

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

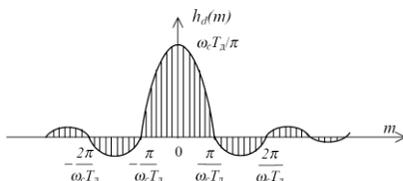
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ по дисциплине  
«Проектирование цифровых устройств обработки сигналов»  
для студентов направления 11.03.03 «Конструирование и  
технология электронных средств» (направленность  
«Проектирование и технология радиоэлектронных средств»)  
всех форм обучения



Воронеж 2018

УДК 621.3.049.7.002 (075)  
ББК 38.54

**Составитель:**  
канд. техн. наук Н. В. Ципина

Проектирование цифровых устройств обработки сигналов: методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Проектирование цифровых устройств обработки сигналов» для студентов направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» (профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Н. В. Ципина. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. 17 с.

Основной целью указаний является выработка навыков работы с цифровыми устройствами обработки сигналов, уяснение их принципа действия, характеристик и параметров.

Предназначены для проведения практических работ по дисциплине «Проектирование цифровых устройств обработки сигналов» для студентов 4 курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле `Практ.раб_ПроектЦУОС.pdf`.

Табл. 3. Библиогр.: 16 назв.

УДК 621.3.049.7.002 (075)  
ББК 38.54

**Рецензент** - О. Ю. Макаров, д-р техн. наук, проф.  
кафедры конструирования и производства  
радиоаппаратуры ВГТУ

Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета

## 1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Практические работы выполняются на 8 семестре обучения у бакалавров 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств. Направленность «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». При выполнении практических работ по дисциплине «Проектирование цифровых устройств обработки сигналов» студенты должны научиться правильно и творчески использовать знания, полученные ими при прохождении теоретических дисциплин: «Электротехника и электроника», «Схемо- и системотехника электронных средств», «Материалы и компоненты электронных средств». Студенты должны ознакомиться с видами литературных источников и справочной информацией, которые необходимо использовать при проектировании печатных плат.

В результате выполнения практических работ они должны уметь решать следующие задачи:

- осуществлять обзор литературных источников по заданной теме;
- осуществлять поиск необходимой справочной информации по теме проекта;
- выбирать необходимую элементную базу исходя из задания проектирования;
- проводить необходимые при проектировании расчеты.

### ОБЪЕМ ОТЧЕТА

Отчет по практическим работам должен содержать 5 – 8 страниц машинописного текста формата А4.

### 2. Содержание практических занятий

Для студентов дневной формы обучения учебным планом предусмотрены два 4-часовых практических занятия по дисциплине ЦОС. Их содержание:

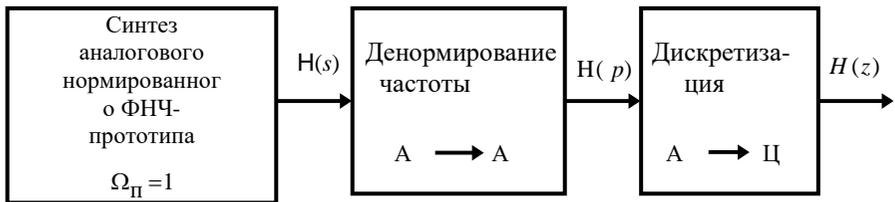
изучение методов проектирования рекурсивных цифровых фильтров

(ЦФ) с использованием системы компьютерной математики Mathcad;

изучение методов проектирования рекурсивных ЦФ с использованием системы компьютерной математики MATLAB.

### 3. Методика проектирования рекурсивных цифровых фильтров по аналоговым прототипам

Проектирование ЦФ может осуществляться как методами математического, так и методами эвристического синтеза. Математический синтез успешно используется для проектирования нерекурсивных ЦФ при линейном представлении аппроксимирующей функции. При этом аппроксимационная задача является линейной. Для линейных задач разработаны эффективные процедуры решения (по крайней мере, численные). Для рекурсивных ЦФ аппроксимационная задача является нелинейной, поэтому в каждом конкретном случае требуется разработка своего алгоритма решения. По этой причине при проектировании рекурсивных ЦФ используют эвристический синтез. Чаще всего синтез проводится по аналоговым нормированным ФНЧ-прототипам [1, 7]. На рисунке показаны этапы проектирования.



1-й этап — синтез аналогового нормированного ФНЧ-прототипа. В результате его выполнения получают передаточную функцию  $H(s)$ . Нормирование заключается в том, что используется «безразмерная» частота  $f_{\Pi}$ , где  $f_{\Pi}$  — верхняя граничная частота полосы пропускания. Для синтеза необходимо задать максимальное затухание в полосе пропускания  $a_{\Pi}$ , минимальное затухание в полосе задерживания  $a_3$  и нижнюю граничную частоту полосы задерживания. На практике обычно используют ФНЧ прототипы

характеристиками Баттерворта, Чебышева 1, Чебышева 2 и эллиптические.

Таблица 1

Коэф- фициенты (3)	Фильтр нижних частот		Фильтр верхних частот	
	$n$ нечетн.	$n$ четн.	$n$ нечетн.	$n$ четн.
$Q_1$	0		$K_0$	0
$Q_0$	$K_0 \square_{\pi}$	$K_0$	0	$K_0$
$F_1$	$F$		$Q$	0
$F_0$	$Q \square_{\pi}$	1	$\square_{\pi}$	1

Таблица 2

Коэффициенты (4)	Полосовой фильтр		Режекторный фильтр	
	$n$ нечетн.	$n$ четн.	$n$ нечетн.	$n$ четн.
$Q_2$	0		$K_0$	0
$Q_1$	$K_0$	0	0	
$Q_0$	0	$K_0$	$K_0 \square^2$	$K_0$
$F_2$	$F$		$Q$	0
$E_{4k}$	$C$		$A_{0k}B_{0k}$	$E_{4k}$

2 Этап — дискретизация — в результате выполнения которого получают передаточную функцию ЦФ  $H(z)$ . Операция дискретизации соответствует отображению комплексной  $P$ -плоскости в комплексную  $Z$ -плоскость. При этом мнимая ось  $P$ -плоскости должна отображаться в единичную окружность  $Z$ -плоскости, а левая полуплоскость  $P$ -плоскости — во внутреннюю часть круга единичного радиуса  $Z$ -плоскости. Выполнение этих требований гарантирует сохранение селективных свойств и

устойчивости фильтра при дискретизации. При этом  $H(z) = H(p)$

При этом получается двухэтапная процедура синтеза. Если для дискретизации используется билинейное преобразование, то процедура (10) называется обобщенным билинейным преобразованием [1]. Коэффициенты блоков передаточных функций (8) и (9), выраженные через коэффициенты передаточной функции (1) с помощью формул обобщенного билинейного преобразования табл.8, сведены в табл.

Программы проектирования рекурсивных цифровых фильтров в системе MATHCAD

В прил.1 приведены листинги программ проектирования рекурсивных ЦФ по аналоговым ФНЧ-прототипам, составленные в системе компьютерной математики Mathcad с использованием метода обобщенного билинейного преобразования. В программах явно просматриваются два этапа: синтез аналогового ФНЧ-прототипа и дискретизация – денормирование частоты. При синтезе ФНЧ-прототипов осуществляется компенсация деформации частотной шкалы (7). Эти этапы при наличии минимальных навыков пользователь может комбинировать с целью получения программ различных типов фильтров (ФНЧ, ФВЧ, ПФ и РФ) с различными видами амплитудно-частотных характеристик (Баттерворта, Чебышева типа 1, Чебышева типа 2, эллиптического). Проектирование рекурсивных цифровых фильтров в системе MATLAB

Проектирование ЦФ с помощью системы компьютерной математики Mathcad требует составления программы, поэтому проектировщик должен знать как алгоритмы проектирования, так и приемы программирования в Mathcad.

Более мощной является система компьютерной математики MATLAB. Она содержит базовую систему MATLAB — матричную лабораторию — и десятки пакетов расширения в самых разных областях компьютерной математики. Эти пакеты содержат функции, решающие определенные задачи. Обращение к этим функциям осуществляется в командном окне системы MATLAB в соответствии с синтаксисом команды. Таким образом, программа, состоящая из команд, занимающих одну строчку, получается очень компактной,

что значительно упрощает работу проектировщика.

Важнейшие пакеты расширения системы MATLAB 6 ориентированы на обработку и фильтрацию сигналов и изображений. Это пакеты расширения Signal Processing Toolbox, Filter Design Toolbox, Wavelet Toolbox и Image Processing Toolbox. Они предоставляют пользователю методы генерации и обработки сигналов и изображений, а также самую современную инструментальную технику машинного проектирования аналоговых и дискретных (цифровых) фильтров различного назначения. Ныне эти средства составляют основу проектирования многих новейших систем и устройств в области радиоэлектроники, связи, телекоммуникаций, контроля и управления.

Система компьютерной математики MATLAB и ее пакеты расширения ориентированы прежде всего на цифровую обработку сигналов, поэтому функции, связанные с расчетом аналоговых фильтров, являются вспомогательными. В основном они используются для синтеза нормированных аналоговых ФНЧ-прототипов при проектировании рекурсивных ЦФ. Большая часть этих функций относится к пакету Signal Processing.

Функции синтеза дискретных фильтров можно разделить на две группы. К первой группе относятся функции проектирования рекурсивных ЦФ по аналоговым прототипам, а ко второй — функции синтеза нерекурсивных ЦФ.

Первая группа содержит функции синтеза аналоговых нормированных ФНЧ-прототипов (buttapp, cheb1ap, cheb2ap, ellipap, besslap), функции денормирования частоты (lp2lp, lp2hp, lp2bp, lp2bs), функции синтеза аналоговых фильтров (butter, cheby1, cheby2, ellip), функции расчета порядка аналогового фильтра (buttord, cheb1ord, cheb2ord, ellipord), функцию билинейного преобразования (bilinear), функцию инвариантного преобразования импульсной характеристики (impinvar), функции синтеза стандартных ЦФ на основе билинейного преобразования (butter, cheby1, cheby2, ellip), функции расчета порядка ЦФ (buttord, cheb1ord, cheb2ord, ellipord)<sup>1</sup>, функции преобразования способов описания фильтров (tf2zp, zp2tf, tf2ss, ss2tf, zp2ss, ss2zp, tf2sos, sos2tf, zp2sos, sos2zp, ss2sos, sos2ss), функции расчета комплексных частотных характеристик аналоговых (freqs) и цифровых (freqz)

фильтров.

В прил.2 приведены листинги программ проектирования рекурсивных ЦФ, составленные в системе компьютерной математики MATLAB. С целью экономии места в этих программах параметры синтезированных ЦФ не выведены, а приводятся только их амплитудно-частотные характеристики.

Вторая группа представлена функциями синтеза нерекурсивных ЦФ с равномерными пульсациями АЧХ методом Ремеза (remez, cremez, gremez), функциями синтеза методом минимизации среднеквадратического значения АЧХ от заданной (firls, fircls, fircls1) и функциями синтеза с использованием окон (fir1, fir2).

В пакете Signal Processing имеется две графических среды, позволяющих рассчитывать и анализировать ЦФ: SPTool и FDATool. Они построены на основе GUI-программ (Graphic User Interface — графический интерфейс пользователя) — это интерактивные системы, предназначенные для моделирования сигналов, устройств и процессов с графическим выводом результатов. Они позволяют выполнять следующие операции:

- импортирование входного сигнала и анализ его спектра;
- синтез ЦФ и анализ его характеристик;
- моделирование процесса фильтрации;
- анализ выходного сигнала и его спектра;

экспортирование результатов моделирования в MATLAB. Помимо перечисленных в системе MATLAB имеется большое количество функций цифровой обработки сигналов (авторегрессионный анализ, быстрое преобразование Фурье, вычисление дискретной свертки, квантование сигналов, вейвлет анализ, генерация, модуляция и демодуляция сигналов, изменение час. Они отличаются от соответствующих функций проектирования аналоговых фильтров синтаксисом дискретизации цифровых сигналов, моделирование работы различных фильтров и др.).

#### 4. Выполнение практических работ

Практические работы по курсу ЦОС выполняются студентами в компьютерном классе с использованием специальных

программ, листинги которых приведены в приложениях 1 и 2.

Каждый студент после изучения методических материалов и сдачи теоретического коллоквиума выполняет проектирование рекурсивного ЦФ согласно индивидуальному заданию, согласно табл.3, где частоты даны в герцах, а затухания в децибелах.

По результатам проектирования составляется отчет, содержащий титульный лист, задание на проектирование, листинг программы, вписанные в него авторучкой комментарии к командам программы, результаты проектирования, структурную схему синтезированного ЦФ, выводы.

Варианты заданий

Таблица 3

№	Тип ЦФ	$F_d$	$f_{п1}$	$f_{п2}$	$a_{п}$	$f_{з1}$	$f_{з2}$	$a_з$
1	ФНЧ	12000	—	2000	3	—	3000	60
2	ФВЧ	6000	1500	—	2	1000	—	50
3	ПФ	70000	14000	16000	2	13000	17000	40
4	РФ	70000	13000	17000	2	14000	16000	40
5	ФНЧ	9000	—	1500	3	—	2000	45
6	ФВЧ	8000	2000	—	3	1500	—	40
7	ПФ	80000	16000	19000	2	15000	20000	50
8	РФ	80000	15000	20000	2	16000	19000	50
9	ФНЧ	7000	—	1000	3	—	1600	50

10	ФВЧ	12000	3000	—	2	2000	—	55
11	ПФ	55000	10000	12000	3	9000	13000	50
12	РФ	55000	9000	13000	3	10000	12000	50
13	ФНЧ	7000	—	1200	3	—	1600	40
14	ФВЧ	14000	3500	—	2	2800	—	60
15	ПФ	60000	12000	14000	2	11000	15000	60
16	РФ	60000	11000	15000	2	12000	14000	60

17	ФНЧ	16000	—	3000	3	—	4000	45
18	ФВЧ	16000	4000	—	2	3000	—	40
19	ПФ	60000	11000	13000	3	10000	14000	50
20	РФ	60000	10000	14000	3	11000	13000	50
21	ФНЧ	20000	—	4000	3	—	5000	50
22	ФВЧ	18000	4500	—	2	4000	—	45
23	ПФ	45000	8000	10000	3	7000	11000	60
24	РФ	45000	7000	11000	3	8000	10000	60
25	ФНЧ	18000	—	3500	3	—	4500	50

26	ФВЧ	20000	5000	—	2	4000	—	60
27	ПФ	50000	10000	11000	2	9000	12000	50
28	РФ	50000	9000	12000	2	10000	11000	50
29	ФНЧ	12000	—	2300	3	—	3000	55
30	ФВЧ	22000	5500	—	3	4500	—	50
31	ПФ	60000	12000	13000	2	11000	14000	60
32	РФ	60000	11000	14000	2	12000	13000	60

## 5. Контрольные вопросы

1. Опишите основные этапы проектирования ЦФ.
2. Опишите метод проектирования рекурсивных ЦФ по аналоговым ФНЧ-прототипам.
3. Какие типы аналоговых ФНЧ-прототипов чаще всего используют при проектировании рекурсивных ЦФ? В чем состоит особенность поведения их АЧХ?
4. В чем состоит преимущество использования нормированных ФНЧ- прототипов перед ненормированными при проектировании ЦФ?
5. Изобразите АЧХ аналогового нормированного ФНЧ Баттерворта.
6. Напишите выражение для передаточной функции аналогового нормированного ФНЧ Баттерворта.
7. Напишите формулу для полюсов передаточной функции аналогового нормированного ФНЧ Баттерворта.
8. Как определяется порядок аналогового нормированного ФНЧ Баттерворта?
9. Изобразите АЧХ аналоговых нормированных ФНЧ Чебышева.
10. Напишите выражения для передаточных функций

аналоговых нормированных ФНЧ Чебышева.

11. Как определяется порядок аналоговых нормированных ФНЧ Чебышева

12. Напишите формулы для расчета полюсов передаточной функции аналогового нормированного ФНЧ Чебышева типа 1.

13. Напишите формулы для расчета нулей и полюсов передаточной функции аналогового нормированного ФНЧ Чебышева типа 2.

14. Изобразите АЧХ аналогового нормированного эллиптического ФНЧ.

15. Напишите выражение для передаточной функции аналогового нормированного эллиптического ФНЧ.

16. Как определяется порядок аналогового нормированного эллиптического ФНЧ?

17. Объясните порядок расчета коэффициентов передаточной функции аналогового нормированного эллиптического ФНЧ.

18. Как осуществляется денормирование частоты в аналоговой области?

19. В чем состоит операция дискретизации аналогового фильтра?

20. Перечислите основные требования, предъявляемые к отображению  $P$ -

плоскости в  $Z$ -плоскость при дискретизации.

21. Опишите метод инвариантного преобразования импульсной характеристики и объясните эффект наложения при формировании АЧХ ЦФ.

22. Опишите метод билинейного преобразования и объясните эффект деформации шкалы «цифровых» частот.

23. Опишите метод обобщенного билинейного преобразования.

## Список литературы

1. Гадзиковский В.И. Методы цифрового моделирования радиотехнических систем: учеб. пособие/ В.И. Гадзиковский. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 1995. — 182 с.

2. Изучение методов проектирования избирательных рекурсивных цифровых фильтров: метод. указания к лабораторной работе по курсу цифровой об-работки сигналов / В.И. Гадзиковский. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 1998. — 22 с.

### Дополнительная литература

3. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов : учебное пособие/Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. — М. : Радио и связь, 1990. — 256 с.

4. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов : справочник / Л.М.Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.

5. Цифровые фильтры в электросвязи и радиотехнике /

6. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов/ Л. Рабинер, Б. Гоулд. — М.: Мир, 1978. — 848 с.

7. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов/ А.В. Оппенгейм, Р.В.Шафер. — М.: Связь, 1979. — 416 с.

8. Антонию А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование/ А. Антонию. — М.: Радио и связь, 1983. — 320 с.

9. Рекурсивные фильтры на микропроцессорах/ под ред. А.Г. Остапенко.

— М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.

10. Куприянов М.С. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования/ М.С. Куприянов, Б.Д. Матюшкин. — СПб.: Политехника, 1999. — 592 с.

11. Тяжев А.И. Выходные устройства приемников с цифровой обработкой сигналов/ А.И. Тяжев. — Самара: Изд-во «Самарский университет», 1992.— 276 с.

12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов/ А.Б. Сергиенко. —

СПб.: Питер, 2002. — 608 с.

13. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: специальный

справочник/ В.П. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2000. — 592 с.

14. Дьяконов В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: специальный справочник/ В.П. Дьяконов, И.В. Абраменкова. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.

15. Основы цифровой обработки сигналов: курс лекций/ А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьева, И.И. Гук. — СПб.: БХВ- Петербург, 2003. — 608 с.

16. Гадзиковский В.И. Основы теории и проектирования цифровых фильтров: Учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов/ В.И. Гадзиковский. — М.: Высшая школа, 1996. — 256 с.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ по дисциплине  
«Проектирование цифровых устройств обработки сигналов»  
для студентов направления 12.03.01 «Проектирование и  
технология радиоэлектронных средств» (профиль «Проектирование  
и технология радиоэлектронных средств»)  
всех форм обучения

Составитель:  
Ципина Наталья Викторовна

Компьютерный набор Н. В. Ципиной

Подписано к изданию\_\_\_\_.  
Уч.-изд. л. \_\_\_\_.

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

