

**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 № 6 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 № 6 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. – 40 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 № 6.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 №6

Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования

Цель работы: изучить процедуру синтеза БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования и овладеть программными средствами MATLAB для синтеза и анализа БИХ-фильтров; познакомиться с GUI FVTool (Filter Visualization Tool — средство визуализации фильтра).

13.1. Краткая теоретическая справка

БИХ-фильтр описывается передаточной функцией общего вида (8.4):

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}} \quad (13.1)$$

и при $(N-1) \leq (M-1)$ (по умолчанию) имеет порядок R , равный $R = (M-1)$.

БИХ-фильтры характеризуются следующими особенностями:

☼ нелинейной ФЧХ;

☼ необходимостью проверки на устойчивость.

Оптимальным называют БИХ-фильтр минимального порядка R при заданных требованиях к АЧХ.

13.1.1. Задание требований к характеристике затухания

Для БИХ-фильтров требования задаются к характеристике *затухания* АЧХ (дБ) (11.6) в основной полосе частот $[0; f_d/2]$ и включают в себя:

частоту дискретизации f_d (Гц);

граничные частоты полос пропускания (ПП) и полос задерживания (ПЗ), такие же, как для КИХ-фильтров (см. разд. 11.1.2):

- 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;

☼ допустимые отклонения от $\hat{A}(f)$ (дБ) (11.6) (см. разд. 11.1.2):

- $a_{\max}$ (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).

13.1.2. Структуры БИХ-фильтров

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

В MATLAB структура БИХ-фильтра описывается в виде объекта dfilt:

Hd = dfilt.structure(input1,input2)

где Hd — имя объекта dfilt; dfilt — тип объекта; structure — функция, задающая конкретную структуру объекта Hd (табл. 13.1); input1, input2 — параметры функции structure.

Для БИХ-фильтров свойства объекта dfilt с именем Hd зависят от выбранной структуры. Для прямой структуры БИХ-фильтра они включают в себя:

- ⌘ FilterStructure — структура КИХ-фильтра;
- ⌘ Arithmetic — форма представления данных;
- ⌘ Numerator — коэффициенты числителя передаточной функции (12.1);
- ⌘ Denominator — коэффициенты знаменателя передаточной функции (12.1);

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

Каскадной структуре из биквадратных звеньев соответствует представление передаточной функции в виде произведения (8.9):

$$H(z) = G \prod_{k=1}^L \frac{1 + b_{1k}z^{-1} + b_{2k}z^{-2}}{1 + a_{1k}z^{-1} + a_{2k}z^{-2}} \quad (13.2)$$

где звенья имеют одну из прямых структур, представленных на рис. 8.1.

В каскадной структуре БИХ-фильтра свойства Numerator и Denominator заменяются свойствами:

⌘ sosMatrix — матрица коэффициентов в виде (8.12):

$$\begin{bmatrix} 1 & b_{11} & b_{21} & 1 & a_{11} & a_{21} \\ 1 & b_{11} & b_{21} & 1 & a_{11} & a_{21} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & b_{1L} & b_{2L} & 1 & a_{1L} & a_{2L} \end{bmatrix} \quad (13.3)$$

⌘ ScaleValues — вектор коэффициентов усиления, элементы которого равны:

- первый — коэффициенту усиления на входе первого звена, т. е. на входеструктуры;
- второй — коэффициенту усиления на входе второго звена и т. д.;
- последний — коэффициенту усиления на выходе последнего звена, т. е. на выходе структуры.

Таблица 13.1. Функции structure и структуры БИХ-фильтров

Функция structure	Параметры функцииstructure	Структура БИХ-фильтра
df1	b, a — векторы коэффициентов передаточной	Direct-Form I (прямая)
df1t		Direct-Form I Transposed (прямаятранспонированная)

df2	функции (13.1)	Direct-Form II (прямая каноническая)
df2t		Direct-Form II Transposed (прямая каноническая транспонированная)
df1sos	s — матрица коэффициентов в виде (13.3); G — коэффициент усиления передаточной функции (13.2)	Direct-Form I, Second-order sections (SOS) (каскадная из звеньев 2-го порядка с прямой структурой)
df1tsos		Direct-Form I Transposed, Second-order sections (SOS) (каскадная из звеньев 2-го порядка с прямой транспонированной структурой)
df2sos		Direct-form II, Second-order sections (SOS) (каскадная из звеньев 2-го порядка с прямой канонической структурой)

13.1.3. Процедура синтеза БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования

Синтез БИХ-фильтра заключается в расчете его передаточной функции.

Метод билинейного Z-преобразования, позволяющий синтезировать оптимальный БИХ-фильтр, основан на использовании аналогового фильтра-прототипа (АФП)¹.

Процедура синтеза БИХ-фильтра на основе АФП включает в себя следующие шаги:

1. Задание требований к характеристике затухания АЧХ (дБ) (11.6) БИХ-фильтра.

2. Формирование требований к АЧХ (дБ) АФП.

Граничные частоты АФП Ω связаны с граничными частотами БИХ-фильтра ω нелинейной зависимостью:

$$\Omega = \frac{2}{T} \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2}$$

которая в шкале частот в герцах соответствует зависимости между частотами АФП F и БИХ-фильтра f :

$$F = \frac{f_d}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi f}{f_d} \quad (13.4)$$

3. Выбор типа БИХ-фильтра.

Подобно АФП, четырем видам аппроксимирующих функций соответствуют четыре типа БИХ-фильтров:

¹ С теоретическими основами метода билинейного Z-преобразования можно познакомиться в [2, 3].

☼ Баттерворта (Butterworth) — с АЧХ, максимально плоской в ПП и монотонной в ПЗ;

☼ Чебышева I рода (Chebyshev Type I) — с АЧХ, равноволновой в ПП и монотонной в ПЗ;

☼ Чебышева II рода (Chebyshev Type II) — с АЧХ, максимально плоской в ПП и равноволновой в ПЗ;

☼ Золотарева—Кауэра (Elliptic — эллиптический) — с АЧХ, равноволновой в ПП и ПЗ.

4. Расчет передаточной функции АФП $H_a(p)$.

5. Преобразование передаточной функции АФП $H_a(p)$ в передаточную функцию БИХ-фильтра $H(z)$ на основе формулы билинейного Z-преобразования:

$$p = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

6. Выбор структуры БИХ-фильтра.

13.1.4. Синтез аналоговых фильтров в MATLAB

Синтез частотно-избирательных аналоговых фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра выполняется соответственно с помощью функций:

`[bs,as] = butter(Ra,Wn,ftype,'s')`

`[bs,as] = cheby1(Ra,rp,Wn,ftype,'s')`

`[bs,as] = cheby2(Ra,rs,Wn,ftype,'s')`

`[bs,as] = ellip(Ra,rp,rs,Wn,ftype,'s')`

где R_a — порядок аналогового фильтра; W_n — вектор частот среза $\omega = 2\pi f$ (рад/с), содержащий один элемент — для ФНЧ и ФВЧ и два — для ПФ и РФ; частоты среза называются частоты, на которых нормированная АЧХ $\hat{A}(f)$ равна $1/\sqrt{2} \approx 0,707$, а затухание $\hat{A}(f)$ (дБ) — 3 дБ; r_p, r_s — максимально и минимально

допустимые затухания $a_{\max}$ (дБ) в ПП и $a_{\min}$ (дБ) в ПЗ для характеристики затухания АЧХ (дБ) (11.6).

Для аналогового ПФ, синтезируемого с помощью данных функций, минимально допустимые отклонения в ПП1 и ПП2 задаются одинаковыми. Аналогично, для РФ максимально допустимые отклонения в ПП1 и ПП2 задаются одинаковыми. `ftype` — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

☼ 'high' — для ФВЧ;

☼ 'stop' — для РФ;

☼ по умолчанию (если параметр отсутствует) — для ФНЧ или ПФ.

's' — признак аналогового фильтра; при его отсутствии по умолчанию подразумевается ЦФ; `bs, as` — векторы коэффициентов числителя и

знаменателя передаточной функции аналогового фильтра $H_a(p)$ в порядке возрастания степеней p ; $as(1) = 1$.

Порядок аналогового фильтра (Ra) и частоты среза (Wn) определяются по требованиям к АЧХ (дБ) (11.6) с помощью следующих функций, соответственно для АФП Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра:

$[Ra, Wn] = \text{buttord}(Wp, Ws, rp, rs, 's')$

$[Ra, Wn] = \text{cheb1ord}(Wp, Ws, rp, rs, 's')$

$[Ra, Wn] = \text{cheb2ord}(Wp, Ws, rp, rs, 's')$

$[Ra, Wn] = \text{ellipord}(Wp, Ws, rp, rs, 's')$

где Wp, Ws —

векторы граничных частот ПП и ПЗ в порядке следования слева направо в шкале частот $\omega = \pi f$ (рад/с).

13.1.5. Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования в MATLAB

Для синтеза БИХ-фильтра методом билинейного Z-преобразования используются те же функции, что и для синтеза аналоговых фильтров, но без параметра 's':

$[b, a] = \text{butter}(R, Wn, ftype)$

$[b, a] = \text{cheby1}(R, rp, Wn, ftype)$

$[b, a] = \text{cheby2}(R, rs, Wn, ftype)$

$[b, a] = \text{ellip}(R, rp, rs, Wn, ftype)$

где R — порядок БИХ-фильтра; Wn — вектор нормированных частот среза (см. разд. 13.1.4) в шкале нормированных частот $\hat{f} = \frac{f}{f_d/2}$:

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

$$\hat{f}_0 = \frac{f_0}{f_d/2}$$

где f_0 — абсолютная частота среза (Гц);

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

$$\hat{f}_{01} = \frac{f_{01}}{f_d/2}$$

$$\hat{f}_{02} = \frac{f_{02}}{f_d/2}$$

где f_{01}, f_{02} — абсолютные частоты среза (Гц). rp, rs — максимально и минимально допустимые затухания $a_{\max}$ (дБ) в ПП и

$a_{\min}$ (дБ) в ПЗ для характеристики затухания АЧХ (дБ) (11.6).

Для ПФ, синтезируемого с помощью данных функций, минимально допустимые отклонения в ПЗ1 и ПЗ2 задаются одинаковыми. Аналогично, для РФ максимально допустимые отклонения в ПП1 и ПП2 задаются одинаковыми. Однако при синтезе БИХ-фильтра в виде объекта `dfilt` на основе объекта `fdesign`

(см. разд. 12.1.3) данные ограничения снимаются. *ftype* — параметр, указывающий тип избирательности и принимающий значения:

☞ 'high' — для ФВЧ;

☞ 'stop' — для РФ;

☞ по умолчанию (если параметр отсутствует) — для ФНЧ и ПФ.

b, *a* — векторы коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции БИХ-фильтра $H(z)$ (13.1) в порядке возрастания отрицательных степеней *z*;

$a(1) = 1$.

Порядок (*R*) и частоты среза (*WDn*) БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра определяются по требованиям к АЧХ (дБ) (11.6) с помощью тех же функций, что и для аналогового фильтра (см. разд. 13.1.4), но без параметра 's':

[R,WDn] = buttord(WDp,WDs,rp,rs)

[R,WDn] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs)

[R,WDn] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs)

[R,WDn] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs)

где *WDp*, *WDs* — соответственно векторы граничных нормированных частот ПП и ПЗ в порядке их следования слева направо в шкале нормированных частот $\hat{f} = \frac{f}{f_d/2}$

При синтезе БИХ-фильтров сохраняется свойство оптимальности АФП — ЦФ будет также оптимальным.

13.1.6. Синтез БИХ-фильтров в виде объектов *dfilt* на основе объектов *fdesign*

При задании требований к характеристике затухания АЧХ (дБ) (11.6) в виде объекта *fdesign* (см. разд. 12.1.3) для синтеза БИХ-фильтра *методом билинейного Z-преобразования* используются функции, представленные в табл. 13.2. В этом случае для ПФ и РФ соответственно минимально допустимые затухания в ПЗ1 и ПЗ2 и максимально допустимые затухания в ПП1 и ПП2 могут задаваться неодинаковыми.

Таблица 13.2. Функции синтеза БИХ-фильтра в виде объекта *dfilt*

Функция	Тип БИХ-фильтра
butter	Фильтр Баттерворта (Butterworth filter)
cheby1	Фильтр Чебышева I рода (ChebyshevTypeI filter)
cheby2	Фильтр Чебышева II рода (Chebyshev Type II filter)
ellip	Фильтр Золотарева—Кауэра (Elliptic filter — эллиптический)

Обобщенный формат функции синтеза БИХ-фильтра в виде объекта *dfilt* на основе объекта *fdesign* представлен двумя разновидностями:

Hf = _function_iir(Hs,'MatchExactly',MATCH,'FilterStructure','structure')

Hf=_design(Hs,'function_iir','MatchExactly',MATCH,'FilterStructure','structure')

где `function_iir` — имя конкретной функции из табл. 13.2; `Hs` — имя объекта `fdesign`; `'MatchExactly'` — параметр (флаг), установка которого (присутствие в составе параметров) означает, что требования к АЧХ (дБ) должны выполняться точно; `MATCH` — параметр, уточняющий, в какой из полос требования должны выполняться точно, и принимающий значения:

☞ `'stopband'` (по умолчанию) — в полосах задерживания;

☞ `'passband'` — в полосах пропускания;

☞ `'both'` — в полосах задерживания и пропускания (только для функции `ellip`).

`'FilterStructure'` — параметр (флаг), установка которого (присутствие в составе параметров) означает, что для БИХ-фильтра будет указана структура;

`'structure'` — функция, задающая конкретную структуру объекта `Hf`

(см. табл. 13.1); `Hf` — имя объекта `dfilt`.

Для расчета ЧХ и ИХ БИХ-фильтра в виде объекта `dfilt` используются функции `freqz` и `impz` (см. разд. 12.1.4).

13.1.7. Расстановка звеньев и масштабирование в каскадных структурах БИХ-фильтров

Перед моделированием каскадной структуры БИХ-фильтра с фиксированной точкой (ФТ), о чем пойдет речь в гл. 15, необходимо предусмотреть выполнение двух операций [1]:

☞ формирование и расстановка звеньев.

Звенья в (13.2) формируются посредством объединения полюсов с ближайшими нулями, после чего они расставляются в порядке возрастания радиусов полюсов. Это позволяет минимизировать собственные шумы, обусловленные умножителями. При описании каскадной структуры БИХ-фильтров в виде объекта `dfilt` формирование и расстановка звеньев осуществляются автоматически;

☞ масштабирование.

Для минимизации переполнений на выходах сумматоров на входах звеньев добавляются масштабирующие множители, которые учитываются в числителях передаточных функций звеньев.

В MATLAB эта операция реализуется с помощью функции:

`scale(Hf,norm)`

где `Hf` — имя объекта `dfilt` с каскадной структурой из звеньев 2-го порядка; `norm` — вводимое в апострофах имя нормы, на основе которой рассчитываются масштабирующие множители: `'L1'` — для нормы $\|x\|_1$ (2.4), `'Linf'` — для нормы $\|x\|_\infty$ (2.6) и `'L2'` — для нормы $\|x\|_2$ (2.8), которое выбирается по умолчанию в отсутствии параметра `norm`.

13.2. Содержание лабораторной работы

Содержание работы связано с синтезом БИХ-фильтров методом билинейного

Z-преобразования, описанием их структур и анализом характеристик с использованием программных средств MATLAB.

13.3. Задание на лабораторную работу

Лабораторная работа выполняется на основе script-файлов lr_13_low, lr_13_high,

lr_13_pass и lr_13_stop и function-файла plot_iir, которые хранятся на прилагае-

мом компакт-диске в папке LAB_DSP\LAB_13.

Перед выполнением работы необходимо сохранить путь к папке LAB_13 по команде

контекстного меню **Add to Path | Selected Folders**.

Исходные данные для пунктов задания приводятся в табл. 13.3—13.6 для номера

бригады $N_{бр}$, где $N_{бр} = 1, 2, \dots, 30$, и включают в себя требования к характеристике

затухания АЧХ (дБ) (11.6) БИХ-фильтров ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ. Значения допус-

тимых затуханий рассчитаны по формулам (11.7)—(11.8).

На прилагаемом компакт-диске в папке Tables\Tables_13 хранятся табл. 13.3—13.6

исходных данных, примеры их заполнения для бр

$N = 1$ и табл. 13.7 для п. 4 задания.

Таблица 13.3. Требования к АЧХ (дБ) ФНЧ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 5000 + 100 N_{бр}$	$F_s =$
f_x	Граничная частота ПП	$f_x = \frac{f_d}{10} + 20 N_{бр}$	$f_t =$
f_k	Граничная частота ПЗ	$f_k = \frac{f_d}{10} + 250 + 25 N_{бр}$	$f_k =$
a_{max}	Максимально допустимое затухание в ПП (дБ)	$a_{maz} = 0,4455$	$g_p = 0.4455$

a min	Минимально допустимое затухание в ПЗ (дБ)	$a_{\min} = 40$	$rs = 40$
--------------	---	-----------------	-----------

Таблица 13.4. Требования к АЧХ (дБ) ФВЧ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 5000 \cdot 100 + N_{бр}$	$F_s =$
f_k	Граничная частота ПЗ	$f_k = \frac{f_d}{10} + 20N_{бр}$	$f_k =$
f_{χ}	Граничная частота ПП	$f_k = \frac{f_d}{10} + 250 + 25N_{бр}$	$f_t =$
a_{min}	Минимально допустимое затухание в ПЗ (дБ)	$a_{\min} = 40$	$rs = 40$
a_{max}	Максимально допустимое затухание в ПП (дБ)	$a_{\max} = 0,4455$	$rp = 0.4455$

Таблица 13.5. Требования к АЧХ (дБ) ПФ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 5000 + 100 N_{бр}$	$F_s =$
f_{-k}	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_d}{20} + 20N_{бр}$	$f_{k1} =$
$f_{-\chi}$	Граничная частота ПП1	$f_{-x} = \frac{f_d}{20} + 250 + 25N_{бр}$	$f_{t1} =$
f_{χ}	Граничная частота ПП2	$f_x = \frac{f_d}{4} + 25N_{бр}$	$f_{t2} =$

f_k	Граничная частота ПЗ2	$f_k = \frac{f_d}{4} + 250 + 30N_{бр}$	fk2 =
a_{max}	Максимально допустимое затухание в ПП (дБ)	$a_{max} = 0,4455$	rp = 0.4455
a_{min}	Минимально допустимое затухание в ПЗ1 и ПЗ2 (дБ)	$a_{min} = 40$	rs = 40

Таблица 13.6. Требования к АЧХ (дБ) РФ

Условные обозначения	Список требований	Задаваемые значения	Идентификатор
f_d	Частота дискретизации	$f_d = 5000 + 100 N_{бр}$	Fs =
f_{-x}	Граничная частота ПП1	$f_{-x} = \frac{f_d}{20} + 20N_{бр}$	ft1 =
f_{-k}	Граничная частота ПЗ1	$f_{-k} = \frac{f_d}{20} + 250 + 25N_{бр}$	fk1 =
f_k	Граничная частота ПЗ2	$f_k = \frac{f_d}{4} + 25N_{бр}$	fk2 =
f_x	Граничная частота ПП2	$f_x = \frac{f_d}{4} + 250 + 30N_{бр}$	ft2 =
a_{max}	Максимально допустимое затухание в ПП1 и ПП2 (дБ)	$a_{max} = 0,4455$	rp = 0.4455
a_{min}	Минимально допустимое затухание в ПЗ (дБ)	$a_{min} = 40$	rs = 40

Задание на лабораторную работу заключается в синтезе БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования и анализе их характеристик и для каждого типа избирательности (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ) включает в себя выполнение следующих пунктов:

1. Ввод требований к характеристике затухания БИХ-фильтра.
2. Синтез БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра, выполняемый в два этапа:

- вычисление порядков и частот среза БИХ-фильтров;
- синтез БИХ-фильтров.

Выведенные значения порядков БИХ-фильтров записать в табл. 13.7.

Пояснить:

- какая функция используется для вычисления порядка и частот среза;
- какие функции используются для синтеза БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра;
- какие из параметров данных функции соответствуют коэффициентам передаточной функции БИХ-фильтра;
- какой из БИХ-фильтров имеет минимальный порядок.

Таблица 13.7. Результаты синтеза БИХ-фильтров и АФП

Тип избирательности фильтра	Тип и порядок БИХ-фильтра			
	Баттерворта	Чебышева I рода	Чебышева II рода	Золотарева— Кауэра
	R1	R2	R3	R4
ФНЧ				
ФВЧ				
ПФ				
РФ				

3. Анализ характеристик БИХ-фильтров Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра.

Для вывода графиков АЧХ, ФЧХ, ИХ (50 отсчетов) и карты нулей и полюсов БИХ-фильтров использовать function-файл plot_iir (см. разд. 13.4.5).

Пояснить:

☼ вид ИХ;

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

4. Синтез АФП Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра, выполняемый в три этапа:

- формирование требований к характеристике затухания АФП с выводом граничных частот ПП и ПЗ;
- вычисление порядка и частот среза АФП;
- синтез АФП.

Пояснить:

- соответствие между граничными частотами АФП и БИХ-фильтра;
- соответствие между порядками АФП и БИХ-фильтров.

5. Вывод графиков АЧХ АФП Баттерворта, Чебышева I и II рода и Золотарева—Кауэра.

Вывести графики АЧХ АФП в основной полосе частот $[0; f_d/2]$, вычисленные с помощью функции `freqs`.

Сделать вывод по результатам сравнения АЧХ АФП и БИХ-фильтров.

6. Описание требований к АЧХ БИХ-фильтра в виде объекта `fdesign`.

Описать требования к характеристике затухания в виде объектов `fdesign` с именами:

- `MAG_lowpass` — ФНЧ;
- `MAG_highpass` — ФВЧ;
- `MAG_bandpass` — ПФ;
- `MAG_bandstop` — РФ.

Пояснить, что в себя включает список свойства объекта `fdesign` и с какой целью он создается.

7. Синтез БИХ-фильтра Золотарева—Кауэра в виде объекта `dfilt` на основе объекта `fdesign`.

Синтезировать БИХ-фильтры с прямой канонической структурой звеньев (см. табл. 13.1) в виде объектов `dfilt` со следующими именами:

- `F_lowpass` — ФНЧ;
- `F_highpass` — ФВЧ;
- `F_bandpass` — ПФ;
- `F_bandstop` — РФ.

Пояснить:

☼какая функция используется для синтеза БИХ-фильтров Золотарева—Кауэра;

☼что в себя включает список свойств объекта `dfilt`;

☼совпадает ли порядок синтезированного БИХ-фильтра с порядком в табл. 13.7.

8. Масштабирование в каскадной структуре БИХ-фильтра Золотарева—Кауэра.

Выполнить масштабирование на основе нормы 'Linf' (по умолчанию) для объектов `F_lowpass` и `F_bandpass` и на основе нормы 'L2' для объектов `F_highpass` и `F_bandstop`.

Сохранить новые объекты `dfilt` с именами:

- `F_lowpass_scale` — ФНЧ;
- `F_highpass_scale` — ФВЧ;

- F_bandpass_scale — ПФ;
- F_bandstop_scale — РФ.

Пояснить, какие свойства объекта dfilt изменились после масштабирования.

9. Знакомство с GUI FVTool.

Обратиться к GUI FVTool по команде: fvtool(Hd)

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

13.4. Типовой script-файл для выполнения лабораторной работы

Перед выполнением работы должны быть представлены табл. 13.3—13.6 исходных данных для своего номера бригады N_{бр}.

Для четырех типов избирательности БИХ-фильтра — ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ — предусмотрены четыре script-файла. Для запуска script-файла к нему необходимо обратиться по имени:

```
>>lr_13_low— ФНЧ
>>lr_13_high— ФВЧ
> lr_13_pass — ПФ
>> lr_13_stop — РФ
```

Листинги данных script-файлов представлены в разд. 13.4.1—13.4.4.

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

цию клавиш <Ctrl>+<Break>.

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

13.4.1. Синтез и анализ БИХ-фильтра ФНЧ

Листинг script-файла lr_13_low имеет вид:

```
>> type lr_13_low
Script

clc
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) ФНЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕР БРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
ft = input('ft = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП (Гц)
```

```

fk = input('fk = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц)
rp = input('rp = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП
rs = input('rs = '); % МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ 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. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И  
II РОДА  
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза БИХ-фильтров ФНЧ нажмите <ENTER>')
pause
WDp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ГРАНИЧНЫЕ НОРМИРОВАННЫЕ  
ЧАСТОТЫ ПП и ПЗ
[R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-  
ФИЛЬТРА ФНЧ  
БАТТЕРВОРТА
[R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА  
БИХ-ФИЛЬТРА  
ЧЕБЫШЕВА I РОДА
[R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА  
БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ  
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[R4,WDn4] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-  
ФИЛЬТРА ФНЧ  
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
[b1,a1] = butter(R1,WDn1); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ  
БАТТЕРВОРТА
[b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ  
ЧЕБЫШЕВА  
I РОДА
[b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ  
ЧЕБЫШЕВА

```

II РОДА

[b4,a4] = ellip(R4,rp,rs,WDn4); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров ФНЧ нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp([' R1 = ' num2str(R1),' R2 = ' num2str(R2),' R3 = ' num2str(R3),'
R4 = ' num2str(R4)])

disp('%')

disp('%')

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp('% **п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФНЧ**')

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФНЧ (ЧЕТЫРЕ
ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА)

нажмите<ENTER>')

pause

figure('Name','Lowpass IIR Filter Butterworth','NumberTitle','off')

plot_iir(b1,a1,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ
БАТТЕРВОРТА

figure('Name','Lowpass IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle','off')

plot_iir(b2,a2,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЧЕБЫШЕВА I
РОДА

figure('Name','Lowpass IIR Filter Chebyshov II','NumberTitle','off')

plot_iir(b3,a3,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЧЕБЫШЕВА II
РОДА

figure('Name','Lowpass IIR Filter Elliptic','NumberTitle','off')

plot_iir(b4,a4,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

disp('%')

disp('%')

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

```

disp('% п.4. СИНТЕЗ АФФ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И II РОДА И
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода граничных частот АФФ ФНЧ ПП (Ft) и ПЗ (Fk) нажмите
<ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); %
ГРАНИЧНЫЕ ЧАСТОТЫ ПП
и ПЗ АФФ
disp([' Ft = ' num2str(Ft), ' Fk = ' num2str(Fk)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза АФФ ФНЧ нажмите <ENTER>')
pause
Wp = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk; % ГРАНИЧНЫЕ КРУГОВЫЕ ЧАСТОТЫ ПП и
ПЗ АФФ
[Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФФ
ФНЧ
БАТТЕРВОРТА
[Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФФ
ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА I РОДА
[Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФФ
ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФФ
ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
[bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'s'); % КОЭФИЦИЕНТЫ АФФ ФНЧ
БАТТЕРВОРТА
[bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'s'); % КОЭФИЦИЕНТЫ АФФ ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА I РОДА
[bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'s'); % КОЭФИЦИЕНТЫ АФФ ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'s'); % КОЭФИЦИЕНТЫ АФФ ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода порядков АФФ ФНЧ нажмите <ENTER>')
pause

```

```

disp('%')
disp('%')
disp([' Ra1 = ' num2str(Ra1),' Ra2 = ' num2str(Ra2),' Ra3 = '
num2str(Ra3),' Ra4 = ' num2str(Ra4)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И
II РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>')
pause
f = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; % СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ
W = 2.*pi.*f;
Ha1 = freqs(bs1,as1,W); MAG1 = abs(Ha1); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧ
БАТТЕРВОРТА
Ha2 = freqs(bs2,as2,W); MAG2 = abs(Ha2); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА I РОДА
Ha3 = freqs(bs3,as3,W); MAG3 = abs(Ha3); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
Ha4 = freqs(bs4,as4,W); MAG4 = abs(Ha4); % ЧХ и АЧХ АФП ФНЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
figure('Name','Lowpass Analog Filter — Magnitude','NumberTitle', 'off')
subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,4),plot(f, abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')

```

```

disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ  

ОБЪЕКТА fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG_lowpass = fdesign.lowpass('Fp,Fst,Ap,Ast',ft,fk,rp,rs,[Fs]) % ОБЪЕКТ  

fdesign ДЛЯ ФНЧ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В  

ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_lowpass = design(MAG_lowpass,'ellip','MatchExactly',  

'both','FilterStructure','df2sos') % ФНЧ В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-  

ФИЛЬТРА ФНЧ  

ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования  

нажмите  

<ENTER>')
pause
F_lowpass_scale = scale(F_lowpass) % РЕЗУЛЬТАТ МАСШТАБИРОВАНИЯ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФНЧ ЗАВЕРШЕН')

```

13.4.2. Синтез и анализ БИХ-фильтра ФВЧ

Листинг script-файла lr_13_high имеет вид:

```
>> type lr_13_high
```

```
script
clc
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ МЕТОДОМ  
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) ФВЧ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
Fs = input('Fs = '); % ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ (Гц)
fk = input('fk = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ (Гц)
ft = input('ft = '); % ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП (Гц)
rs = input('rs = '); % МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПЗ
rp = input('rp = '); % МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ 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. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И  
II РОДА  
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза БИХ-фильтров ФВЧ нажмите <ENTER>')
pause
Wdp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ГРАНИЧНЫЕ НОРМИРОВАННЫЕ  
ЧАСТОТЫ ПП и ПЗ
```

[R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ

БАТТЕРВОРТА

[R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ

ЧЕБЫШЕВА I РОДА

[R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ

ЧЕБЫШЕВА II РОДА

[R4,WDn4] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ

ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

[b1,a1] = butter(R1,WDn1,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ БАТТЕРВОРТА

[b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА

I РОДА

[b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА

II РОДА

[b4,a4] = cheby2(R4,rs,WDn4,'high'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА

И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров ФВЧ нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp([' R1 = ' num2str(R1),' R2 = ' num2str(R2),' R3 = ' num2str(R3),'

R4 = ' num2str(R4)])

disp('%')

disp('%')

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp('% **п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФВЧ**')

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ФВЧ (ЧЕТЫРЕ ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА)

нажмите<ENTER>')

```

pause
figure('Name','Highpass IIR Filter Butterworth','NumberTitle','off')
plot_iir(b1,a1,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ
БАТТЕРВОРТА
figure('Name','Highpass IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle','off')
plot_iir(b2,a2,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА I
РОДА
figure('Name','HighpassIIR Filter Chebyshov II','NumberTitle','off')
plot_iir(b3,a3,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЧЕБЫШЕВА II
РОДА
figure('Name','Highpass IIR Filter Elliptic','NumberTitle','off')
plot_iir(b4,a4,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. СИНТЕЗ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И II РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА)
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода граничных частот АФП ФВЧ ПЗ (Fk) и ПП (Ft) нажмите
<ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); %
ГРАНИЧНЫЕ ЧАСТОТЫ ПП
и ПЗ АФП
disp([' Fk = ' num2str(Fk), ' Ft = ' num2str(Ft)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза АФП ФВЧ нажмите <ENTER>')
pause
Wp = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk; % ГРАНИЧНЫЕ КРУГОВЫЕ ЧАСТОТЫ ПП и
ПЗ АФП
[Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП
ФВЧ
БАТТЕРВОРТА
[Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП
ФВЧ

```

ЧЕБЫШЕВА I РОДА

[Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП ФВЧ

ЧЕБЫШЕВА II РОДА

[Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТА СРЕЗА АФП ФВЧ

ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

[bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧ БАТТЕРВОРТА

[bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧ ЧЕБЫШЕВА

I РОДА

[bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧ ЧЕБЫШЕВА

II РОДА

[bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'high','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ФВЧ ЧЕБЫШЕВА

И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода порядков АФП ФВЧ нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp([' Ra1 = ' num2str(Ra1),' Ra2 = ' num2str(Ra2),' Ra3 = ' num2str(Ra3),' Ra4 = ' num2str(Ra4)])

disp('%')

disp('%')

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp('% **п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И II РОДА**

И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>')

pause

f = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; % СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ

W = 2.*pi.*f;

Ha1 = freqs(bs1,as1,W); % ЧХ АФП БАТТЕРВОРТА

Ha2 = freqs(bs2,as2,W); % ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА I РОДА

```

Ha3 = freqs(bs3,as3,W); % ЧХАФПЧЕБЫШЕВА II РОДА
Ha4 = freqs(bs4,as4,W); % ЧХАФПЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
figure('Name','Highpass Analog Filter — Magnitude', 'NumberTitle', 'off')
subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,4),plot(f,abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ  

ОБЪЕКТА fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG_highpass= fdesign.highpass('Fst,Fp,Ast,Ap',fk,ft,rs,rp,[Fs]) % ОБЪЕКТ
fdesign ДЛЯ ФВЧ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В  

ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_highpass = design(MAG_highpass,'ellip','MatchExactly',
'both','FilterStructure','df2sos') % ФВЧ В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause

```

```

disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-
ФИЛЬТРА ФВЧ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования
нажмите
<ENTER>')
pause
F_highpass_scale = scale(F_highpass,'L2') %
РЕЗУЛЬТАТМАСШТАБИРОВАНИЯ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ФВЧ ЗАВЕРШЕН')

```

13.4.3. Синтез и анализ БИХ-фильтра ПФ

Листинг script-файла lr_13_pass имеет вид:

```

>> type lr_13_pass
script
clc
clear
disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')
disp('%')
disp('%')
disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) ПФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')
DATA=0;
while DATA==0;
Nb = input('Nb = '); % НОМЕРБРИГАДЫ
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 ПЗ2 (Гц)
fk2 = input('fk2 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 (Гц)
rp = input('rp = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП
rs = input('rs = ');% МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ 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. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И
II РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза БИХ-фильтров ПФ нажмите <ENTER>')
pause
ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2]; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ
WDp = ft/(Fs/2); WDs = fk/(Fs/2); % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ
НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ
ПП и ПЗ
[R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-
ФИЛЬТРА ПФ
БАТТЕРВОРТА
[R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА ПФ
ЧЕБЫШЕВА I РОДА
[R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА ПФ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[R4,WDn4] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА ПФ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
[b1,a1] = butter(R1,WDn1);% КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ
БАТТЕРВОРТА
[b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ
ЧЕБЫШЕВА
I РОДА
[b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ
ЧЕБЫШЕВА
II РОДА
[b4,a4] = ellip(R4,rp,rs,WDn4); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ

```

ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

```
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров ПФ нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp([' R1 = ' num2str(R1),' R2 = ' num2str(R2),' R3 = ' num2str(R3),'
R4 = ' num2str(R4)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ПФ')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ ПФ (ЧЕТЫРЕ
ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА)
нажмите<ENTER>')
pause
figure('Name','Bandpass IIR Filter Butterworth','NumberTitle', 'off')
plot_iir(b1,a1,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ БАТТЕРВОРТА
figure('Name','Bandpass IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle', 'off')
plot_iir(b2,a2,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА I
РОДА
figure('Name','Bandpass IIR Filter Chebyshov II','NumberTitle', 'off')
plot_iir(b3,a3,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЧЕБЫШЕВА II
РОДА
figure('Name','Bandpass IIR Filter Elliptic','NumberTitle', 'off')
plot_iir(b4,a4,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-
КАУЭРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. СИНТЕЗ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И II РОДА И
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
```

```

disp('% Для вывода граничных частот АФП ПФ ПЗ1 (Fk1), ПП1 (Ft1), ПП2 (Ft2)
и ПЗ2 (Fk2) нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2];% ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ
БИХ-ФИЛЬТРА
Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ
ЧАСТОТ ПП и ПЗ АФП
disp([' Fk1 = ' num2str(Fk(1)), ' Ft1 = ' num2str(Ft(1)), ' Ft2 = '
num2str(Ft(2)), ' Fk2 = ' num2str(Fk(2))])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза АФП ПФ нажмите <ENTER>')
pause
Wp = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ КРУГОВЫХ
ЧАСТОТ ПП
и ПЗ АФП
[Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
ПФ
БАТТЕРВОРТА
[Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
ПФ ЧЕБЫШЕВА
I РОДА
[Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
ПФ ЧЕБЫШЕВА
II РОДА
[Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
ПФ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
[bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФ БАТТЕРВОРТА
[bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФ
ЧЕБЫШЕВА I РОДА
[bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП ПФ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода порядков АФП ПФ нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')

```

```

disp([' Ra1 = ' num2str(Ra1),' Ra2 = ' num2str(Ra2),' Ra3 = '
num2str(Ra3),' Ra4 = ' num2str(Ra4)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА
І ІІ РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>')
pause
f= 0:((Fs/2)/1000):Fs/2; % СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ
W = 2.*pi.*f;
Ha1 = freqs(bs1,as1,W); % ЧХ АФП БАТТЕРВОРТА
Ha2 = freqs(bs2,as2,W); % ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА І РОДА
Ha3 = freqs(bs3,as3,W); % ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА ІІ РОДА
Ha4 = freqs(bs4,as4,W); % ЧХ АФП ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
figure('Name','Bandpass Analog Filter — Magnitude','NumberTitle', 'off')
subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,4),plot(f,abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ
ОБЪЕКТА fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG_bandpass =

```

```

fdesign.bandpass('Fst1,Fp1,Fp2,Fst2,Ast1,Ap,Ast2',fk1,ft1,ft2,fk2,rs,rp,rs,[Fs]
) % ОБЪЕКТ fdesign ДЛЯ ПФ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В
ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_bandpass = design(MAG_bandpass,'ellip','MatchExactly',
'both','FilterStructure','df2sos') % ПФ В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-
ФИЛЬТРА ПФ ЗОЛОТАРЕВА-
КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования
нажмите
<ENTER>')
pause
F_bandpass_scale = scale(F_bandpass) % РЕЗУЛЬТАТМАСШТАБИРОВАНИЯ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА ПФ ЗАВЕРШЕН')

```

13.4.4. Синтез и анализ БИХ-фильтра РФ

Листинг script-файла lr_13_stopимеет вид:

```

>> type lr_13_stop
script
clc
clear

```

disp('% ЛР №13. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА РФ МЕТОДОМ
БИЛИНЕЙНОГО Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ')

disp('%')

disp('%')

disp('% п.1. ВВОД ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ (дБ) РФ')

disp('%')

disp('%')

disp('% Введите НОМЕР БРИГАДЫ и ТРЕБОВАНИЯ к АЧХ (дБ)')

DATA=0;

while DATA==0;

Nb = input('Nb = ');% НОМЕР БРИГАДЫ

Fs = input('Fs = ');% ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ в Гц

ft1 = input('ft1 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПП1 в Гц

fk1 = input('fk1 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ1 в Гц

fk2 = input('fk2 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 в Гц

ft2 = input('ft2 = ');% ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ПЗ2 в Гц

rp= input('rp = ');% МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В ПП

rs = input('rs = ');% МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЕ ЗАТУХАНИЕ В

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. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРОВ БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И
II РОДА

И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')

disp('%')

disp('%')

disp('% Для синтеза БИХ-фильтров РФ нажмите <ENTER>')

pause

ft = [ft1 ft2]; **fk** = [fk1 fk2];% ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и ПЗ

WDp = ft/(Fs/2); **WDs** = fk/(Fs/2);% ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ

НОРМИРОВАННЫХ ЧАСТОТ

ПП и ПЗ

[R1,WDn1] = buttord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА БИХ-
ФИЛЬТРА РФ

БАТТЕРВОРТА

[R2,WDn2] = cheb1ord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА РФ

ЧЕБЫШЕВА I РОДА

[R3,WDn3] = cheb2ord(WDp,WDs,rp,rs);% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА РФ

ЧЕБЫШЕВА II РОДА

[R4,WDn4] = ellipord(WDp,WDs,rp,rs); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
БИХ-ФИЛЬТРА РФ

ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

[b1,a1] = butter(R1,WDn1,'stop');% КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФ
БАТТЕРВОРТА

[b2,a2] = cheby1(R2,rp,WDn2,'stop');% КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФ
ЧЕБЫШЕВА

I РОДА

[b3,a3] = cheby2(R3,rs,WDn3,'stop'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФ
ЧЕБЫШЕВА

II РОДА

[b4,a4] = ellip(R4,rp,rs,WDn4,'stop'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ БИХ-ФИЛЬТРА РФ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода порядков БИХ-фильтров РФ нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp([' R1 = ' num2str(R1),' R2 = ' num2str(R2),' R3 = ' num2str(R3),'

R4 = ' num2str(R4)])

disp('%')

disp('%')

disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')

pause

disp('%')

disp('%')

disp('% **п.3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ РФ**')

disp('%')

disp('%')

disp('% Для вывода ХАРАКТЕРИСТИК БИХ-ФИЛЬТРОВ РФ (ЧЕТЫРЕ
ГРАФИЧЕСКИХ ОКНА)

нажмите<ENTER>')

pause

figure('Name','Bandstop IIR Filter Butterworth','NumberTitle','off')

plot_iir(b1,a1,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ БАТТЕРВОРТА

```

figure('Name','Bandstop IIR Filter Chebyshov I','NumberTitle','off')
plot_iir(b2,a2,Fs) % ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЧЕБЫШЕВА II
РОДА
figure('Name','Bandstop IIR Filter Chebyshov II','NumberTitle','off')
plot_iir(b3,a3,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЧЕБЫШЕВА II
РОДА
figure('Name','Bandstop IIR Filter Elliptic','NumberTitle','off')
plot_iir(b4,a4,Fs)% ХАРАКТЕРИСТИКИ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-
КАУЭРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.4. СИНТЕЗ АФП БАТТЕРВОРТА, ЧЕБЫШЕВА I И II РОДА И
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода граничных частот АФП РФ ПП1 (Ft1), ПЗ1 (Fk1), ПЗ2 (Fk2)
и ПП2 (Ft2) нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
ft = [ft1 ft2]; fk = [fk1 fk2]; % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ПП и
ПЗ БИХ-ФИЛЬТРА
Ft = (Fs/pi)*tan(pi*ft/Fs); Fk = (Fs/pi)*tan(pi*fk/Fs); % ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ
ЧАСТОТ ПП и ПЗ АФП
disp([' Ft1 = ' num2str(Ft(1)),' Fk1 = ' num2str(Fk(1)),' Fk2 = '
num2str(Fk(2)),' Ft2 = ' num2str(Ft(2))])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для синтеза АФП РФ нажмите <ENTER>')
pause
Wp = 2.*pi.*Ft; Ws = 2.*pi.*Fk;% ВЕКТОРЫ ГРАНИЧНЫХ КРУГОВЫХ
ЧАСТОТ
ПП и ПЗ АФП
[Ra1,Wn1] = buttord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
РФ
БАТТЕРВОРТА
[Ra2,Wn2] = cheb1ord(Wp,Ws,rp,rs,'s'); % ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА
АФП РФ
ЧЕБЫШЕВА I РОДА

```

```

[Ra3,Wn3] = cheb2ord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
РФ
ЧЕБЫШЕВА II РОДА
[Ra4,Wn4] = ellipord(Wp,Ws,rp,rs,'s');% ПОРЯДОК И ЧАСТОТЫ СРЕЗА АФП
РФ
ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
[bs1,as1] = butter(Ra1,Wn1,'stop','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФ
БАТТЕРВОРТА
[bs2,as2] = cheby1(Ra2,rp,Wn2,'stop','s');% КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФ
ЧЕБЫШЕВА
I РОДА
[bs3,as3] = cheby2(Ra3,rs,Wn3,'stop','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФ
ЧЕБЫШЕВА
II РОДА
[bs4,as4] = ellip(Ra4,rp,rs,Wn4,'stop','s'); % КОЭФФИЦИЕНТЫ АФП РФ
ЗОЛОТАРЕВА-
КАУЭРА
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода порядков АФП РФ нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp([' Ra1 = ' num2str(Ra1),' Ra2 = ' num2str(Ra2),' Ra3 = '
num2str(Ra3),' Ra4 = ' num2str(Ra4)])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.5. ВЫВОД ГРАФИКОВ АЧХ АФП БАТТЕРВОРТА,
ЧЕБЫШЕВА I И II РОДА
И ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода ГРАФИКОВ АЧХ АФП нажмите <ENTER>')
pause
f = 0 : ((Fs/2)/1000):Fs/2;% СЕТКА ЧАСТОТ ДЛЯ ГРАФИКА АЧХ
W = 2.*pi.*f;
Ha1 = freqs(bs1,as1,W); % ЧХ АФП БАТТЕРВОРТА
Ha2 = freqs(bs2,as2,W); % ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА I РОДА
Ha3 = freqs(bs3,as3,W); % ЧХ АФП ЧЕБЫШЕВА II РОДА

```

```

Ha4 = freqs(bs4,as4,W);          % ЧХАФПЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА
figure('Name','Bandstop Analog Filter — Magnitude','NumberTitle','off')
subplot(2,2,1),plot(f,abs(Ha1)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Butterworth'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2),plot(f,abs(Ha2)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov I'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,3),plot(f,abs(Ha3)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Chebyshov II'),ylim([0 1.2])
subplot(2,2,4),plot(f,abs(Ha4)),xlabel('f(Hz)'),grid,...
ylabel('MAGNITUDE'),title('Analog Filter Elliptic'),ylim([0 1.2])
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.6. ОПИСАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К АЧХ БИХ-фильтра В ВИДЕ  

ОБЪЕКТА fdesign')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА fdesign нажмите <ENTER>')
pause
MAG_bandstop =
fdesign.bandstop('Fp1,Fst1,Fst2,Fp2,Ap1,Ast,Ap2',ft1,fk1,fk2,ft2,rp,rs,rp,[Fs])
% ОБЪЕКТ fdesign ДЛЯ РФ
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause
disp('%')
disp('%')
disp('% п.7. СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-КАУЭРА В ВИДЕ  

ОБЪЕКТА dfilt')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt нажмите <ENTER>')
pause
F_bandstop = design(MAG_bandstop,'ellip','MatchExactly',
'both','FilterStructure','df2sos')      % РФ В ВИДЕ ОБЪЕКТА dfilt
disp('%')
disp('%')
disp('% Для продолжения нажмите <ENTER>')
pause

```

```

disp('%')
disp('%')
disp('% п.8. МАСШТАБИРОВАНИЕ В КАСКАДНОЙ СТРУКТУРЕ БИХ-
ФИЛЬТРА РФ ЗОЛОТАРЕВА-
КАУЭРА')
disp('%')
disp('%')
disp('% Для вывода СВОЙСТВ ОБЪЕКТА dfilt после масштабирования
нажмите
<ENTER>')
pause
F_bandstop_scale = scale(F_bandstop,'L2') %
РЕЗУЛЬТАТМАСШТАБИРОВАНИЯ
disp('%')
disp('%')
disp('% СИНТЕЗ БИХ-ФИЛЬТРА РФ ЗАВЕРШЕН')

```

13.4.5. Используемые внешние функции

В script-файлах `lr_13_low`, `lr_13_high`, `lr_13_pass` и `lr_13_stop` используется внешняя функция `plot_iir`, предназначенная для вывода графиков АЧХ, ФЧХ, ИХ и карты нулей и полюсов БИХ-фильтра:

```

function plot_iir(b,a,Fs)
% Вывод графиков АЧХ, ФЧХ, ИХ и карты нулей и полюсов БИХ-фильтра
%
% b — вектор коэффициентов числителя передаточной функции
% a — вектор коэффициентов знаменателя передаточной функции
% Fs — частота дискретизации (Гц)
%
% M — длина ИХ БИХ-фильтра, ограниченная до 50-ти отсчетов
% n — вектор дискретного нормированного времени
% h — вектор отсчетов ИХ
% f — сетка частот (Гц) для расчета АЧХ и ФЧХ
% H — частотная характеристика
% MAG и PHASE — АЧХ и ФЧХ
%
M = 50;
n = 0:(M-1);
h = impz(b,a,M);
f = 0:((Fs/2)/1000):Fs/2;
H = freqz(b,a,f,Fs);
MAG = abs(H);
PHASE = phase(H);

```

```
subplot(2,2,1), plot(f,MAG), xlabel('f (Hz)')
title('MAGNITUDE'), grid, ylim([0 1.2])
subplot(2,2,2), zplane(b,a), title('Z-plane zero-pole plot'), grid
subplot(2,2,3), plot(f,PHASE), xlabel('f (Hz)')
title('PHASE'), grid
subplot(2,2,4), stem(n,h,'fill','MarkerSize',3)
xlabel('n'), title('Impulse Response'), grid
```

13.5. Задание на самостоятельную работу

Задание на самостоятельную работу заключается в создании function-файлов для синтеза БИХ-фильтра ФНЧ методом билинейного Z-преобразования, анализа его характеристик и моделирования процесса цифровой фильтрации. Пункты самостоятельного задания включают в себя:

1С. Синтез БИХ-фильтра ФНЧ Золотарева—Кауэра с произвольными требованиями к характеристике затухания (входные параметры function-файла). Вывести графики ИХ, АЧХ и ФЧХ с помощью function-файла plot_iir (см. разд. 13.4.5), который хранится на диске в папке LAB_DSP\LAB_13. Выходными параметрами function-файла являются векторы коэффициентов БИХ-фильтра.

2С. Дублирует п. 2С в разд. 11.5 для БИХ-фильтра (см. п. 1С).

3С. Дублирует п. 2С в разд. 11.5 для БИХ-фильтра (см. п. 1С).

4С. Синтез БИХ-фильтра ФНЧ Золотарева—Кауэра с выбранной структурой звеньев в виде объекта dfilt на основе объекта fdesign с произвольными требованиями к характеристике затухания (входные параметры function-файла). Выполнить масштабирование на основе нормы 'L2'. Выходным параметром function-файла является имя объекта dfilt.

13.6. Отчет и контрольные вопросы

Отчет составляется в редакторе MS Word и содержит исходные данные и результаты выполнения пунктов задания, включая заполненную табл. 13.7, созданные графики (копируются по команде Edit | Copy Figure в окне Figure), описания структур БИХ-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 порядка БИХ-фильтра.
2. Как определить устойчивость БИХ-фильтра?
3. Можно ли синтезировать БИХ-фильтр с линейной ФЧХ?
4. Запишите передаточную функцию и разностное уравнение БИХ-фильтра.
5. Дайте определение характеристики затухания АЧХ (дБ).
6. Что входит в требования к характеристике затухания БИХ-фильтра?
7. Перечислите основные этапы процедуры синтеза БИХ-фильтра методом билинейного Z-преобразования.

8. Дайте определение частоты среза.
9. Как связаны граничные частоты АЧХ АФП с граничными частотами АЧХ БИХ-фильтра?
10. Назовите четыре типа БИХ-фильтров и поясните вид их АЧХ.
11. Что отображает структура ЦФ и чем определяется ее вид?
12. Какому виду передаточной функции соответствует каскадная структура БИХ-фильтра?
13. Какую структуру могут иметь биквадратные звенья в каскадной структуре?
14. С какой целью выполняется расстановка и масштабирование звеньев?

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 № 6 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