Гц); R — оценка порядка фильтра R с точностью до ± 2 ; ws — вектор, определенный ранее для функции `fir1`; β — параметр β окна Кайзера; `ftype` — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

- 'low' — для ФНЧ;
- 'high' — для ФВЧ;
- 'DC-0' — для ПФ;
- 'stop' — для РФ.

11.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с синтезом КИХ-фильтров методом окон с применением окна Кайзера, описанием их структур и анализом характеристик с использованием программных средств MATLAB.

11.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файлов `lr_11_low`, `lr_11_high`, `lr_11_pass` и `lr_11_stop` и function-файлов `check_low`, `check_high`, `check_pass`, `check_stop` и `plot_fir`, которые хранятся на прилагаемом компакт-диске в папке

`LAB_DSP\LAB_11`.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке `LAB_11` по команде контекстного меню **Add to Path | Selected Folders**.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 11.3—11.6 для номера бригады $N_{бр}$, где $N_{бр} = 1, 2, \dots, 30$, и включают в себя требования к АЧХ КИХ-фильтров ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ.

На прилагаемом компакт-диске в папке `Tables\Tables_11` хранятся табл. 11.3—11.6 исходных данных, примеры их заполнения для $N_{бр} = 1$ и табл. 11.7 для п. 2 задания.

Таблица 11.3. Требования к АЧХ ФНЧ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 5000 \cdot 100 + N_{бр}$	$F_s =$

f_{χ}	Граничная частота ПП	$f_{\chi} = \frac{f_d}{10} + 20N_{\text{бп}}$	$f_t =$
f_k	Граничная частота ПЗ	$f_k = \frac{f_d}{10} + 250 + 25N_{\text{бп}}$	$f_k =$
δ_1	Максимально допустимое отклонение в ПП	$\delta_1 = 0,05$	$d1 = 0.05$
δ_2	Максимально допустимое отклонение в ПЗ	$\delta_2 = 0,01$	$d2 = 0.01$

Таблица 11.4. Требования к АЧХ ФВЧ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 5000 + 100 N_{\text{бп}}$	$F_s =$
f_k	Граничная частота ПЗ	$f_{\chi} = \frac{f_d}{10} + 20N_{\text{бп}}$	$f_k =$
f_{χ}	Граничная частота ПП	$f_k = \frac{f_d}{10} + 250 + 25N_{\text{бп}}$	$f_t =$

Таблица 11.4 (окончание)

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
δ_2	Максимально допустимое отклонение в ПЗ	$\delta_2 = 0,01$	$d2 = 0.01$
δ_1	Максимально допустимое отклонение в ПП	$\delta_1 = 0,05$	$d1 = 0.05$

Таблица 11.5. Требования к АЧХ ПФ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
----------------------	-------------------	---------------------	---------------

$f_{\text{д}}$	Частота дискретизации	$f_{\text{д}}=5000 + 100 N_{\text{бр}}$	$F_s =$
f_{-k}	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_{\text{д}}}{20} + 20N_{\text{бр}}$	$f_{k1} =$
$f_{-\chi}$	Граничная частота ПП1	$f_{-\chi} = \frac{f_{\text{д}}}{20} + 250 + 25N_{\text{бр}}$	$f_{t1} =$
f_{χ}	Граничная частота ПП2	$f_{\chi} = \frac{f_{\text{д}}}{4} + 25N_{\text{бр}}$	$f_{t2} =$
f_k	Граничная частота ПЗ2	$f_k = \frac{f_{\text{д}}}{4} + 250 + 30N_{\text{бр}}$	$f_{k2} =$
δ_{21}	Максимально допустимое отклонение в ПЗ1	$\delta_{21}= 0,01$	$d_{21} = 0.01$
δ_1	Максимально допустимое отклонение в ПП	$\delta_1 = 0,05$	$d_1 = 0.05$
δ_{22}	Максимально допустимое отклонение в ПЗ2	$\delta_{22}=0,01$	$d_{22} = 0.01$

Таблица 11.6. Требования к АЧХ РФ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
$f_{\text{д}}$	Частота дискретизации	$f_{\text{д}} = 5000 + 100 N_{\text{бр}}$	$F_s =$
$f_{-\chi}$	Граничная частота ПП1	$f_{-\chi} = \frac{f_{\text{д}}}{20} + 20N_{\text{бр}}$	$f_{t1} =$
f_{-k}	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_{\text{д}}}{20} + 250 + 25N_{\text{бр}}$	$f_{k1} =$

Таблица 11.6 (окончание)

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_k	Граничная частота ПЗ2	$f_k = \frac{f_d}{4} + 25N_{6p}$	fk2 =
f_χ	Граничная частота ПП2	$f_\chi = \frac{f_d}{4} + 250 + 30N_{6p}$	ft2 =
δ_{11}	Максимально допустимое отклонение в ПП1	$\delta_1 = 0,05$	d11 = 0.05
δ_2	Максимально допустимое отклонение в ПЗ	$\delta_2 = 0,01$	d2 = 0.01
δ_{12}	Максимально допустимое отклонение в ПП2	$\delta_2 = 0,05$	d12 = 0.05

Задание на лабораторную работу заключается в синтезе КИХ-фильтров методом окон с применением окна Кайзера и анализе их характеристик и для каждого типа избирательности (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ) включает в себя выполнение следующих пунктов:

1. Ввод требований к АЧХ.
2. Вычисление оценки порядка КИХ-фильтра, нормированных частот разрыва и параметра β окна Кайзера.

Выведенные значения нормированных частот разрыва (w_c) и параметра β (beta) внести в табл. 11.7.

Пояснить:

- какая функция используется для вычисления оценки порядка КИХ-фильтра, нормированных частот разрыва и параметра β ;
- с какой целью рассчитывается оценка порядка КИХ-фильтра;
- как рассчитываются частоты разрыва в шкале частот f (Гц).

Таблица 11.7. Результаты синтеза КИХ-фильтров методом окон

Тип	Метод окон с
-----	--------------

избирательности фильтра	окном Кайзера		
	порядок фильтра R	вектор нормированных частот разрыва ω_c	параметр β
ФНЧ			
ФВЧ			
ПФ			
РФ			

3. Синтез КИХ-фильтра методом окон.

Для синтеза КИХ-фильтра организовать цикл, в теле которого выполнить следующие действия:

- синтезировать КИХ-фильтр;
- проверить выполнение требований к АЧХ.

Для проверки выполнения требований к АЧХ вывести и сравнить *фактические* максимальные (по модулю) отклонения в ПП и ПЗ с *заданными* максимально допустимыми отклонениями.

Для вывода фактических максимальных по модулю отклонений использовать созданные function-файлы (см. разд. 11.4.5);

- по результатам проверки, увеличивая или уменьшая порядок КИХ-фильтра, определить его минимальный порядок, при котором выполняются требования к АЧХ.

При увеличении/уменьшении порядка КИХ-фильтра необходимо учитывать соответствие между типом избирательности ЦФ и типом КИХ-фильтра

(см. табл. 11.1).

Полученное в результате итерационной процедуры значение порядка R КИХ-фильтра внести в табл. 11.7.

Пояснить:

☼какая функция используется для синтеза КИХ-фильтра;

☼какой из параметров данной функции соответствует коэффициентам передаточной функции КИХ-фильтра;

☼смысл итерационной процедуры синтеза;

☼какие типы КИХ-фильтров можно использовать в методе окон.

4. Анализ характеристик КИХ-фильтра.

Для вывода графиков ИХ, АЧХ и ФЧХ КИХ-фильтра использовать function-файл `plot_fir` (см. разд. 11.4.5).

Пояснить:

☼вид ИХ;

☼вид АЧХ в ПП и ПЗ (воспользуйтесь кнопкой **Zoom in** на панели

☼инструментов); вид ФЧХ.

5. Описание структуры КИХ-фильтра в виде объекта `dfilt` с именами:

☞F_lowpass — ФНЧ;
 ☞F_highpass — ФВЧ;
 ☞F_bandpass — ПФ;
 ☞F_bandstop — РФ.

Пояснить:

- что отображает структура и чем определяется ее вид;
- свойства объекта dfilt.

6. Знакомство с GUI FVTool.

Обратиться к GUI FVTool по команде: fvtool(Hd)

где Hd — имя объекта dfilt, и проанализировать характеристики синтезированных КИХ-фильтров.

7. Знакомство с GUI WinTool.

Для знакомства с окнами и их характеристиками обратиться к GUI WinTool по команде:

wintool

11.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должны быть представлены табл. 11.3—11.6 исходных

данных для своего номера бригады бр N .

Для четырех типов избирательности КИХ-фильтра — ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ — соз-

даны четыре script-файла. Для запуска script-файла к нему необходимо обратиться

поимени:

>>lr_11_low— ФНЧ

>>lr_11_high— ФВЧ

>> lr_11_pass — ПФ

>>lr_11_stop— РФ

Листинги данных script-файлов представлены в разд. 11.4.1—11.4.4.

Для *принудительного снятия* script-файла с выполнения следует нажать комбина-

цию клавиш <Ctrl>+<Break>.

При выполнении script-файла текущие окна с графиками *не закрывать*.

11.4.1. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФНЧ

Листинг script-файла lr_11_low имеет вид:

```
>> type lr_11_low
```

```
script
```

```
clc
```

```
clear
```

```
disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ МЕТОДОМ ОКОН')
```

```
disp('%')
```

```
disp('%')
```

```
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ ФНЧ')
```

```

disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = ');% ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
ft = input('ft = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП (Гц)
fk = input('fk = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц)
d1 = input('d1 = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПП
d2 = input('d2 = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПЗ
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('--> ');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')
pause
m = [1 0]; % ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
f = [ft fk];% ВЕКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d1 d2];% ВЕКТОР МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs);% ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['R = ' num2str(R)]) % ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc = ' num2str(wc)]) % НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА РАЗРЫВА
disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause

```

```

disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ')
ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ;
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза КИХ-фильтра ФНЧ нажмите <ENTER>')
pause
b1 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФИЦИЕНТЫ КИХ-
ФИЛЬТРА
ФНЧ
disp('%')
disp('%')
disp([' Синтезирован КИХ-фильтр ФНЧ порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПП (dp) и ПЗ (ds) и ЗАДАННЫХ отклонений d1 и d2 нажмите
<ENTER>')
pause
[dp,ds] = check_low(b1,ft,fk,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ
ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПП И ПЗ
disp('%')
disp(['dp = ' num2str(dp) ' ds = ' num2str(ds)])
disp(['d1 = ' num2str(d1) ' d2 = ' num2str(d2)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')
ORDER = input('--> ');
if ORDER==0
R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end
end
disp('%')
disp([' Синтезирован ФНЧ минимального порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')

```

```

disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Lowpass FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,
Phase','NumberTitle','off')
plot_fir(R,b1,Fs)% ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ В ВИДЕ
ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_lowpass = dfilt.dfsymfir(b1) % ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР ФНЧ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗАВЕРШЕН')

```

11.4.2. Синтез и анализ КИХ-фильтра ФВЧ

Листинг script-файла lr_11_high имеет вид:

```

>> type lr_11_high
script
clc
clear
disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ МЕТОДОМ ОКОН')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ ФВЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ')

```

```

DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = ');           % НОМЕР БРИГАДЫ
Fs = input('Fs = ');           % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
fk = input('fk = ');           % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц)
ft = input('ft = ');           % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП (Гц)
d2 = input('d2 = ');           % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПЗ
d1 = input('d1 = ');           % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПП
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('--> ');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')
pause
m = [0 1]; % ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
f = [fk ft]; % ВЕКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d2 d1]; % ВЕКТОР МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['R = ' num2str(R)]) % ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc = ' num2str(wc)]) % НОРМИРОВАННАЯ ЧАСТОТА РАЗРЫВА
disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ')

```

```

ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ;
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза КИХ-фильтра ФВЧ нажмите <ENTER>')
pause
b2 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФИЦИЕНТЫ
КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ
disp('%')
disp('%')
disp([' Синтезирован КИХ-фильтр ФВЧ порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПЗ (ds) и ПП (dp) и ЗАДАННЫХ отклонений d2 и d1 нажмите <ENTER>')
pause
[ds,dp] = check_high(b2,fk,ft,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ
ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПЗ И ПП
disp('%')
disp(['ds = ' num2str(ds) '          dp = ' num2str(dp)])
disp(['d2 = ' num2str(d2) '          d1 = ' num2str(d1)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')
ORDER = input('--> ');
if ORDER==0
R= input('R = ');% ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
while rem(R,2)~=0
disp('% Порядок фильтра выбран НЕПРАВИЛЬНО')
R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end
end
end
disp('%')
disp([' Синтезирован ФВЧ минимального порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')

```

```

disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Highpass FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,
Phase','NumberTitle','off')
plot_fir(R,b2,Fs)% ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ В ВИДЕ
ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_highpass = dfilt.dfssymfir(b2) % ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР ФВЧ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗАВЕРШЕН')
11.4.3. Синтез и анализ КИХ-фильтра ПФ
Листинг script-файла lr_05_pass имеет вид:
>> type lr_11_pass
script
clc
clear
disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ МЕТОДОМ ОКОН')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ ПФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ')
DATA=0;

```

```

while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕР БРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
fk1 = input('fk1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ1 (Гц)
ft1 = input('ft1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 (Гц)
ft2 = input('ft2 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП2 (Гц)
fk2 = input('fk2 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц)
d21 = input('d21 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В
ПЗ1
d1 = input('d1 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПП
d22 = input('d22 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В
ПЗ2
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('--> ');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')
pause
m = [0 1 0]; % ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
f = [fk1 ft1 ft2 fk2]; % ВЕКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d21 d1 d22]; % ВЕКТОР МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ
ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОКНА
КАЙЗЕРА
disp(['R = ' num2str(R)]) % ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc(1) = ' num2str(wc(1)) ' wc(2) = ' num2str(wc(2))']) % ВЕКТОР
НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ РАЗРЫВА
disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')

```

```

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ')
ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ;
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза КИХ-фильтра ПФ нажмите <ENTER>')
pause
b3 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ
КИХ-ФИЛЬТРА ПФ
disp('%')
disp('%')
disp([' Синтезирован КИХ-фильтр ПФ порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПЗ1 (ds1), ПП (dp) и ПЗ2 (ds2) и ЗАДАННЫХ отклонений d21, d1 и
d22
нажмите <ENTER>')
pause
[ds1,dp,ds2] = check_pass(b3,fk1,ft1,ft2,fk2,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ
ФАКТИЧЕСКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПЗ1, ПП И ПЗ2
disp('%')
disp(['ds1=' num2str(ds1) ' dp = ' num2str(dp) ' ds2 = '
num2str(ds2)])
disp(['d21 = ' num2str(d21) ' d1 = ' num2str(d1) ' d22 = '
num2str(d22)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')
ORDER = input('--> ');
if ORDER==0
R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end

```

```

end
disp('%')
disp([' Синтезирован ПФ минимального порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА ПФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Bandpass FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,
Phase','NumberTitle','off')
plot_fir(R,b3,Fs)% ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ В ВИДЕ
ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_bandpass = dfilt.dfssymfir(b3) % ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР ПФ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗАВЕРШЕН')
11.4.4. Синтез и анализ КИХ-фильтра РФ
Листинг script-файла lr_11_stop имеет вид:
>> type lr_11_stop
script
clc
clear
disp('% ЛР №11. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА РФ МЕТОДОМ ОКОН')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ РФ')

```

```

disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
ft1 = input('ft1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 (Гц)
fk1 = input('fk1 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ1 (Гц)
fk2 = input('fk2 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц)
ft2 = input('ft2 = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП2 (Гц)
d11 = input('d11 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В
ПП1
d2 = input('d2 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В ПЗ
d12 = input('d12 = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ОТКЛОНЕНИЕ В
ПП2
disp('% Проверьте ПРАВИЛЬНОСТЬ ввода ИСХОДНЫХ ДАННЫХ')
disp('% При ПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 1')
disp('% При НЕПРАВИЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ введите 0 и
ПОВТОРИТЕ ввод')
DATA = input('--> ');
end
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ kaiserord')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода параметров функции kaiserord нажмите <ENTER>')
pause
m = [1 0 1]; % ВЕКТОР ЗНАЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ АЧХ
f = [ft1 fk1 fk2 ft2]; % ВЕКТОР ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ
ripple = [d11 d2 d12]; % ВЕКТОР МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ
ОТКЛОНЕНИЙ
[R,wc,beta,ftype] = kaiserord(f,m,ripple,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОКНА
КАЙЗЕРА
disp(['R = ' num2str(R)]) % ОЦЕНКА ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА
disp(['wc(1) = ' num2str(wc(1)) ' wc(2) = ' num2str(wc(2))']) % ВЕКТОР
НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ РАЗРЫВА

```

```

disp(['beta = ' num2str(beta)]) % ПАРАМЕТР ОКНА КАЙЗЕРА
disp(['ftype = ' char(ftype)]) % ТИП КИХ-ФИЛЬТРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА РФ')
ORDER = 0; % ПРИЗНАК ОПТИМАЛЬНОСТИ ПОРЯДКА КИХ-ФИЛЬТРА: 0
— НЕОПТИМАЛЬНЫЙ;
1 — ОПТИМАЛЬНЫЙ
while ORDER==0;
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза КИХ-фильтра РФ нажмите <ENTER>')
pause
b4 = fir1(R,wc,ftype,kaiser(R+1,beta),'noscale'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ
КИХ-ФИЛЬТРА РФ
disp('%')
disp('%')
disp(['Синтезирован КИХ-фильтр РФ порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ФАКТИЧЕСКИХ максимальных отклонений АЧХ')
disp('% в ПП1 (dp1), ПЗ (ds) и ПП2 (dp2) и ЗАДАННЫХ отклонений d11, d2 и d12')
disp('% нажмите <ENTER>')
pause
[dp1,ds,dp2] = check_stop(b4,ft1,fk1,fk2,ft2,Fs); % ВЫЧИСЛЕНИЕ
ФАКТИЧЕСКИХ
МАКСИМАЛЬНЫХ ПО МОДУЛЮ ОТКЛОНЕНИЙ В ПП1, ПЗ И ПП2
disp('%')
disp(['dp1=' num2str(dp1) ' ds = ' num2str(ds) ' dp2 = '
num2str(dp2)])
disp(['d11 = ' num2str(d11) ' d2 = ' num2str(d2) ' d12 = '
num2str(d12)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Сравните ФАКТИЧЕСКИЕ отклонения с ЗАДАННЫМИ')
disp('%')
disp('% Если ПОРЯДОК соответствует МИНИМАЛЬНОМУ, введите 1')
disp('% Если НЕ соответствует, введите 0 и затем ПОРЯДОК R')

```

```

ORDER = input('--> ');
if ORDER==0
R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
while rem(R,2)~=0
disp('% Порядок фильтра выбран НЕПРАВИЛЬНО')
R = input('R = '); % ПОРЯДОК КИХ-ФИЛЬТРА
end
end
end
disp('%')
disp([' Синтезирован РФ минимального порядка R = ' num2str(R)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КИХ-ФИЛЬТРА РФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ нажмите <ENTER>')
pause
figure('Name','Bandstop FIR Filter — Impulse Response, Magnitude,  
Phase','NumberTitle', 'off')
plot_fir(R,b4,Fs)% ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ИХ, АЧХ и ФЧХ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КИХ-ФИЛЬТРА РФ В ВИДЕ  
ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_bandstop = dfilt.dfssymfir(b4)% ОБЪЕКТ dfilt — КИХ-ФИЛЬТР РФ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ КИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗАВЕРШЕН')

```

11.4.5. Используемые внешние функции

В script-файлах `lr_11_low`, `lr_11_high`, `lr_11_pass` и `lr_11_stop` используются пять внешних функций.

Внешняя функция `check_low`, предназначенная для вычисления фактических максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра ФНЧ в ПП (`dp`) и ПЗ (`ds`):

```
function [dp,ds] = check_low(b,ft,fk,Fs)  
% Проверка выполнения требований к АЧХ ФНЧ  
%  
% b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра ФНЧ  
% ft, fk — граничные частоты (Гц) ПП и ПЗ  
% Fs — частота дискретизации (Гц)  
%  
% dp, ds — максимальные отклонения АЧХ в ПП и ПЗ  
%  
% fp, fs — векторы частот (Гц) для ПП и ПЗ (густая сетка)  
% H — частотная характеристика  
% a = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции  
%  
a = [1];  
fp = 0:ft/1000:ft;  
H = freqz(b,a,fp,Fs);  
dp = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);  
fs = fk:(Fs/2-fk)/1000:Fs/2;  
H = freqz(b,a,fs,Fs);  
ds = max(abs(H));
```

Внешняя функция `check_high`, предназначенная для вычисления фактических максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра ФВЧ в ПЗ (`ds`) и ПП (`dp`):

```
function [ds,dp] = check_high(b,fk,ft,Fs)  
% Проверка выполнения требований к АЧХ ФВЧ  
%  
% b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра ФВЧ  
% fk,ft — граничные частоты (Гц) ПЗ и ПП  
% Fs — частота дискретизации (Гц)  
%  
% ds,dp — максимальные отклонения АЧХ в ПЗ и ПП  
% fs,fp — векторы частот (Гц) для ПЗ и ПП (густая сетка)  
% H — частотная характеристика  
% a = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции  
%  
a = [1];  
fs = 0:fk/1000:fk;  
H = freqz(b,a,fs,Fs);
```

```
ds = max(abs(H));
```

```
fp = ft:(Fs/2-ft)/1000:Fs/2;
```

```
H = freqz(b,a,fp,Fs);
```

```
dp = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
```

Внешняя функция `check_pass`, предназначенная для вычисления фактических

максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра ПФ в ПЗ1

(**ds1**), ПП

(**dp**) и ПЗ2 (**ds2**):

```
function [ds1,dp,ds2] = check_pass(b,fk1,ft1,ft2,fk2,Fs)
```

```
% Проверка выполнения требований к АЧХ ПФ
```

```
%
```

```
% b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра ПФ
```

```
% fk1,ft1,ft2,fk2 — граничные частоты (Гц) ПЗ1,ПП и ПЗ2
```

```
% Fs — частота дискретизации (Гц)
```

```
%
```

```
% ds1,dp,ds2 — максимальные отклонения АЧХ в ПЗ1, ПП и ПЗ2
```

```
% fs1,fp,fs2 — векторы частот (Гц) для ПЗ1, ПП и ПЗ2 (густая сетка)
```

```
% H — частотная характеристика
```

```
% a=[1] — коэффициент знаменателя передаточной функции
```

```
%
```

```
a = [1];
```

```
fs1 = 0:fk1/1000:fk1;
```

```
H = freqz(b,a,fs1,Fs);
```

```
ds1 = max(abs(H));
```

```
fp = ft1:(ft2-ft1)/1000:ft2;
```

```
H = freqz(b,a,fp,Fs);
```

```
dp = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
```

```
fs2 = fk2:(Fs/2-fk2)/1000:Fs/2;
```

```
H = freqz(b,a,fs2,Fs);
```

```
ds2 = max(abs(H));
```

Внешняя функция `check_stop`, предназначенная для вычисления фактических

максимальных по модулю отклонений АЧХ КИХ-фильтра РФ в ПП1

(**dp1**), ПЗ

(**ds**) и ПП2 (**dp2**):

```
function [dp1,ds,dp2] = check_stop(b,ft1,fk1,fk2,ft2,Fs)
```

```
% Проверка выполнения требований к АЧХ РФ
```

```
%
```

```
% b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра РФ
```

```
% ft1,fk1,fk2,ft2 — граничные частоты ПП1, ПЗ и ПП2
```

```
% Fs — частота дискретизации (Гц)
```

```
%
```

```

% dp1,ds,dp2 — максимальные отклонения АЧХ в ПП и ПЗ
% fp1,fs,fp2 — векторы частот (Гц) для ПП1, ПЗ и ПП2 (густая сетка)
% Н — частотная характеристика
% a = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции
%
a = [1];
fp1 = 0:ft1/1000:ft1;
H = freqz(b,a,fp1,Fs);
dp1 = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
fs = fk1:(fk2-fk1)/1000:fk2;
H = freqz(b,a,fs,Fs);
ds = max(abs(H));
fp2 = ft2:(Fs/2-ft2)/1000:Fs/2;
H = freqz(b,a,fp2,Fs);
dp2 = max([max(abs(H))-1 1-min(abs(H))]);
Внешняя функция plot_fir, предназначенная для вывода графиков ИХ,

```

АЧХ и

ФЧХКИХ-фильтра:

```

function plot_fir(R,b,Fs)

```

```

% Вывод графиков ИХ, АЧХ и ФЧХ КИХ-фильтра

```

```

%

```

```

% R — порядок КИХ-фильтра

```

```

% b — вектор коэффициентов КИХ-фильтра (ИХ КИХ-фильтра)

```

```

% Fs — частота дискретизации (Гц)

```

```

%

```

```

% a = [1] — коэффициент знаменателя передаточной функции

```

```

% n — вектор дискретного нормированного времени

```

```

% f — сетка частот (Гц) для расчета АЧХ и ФЧХ

```

```

% Н — частотная характеристика

```

```

% MAG и PHASE — АЧХ и ФЧХ

```

```

%

```

```

a = [1];

```

```

n = 0:R;

```

```

subplot(3,1,1), stem(n,b,'fill','MarkerSize',3)

```

```

xlabel('n'), title('Impulse Response'), grid

```

```

f = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2;

```

```

H = freqz(b,a,f,Fs);

```

```

MAG = abs(H);

```

```

PHASE = angle(H);

```

```

subplot(3,1,2), plot(f,MAG)

```

```

xlabel('f (Hz)'), title('MAGNITUDE'), grid

```

```

subplot(3,1,3), plot(f,PHASE)

```

```

xlabel('f (Hz)'), title('PHASE'), grid

```

11.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании function-файлов для синтеза КИХ-фильтра ФНЧ методом окон с применением окна Кайзера, анализа его характеристик и моделирования процесса цифровой фильтрации.

Пункты самостоятельного задания включает в себя:

1С. Синтез КИХ-фильтра ФНЧ с произвольными требованиями к АЧХ (входные параметры function-файла).

Для проверки выполнения требований к АЧХ использовать function-файл `check_low` (см. разд. 11.4.5), который хранится на диске в папке `LAB_DSP\LAB_11`.

Вывести графики ИХ, АЧХ и ФЧХ с помощью function-файла `plot_fir` (см. разд. 11.4.5), который хранится на диске в папке `LAB_DSP\LAB_11`.

Выходным параметром function-файла является вектор коэффициентов КИХ-фильтра.

2С. Вычисление реакции КИХ-фильтра ФНЧ на воздействие в виде периодической последовательности с периодом $N=64$:

$$x(n) = A_1 \cos\left(\frac{2\pi f_1}{f_d} n\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi f_2}{f_d} n\right) = A_1 \cos(\hat{\omega}_1 n) + A_2 \cos(\hat{\omega}_2 n)$$

Входными параметрами function-файла являются:

- вектор коэффициентов КИХ-фильтра (см. п. 1С);
- частота дискретизации f_d (она должна совпадать с заданной в требованиях к АЧХ КИХ-фильтра);
- амплитуды гармоник A_1 и A_2 ;
- частоты гармоник f_1 и f_2 .

Вводимые значения частот должны быть согласованы с граничными частотами в требованиях к АЧХ КИХ-фильтра. Частота f_1 должна быть расположена в ПП, а частота f_2 — в ПЗ. При этом отсутствие растекания спектра (см. п. 3С) гарантируется в том случае, если для частот f_1 и f_2 отношение (10.1) будет целым числом.

Реакцию КИХ-фильтра $y(n)$ вычислить с помощью функции `filter`.

Вывести графики воздействия и реакции КИХ-фильтра.

Выходными параметрами function-файла являются векторы отсчетов воздействия и реакции.

3С. Вычисление амплитудных спектров воздействия и реакции КИХ-фильтра ФНЧ.

Входными параметрами function-файла являются векторы отсчетов воздействия и реакции КИХ-фильтра.

Для вычисления амплитудных спектров воздействия и реакции использовать функцию `fft`.

Вывести графики амплитудных спектров.

11.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения пунктов задания, включая заполненную табл. 11.7, созданные графики (копируются по команде **Edit | Copy Figure** в окне **Figure**), описания структур КИХ-фильтров в виде объектов `dfilt`, копируемые из окна **Command Window** (шрифт Courier New), и ответы на поставленные вопросы (шрифт Times New Roman).

Защита лабораторной работы проводится на основании представленного отчета и контрольных вопросов из следующего списка:

1. Дайте определение цифрового фильтра.
2. Перечислите основные этапы проектирования цифрового фильтра.
3. Запишите передаточную функцию КИХ-фильтра.
4. Дайте определение длины и порядка КИХ-фильтра.
5. Назовите основные особенности КИХ-фильтров.
6. При каком условии КИХ-фильтр будет иметь строго линейную ФЧХ?
7. В каких точках ФЧХ фильтра имеет скачок на π ?
8. Назовите признаки, по которым различают четыре типа КИХ-фильтров с ЛФЧХ.
9. Какие типы КИХ-фильтров с ЛФЧХ могут использоваться для синтеза фильтра методом окон?
10. Что входит в требования к АЧХ КИХ-фильтра?
11. Назовите основные свойства АЧХ и ФЧХ.
12. Что отображает структура ЦФ и чем определяется ее вид?
13. Назовите основные структуры КИХ-фильтров.
14. Перечислите основные этапы итерационной процедуры синтеза КИХ-фильтров методом окон.
15. Дайте определения окна и частоты разрыва.
16. Какой вид имеет АЧХ при синтезе КИХ-фильтров методом окон?
17. Назовите основное преимущество и недостаток метода око

Использованные источники:

1. Цифровая обработка сигналов и MATLAB: учеб. пособие / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 512 с.
2. Воробьев С.Н. Цифровая обработка сигналов : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С.Н. Воробьев. - М. : Академия, 2013. - 320 с.
3. Голубинский А.Н. Теория цифровой обработки сигналов : учеб, пособие / А.Н. Голубинский, С.В. Ролдугин, И.В. Лазарев. - Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2009. - 132 с.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 5 по дисциплине «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения

Составитель:
д. ф.-м.н. Кузьменко Р.В.

Компьютерный набор Р.В. Кузьменко

Подписано к изданию _____
Уч-изд. л. _____

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14