

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ**

Факультет СиСС

**Методические указания к выполнению и
оформлению Лаб. 26-2**
(дисциплина ЦОС)

Автор: проф. каф. ОТС Волчков В. П.

Москва - 2022

Общие требования

Следует изучить краткую теорию цифровых фильтров (ЦФ) по описанию лаб. 26 [1] (стр. 16-23) и приведенные ниже методические указания. (Список дополнительных источников и литературы по теории ЦФ приведен в конце данных методических указаний)

ВАЖНО: 1) Описание лабораторной работы Лаб.26-2 [1] на стр.8 содержит устаревшую версию лабораторного задания. Вместо нее следует использовать новую версию задания, которая содержится в высланном файле «Задание_lab26-2_2022.pdf» [2].

2) Домашнее задание и оформление отчета по лабораторной работе Лаб.26-2 выполняется в соответствии с приведенными методическими указаниями и по правилам электронной верстки, которые изложены в [3]. (Правила электронной верстки лаб. отчетов по ЦОС.pdf)

3) Названия разделов и подразделов отчета по Лаб.26-2, а также их содержание указаны ниже в Приложении 1.

4) Параметры фильтров для расчета домашнего задания и ее выполнения зависят от номера варианта и приводятся ниже в Приложении 2.

5) Отчет по лабораторной работе должен начинаться с титульного листа, образец которого приведен в Приложении 3, где нужно указать свою фамилию, уточнить номер варианта, название выполняемой работы, год.

Замечание:

Все формулы, по которым строятся характеристики ЦФ-1 в домашнем задании, должны быть получены из соответствующего разностного уравнения 1-го порядка по методике, изложенной преподавателем на занятиях по лабораторному практикуму. По этой причине первые 1-2 занятия перед выполнением Лаб.26-2 очень важны для студента, так как на них преподаватель подробно рассказывает, как строить структурные схемы, рассчитывать характеристики ИХ ПХ АЧХ, ФЧХ цифровых рекурсивных фильтров по его разностному уравнению, как пользоваться системой Матлаб для расчета и построения графиков характеристик ЦФ и др. Весь этот материал нужен для осмысленного выполнения домашнего задания и успешного прохождения компьютерных тестов (допуска и защиты).

1. Особенности оформления и выполнения работы

1. Все результаты выполнения домашнего задания описываются в разделе 2 отчета и оформляются по правилам, изложенным в [3], а рекомендуемые названия подразделов 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 раздела 2 и их краткое содержание приведены ниже в Приложении 1.
2. Для графиков ИХ и ПХ сетка вдоль оси абсцисс целочисленная в диапазоне от 0 до 30 отсчетов. Сетка частот для АЧХ и ФЧХ выражается в килоггерцах в диапазоне от 0 до f_d и должна состоять из 500 или более точек, чтобы графики этих характеристик были плавными.

3. Расчеты графиков всех характеристик ЦФ-1, указанных в ДЗ, а также их редактирование и вставка в отчет выполняются с помощью системы инженерных расчетов Matlab по правилам, описанным в [3]. (вместо Matlab могут быть использованы открытые системы Octave или Scilab). При оформлении отчета исходные формулы для расчета ИХ ПХ АЧХ, ФЧХ в домашнем задании должны быть получены на основе уравнений ЦФ-1.

Замечание: Если используется Матлаб, то для расчетов ФЧХ может быть использован оператор **angle** или **atan2**. В системах Octave или Scilab следует использовать **atan2**.

4. Все предусмотренные домашним заданием рисунки (таблицы, структурные схемы, графики) подписываются по правилам, изложенным в [3]: внизу – в случае схем и др. рисунков; вверху – в случае таблиц. Ниже приводятся образцы подписи для рисунков и таблиц, которые следует использовать в отчете при оформлении домашнего задания лабораторной работы 26-2

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Рис. 1. Структурная схема рекурсивного ЦФ 1-го порядка
($b_0 = \dots$, $a_1 = \dots$)

ГРАФИК

Рис. 2. ИХ рекурсивного ЦФ 1-го порядка ($b_0 = \dots$, $a_1 = \dots$)

и т. д по аналогии до рис.5 включительно:

ГРАФИК

Рис. 5. ФЧХ рекурсивного ЦФ 1-го порядка ($b_0 = \dots$, $a_1 = \dots$)

Табл. 1. Таблица параметров фильтра для своего варианта ДЗ

Порядок фильтра	b_0	a_1	f_d
1	...	...	8 кГц

где вместо «...» указываются конкретные значения параметров, взятые из таблицы 1 (Л26-2) (см. ниже «Варианты заданий для лаб.26-2» в приложении 2»). Причем начертание всех переменных в подписи к рисунку и в ячейках таблицы данных должно быть таким же, как и в формулах отчета, т.е. выполняется математическим курсивом 12 pt.

5. После проверки преподавателем домашнего задания, студент приступает к прохождению компьютерного теста для допуска к выполнению лаб. работы. Тест включает вопросы, позволяющие оценить самостоятельность выполнения ДЗ студентом и понимание основных характеристик ЦФ, которые ему предстоит исследовать.
6. В случае успешного прохождения теста студент приступает к выполнению Лаб.26-2 на лабораторном компьютерном стенде. При этом все предусмотренные лаб. заданием [2] графики (22 шт.) характеристик фильтров фотографируются смартфоном с экрана монитора. Полученные фото

показываются преподавателю, который фиксирует факт выполнения лабораторной работы.

7. Все результаты эксперимента описываются в разделе 3 отчета и оформляются по правилам, изложенным в [3], а рекомендуемые названия подразделов 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 раздела 3 и их краткое содержание приведены ниже в Приложении 1.

В частности, в подразделе 3.1 отчета «Исходные параметры исследуемых фильтров» приводится таблица значений параметров b_0, a_1, a_2 10-ти рекурсивных фильтров, рассчитанных по данным Приложения 2 с учетом номера варианта. Образец оформления таблицы параметров приводится ниже

Табл. 2. Таблица параметров исследуемых фильтров

Номер фильтра	Порядок фильтра	b_0	a_1	a_2
1				
....			...	...
10				

В подразделе 3.2. приводятся две структурные схемы (рис.6 и рис.7) исследуемых фильтров (1-го и 2-го порядков) с указанием в подрисуночной подписи каким номерам фильтров схема соответствует, т.е. без конкретизации значений их параметров.

В подразделе 3.3 должны быть приведены и пронумерованы формулы, по которым велся расчет характеристик ИХ, ПХ, АЧХ в Матлабе. Они могут быть получены из общих формул путем их конкретизации для заданного порядка фильтра. Поскольку в разделе 3 исследуются только фильтры 1 и 2 порядков, то приводятся два набора формул – по три формулы в наборе.

В подразделе 3.4 приводятся графики ИХ, ПХ, АЧХ для 10-ти исследуемых фильтров, рассчитанные при тех же значениях параметров, которые использовались в лабораторном эксперименте – всего 22 графика. Они оформляются и вставляются в отчет и по методике, описанной в [3], где указаны примеры подписей осей координат, типы и размеры используемых шрифтов, и подробно изложена вся последовательность действий в системе Matlab и редакторе Word, необходимая для получения нужного результата.

Следует убедиться, что рассчитанные графики по своему виду совпадают с фотографиями экспериментальных графиков, что *является критерием правильности проведенных расчетов.*

Замечание. На вычисленных в системе Матлабе графиках ИХ и ПХ вдоль горизонтальной оси откладываются номера отсчетов i , а на графиках АЧХ, ФЧХ – частота f в килогерцах. На фотографиях аналогичных экспериментальных кривых подписи осей выражены в других единицах, но на форму графиков это не влияет. При сравнении графиков надо учесть, что на фото кривых АЧХ и ФЧХ, сделанных с экрана дисплея, горизонтальная ось, вдоль которой стоит надпись wT , описывает относительные частоты в градусах. А именно, $wT = 360^\circ fT$, где

$T = 1/f_d$, $f_d = 8$ кГц. Поэтому частота f в килогерцах связана с ωT формулой $f = \omega T f_d / 360^\circ$. В частности, значению $\omega T = 360^\circ$ будет соответствовать частота $f = f_d = 8$ кГц, а значению $\omega T = 180^\circ$ будет соответствовать частота Найквиста $f_H = 4$ кГц. Горизонтальные оси на фото характеристик ИХ и ПХ подписаны переменной nT , которая по своему смыслу соответствует номеру дискретного отсчета i .

8. Графики, относящиеся к экспериментальной части подраздела 3.4, (в отличие от тех, которые рассчитывались в домашнем задании) должны быть снабжены специальными поясняющими подписями, упрощающими их интерпретацию:

Рис. ИХ- n ($b_0 = \dots$; $a_1 = \dots$; $a_2 = \dots$)

Рис. ПХ- n ($b_0 = \dots$; $a_1 = \dots$; $a_2 = \dots$)

Рис. АЧХ- n ($b_0 = \dots$; $a_1 = \dots$; $a_2 = \dots$)

Здесь **n** – обозначает порядковый номер фильтра (может принимать значения от 1 до 10), для которого был построен данный график. В круглых скобках математическим курсивом указываются значения параметров фильтра. Причем для фильтров 1-го порядка параметр a_2 можно не указывать. Такой сокращенный вид подписи к экспериментальным графикам продиктован необходимостью их максимально плотного размещения на странице отчета.

Рекомендуется все графики в подразделе 3.4 вместе с поясняющими подписями сгруппировать по 6 штук на странице (как проще это сделать описано в [3]), а в каждую колонку на странице, состоящую из 3-х графиков, помещать характеристики ИХ, ПХ, АЧХ, отвечающие одному и тому же фильтру.

9. Выводы по выполненной лаб. работе 26-2 должны быть содержательными и включать в себя следующие пункты:

- 1) Анализ устойчивости рекурсивных фильтров. Ответ обосновать теоретически с привлечением необходимых формул.
- 2) Выполнить классификацию всех устойчивых вариантов фильтров по виду АЧХ (ФНЧ – фильтр низкой частоты, ФВЧ – фильтр высокой частоты, ПФ – полосовой фильтр). При этом надо сначала сформулировать критерий классификации, а затем указать конкретный график АЧХ (из снятых и подписанных по указанной выше методике) и отметить какому типу фильтра он соответствует.
- 3) Сравнить поведение АЧХ, полученных в подразделе 3.3, для однотипных рекурсивных фильтров 1-го и 2-го порядка (выполнить отдельно для ФНЧ и ФВЧ). Данное сравнение следует проводить анализируя:
 - i) ширину полосы пропускания $F_{0,7}$ (определяется по уровню 0,7);
 - ii) поведение кривых АЧХ на границе полосы пропускания по крутизне (спада или подъема) кривой;
 - iii) наличие/отсутствие пульсаций в пределах полосы пропускания и вне ее.
- 4) Указать основные особенности, недостатки/преимущества рекурсивных фильтров, изучив литературные источники по ЦОС, включая интернет.

Замечание. Выводы не должны иметь описательного характера по принципу «Что вижу, на рисунке и говорю» и не содержать бытовых или неуместных фраз типа – волнистый график, более монотонная кривая, изрезанный выступ кривой и т.д. Терминология и лексика изложения должна быть инженерной.

Особенности проведения тестирования при допуске и защите лабораторной работы

К тестированию для допуска к выполнению Лаб.26-2 необходимо правильно рассчитать и оформить домашнее задание.

К тестированию для защиты Лаб.26-2 необходимо ее выполнить и правильно оформить отчет, включая выводы по отчету

Допуск и защита проходят в виде компьютерного тестирования. Для этого каждый студент садится за отдельный компьютер, взяв с собой только ручку и два листа чистой бумаги. Тест считается пройденным при получении, как минимум, удовлетворительной оценки.

Калькулятор и смартфон при тестировании не нужны – все предлагаемые в тесте вычисления элементарные, которые только требуют знания таблицы умножения, умения складывать/вычитать, умножать/делить «в столбик» двухзначные числа и решать квадратные уравнения.

Список рекомендуемой литературы

1. Санников В.Г. и др. Лабораторная работа № 26 Анализ и эмпирический синтез цифровых фильтров, М.: 2009
2. Задание к лабораторной работе 26- 2. Электронный файл – *Задание_lab26-2.pdf* (высылается преподавателем через старосту группы)
3. Правила электронной верстки отчетов по лабораторному практикуму. Электронный файл – *Правила электронной верстки лаб. отчетов по ЦОС.pdf*

Дополнительные материалы

4. А.Б. Сергиенко. Цифровая обработка сигналов (Учебник для вузов, 2-е издание) – СПб.: Изд. «Питер», 2007. (возможны более ранние и более поздние издания).
5. Юрий Лазарев. MatLAB 5.x (серия «Библиотека студента»), Киев: Издательская группа BHV, 2000.
6. В. Г. Потемкин. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x, Том.1, Москва: «Диалог-МИФИ, 1999.

Приложение 1

Примеры оформления заголовков в тексте отчета для Лаб.26-2

1. Цель работы

(указать цель лаб. работы)

2. Выполнение домашнего задания

(преамбула с кратким содержанием ДЗ в соответствии с методическими указаниями к лаб. работе)

2.1. Исходные данные для своего варианта ДЗ

(Определяется номер своего варианта и составляется советующая ему таблица параметров ЦФ-1)

2.2. Запись разностного уравнения и системной функции

(для ЦФ из ДЗ в соответствии с номером своего варианта)

2.3. Построение структурной схемы ЦФ

(для ЦФ из ДЗ в соответствии с номером своего варианта)

2.4. Расчет и построение характеристик ЦФ

(вывод формул для указанных в ДЗ характеристик фильтров (ИХ, ПХ, АЧХ, ФЧХ) и результаты их расчета в виде графиков)

3. Выполнение лабораторной работы

3.1. Исходные параметры исследуемых фильтров

(По номеру варианта составляется таблица для всех параметров исследуемых фильтров)

3.2. Структурные схемы и уравнения исследуемых фильтров

(на основании каких уравнений строились схемы, затем сами схемы)

3.3. Выражения для расчета характеристик, исследуемых ЦФ

(Формулы, по которым рассчитывались характеристики исследуемых фильтров)

3.4. Результаты экспериментального исследования

(Графики характеристик исследуемых фильтров, рассчитанные и вставленные с помощью Matlab с плотностью вставки 6 графиков на каждой странице)

4. Детальные выводы по работе

(выполняются в соответствии с методическими указаниями к лаб. работе)

4.1. Анализ устойчивости

(для каждого из исследуемых фильтров)

4.2. Классификация фильтров

(на основе анализа графиков АЧХ исследуемых фильтров)

4.3. Анализ поведения АЧХ

(на основе анализа графиков АЧХ исследуемых фильтров)

4.4. Недостатки и преимущества исследуемых фильтров

(на основе информации, полученной на лаб. занятиях, рекомендуемой литературы и интернета)

Варианты заданий для лаб.26-2

Указание: Номер варианта совпадает с номером студента в журнале преподавателя и уточняется у старосты группы

Параметры рекурсивного ЦФ-1 для расчета домашнего задания (к разделу 2.2)

Таблица 1 (26-2). Параметры нерекурсивного ЦФ-1 для разных вариантов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Параметр: b_0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Параметр: a_1	0,65	-0,67	0,69	-0,71	0,73	-0,75	0,77	-0,79	0,81	-0,83	0,85	-0,87	0,89	-0,91	0,93	-0,95
№ варианта	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Параметр: b_0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Параметр: a_1	-0,65	0,67	-0,69	0,71	-0,73	0,75	-0,77	0,79	-0,81	0,83	-0,5	0,87	-0,89	0,91	-0,93	0,95

Величина Δ_1 для исследуемых рекурсивных ЦФ-1 (к разделу 2.3.1.)

Таблица 2 (26-2). Значения величины Δ_1 для разных вариантов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Величина Δ_1	δ	2δ	3δ	4δ	5δ	6δ	7δ	8δ	9δ	10δ	11δ	δ	2δ	3δ	4δ	5δ
№ варианта	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Величина Δ_1	6δ	7δ	8δ	9δ	10δ	11δ	δ	2δ	3δ	4δ	5δ	6δ	7δ	8δ	9δ	10δ

где $\delta \approx 0.01667$ – размер одного пикселя с округлением до 5-го знака после запятой, а $\Delta_1 = k_1\delta$, $k_1 \in \{1, 2, \dots, 11\}$

Параметры (a_1, a_2) для 4-х исследуемых рекурсивных ЦФ-2 (к разделу 2.3.2)

Таблица 3 (26-2). Значения пар коэффициентов (a_1, a_2) для разных вариантов

($\delta \approx 0.01667$ – размер одного пикселя с округлением до 5-го знака после запятой)

[illegible]

Таблица 3 (26-2) (продолжение). Значения пар коэффициентов (a_1, a_2) для разных вариантов
 $(\delta \approx 0.01667$ – размер одного пикселя с округлением до 5-го знака после запятой)

№ варианта	17	18	19	20	21	22	23	24
Фильтр 7 (a_1, a_2)	$a_1 = -1.3,$ $a_2 = -0.45 - \delta$	$a_1 = -1.3,$ $a_2 = -0.45 - 2\delta$	$a_1 = -1.3,$ $a_2 = -0.45 - 3\delta$	$a_1 = -1.3,$ $a_2 = -0.45 - 4\delta$	$a_1 = -1.4,$ $a_2 = -0.5$	$a_1 = -1.4,$ $a_2 = -0.5 - \delta$	$a_1 = -1.4,$ $a_2 = -0.5 - 2\delta$	$a_1 = -1.4,$ $a_2 = -0.5 - 3\delta$
Фильтр 8 (a_1, a_2)	$a_1 = 1.3,$ $a_2 = -0.45 - \delta$	$a_1 = 1.3,$ $a_2 = -0.45 - 2\delta$	$a_1 = 1.3,$ $a_2 = -0.45 - 3\delta$	$a_1 = 1.3,$ $a_2 = -0.45 - 4\delta$	$a_1 = 1.4,$ $a_2 = -0.5$	$a_1 = 1.4,$ $a_2 = -0.5 - \delta$	$a_1 = 1.4,$ $a_2 = -0.5 - 2\delta$	$a_1 = 1.4,$ $a_2 = -0.5 - 3\delta$
Фильтр 9 (a_1, a_2)	$a_1 = 0.5,$ $a_2 = -0.7 - 6\delta$	$a_1 = 0.5,$ $a_2 = -0.7 - 7\delta$	$a_1 = 0.5,$ $a_2 = -0.7 - 8\delta$	$a_1 = 0.5,$ $a_2 = -0.7 - 9\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - \delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 2\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 3\delta$
Фильтр 10 (a_1, a_2)	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 17\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 18\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 19\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 20\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 21\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 22\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 23\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 24\delta$

№ варианта	25	26	27	28	29	30		
Фильтр 7 (a_1, a_2)	$a_1 = -1.4,$ $a_2 = -0.5 - 4\delta$	$a_1 = -1.5,$ $a_2 = -0.55$	$a_1 = -1.5,$ $a_2 = -0.55 - \delta$	$a_1 = -1.5,$ $a_2 = -0.55 - 2\delta$	$a_1 = -1.5,$ $a_2 = -0.55 - 3\delta$	$a_1 = -1.5,$ $a_2 = -0.55 - 4\delta$		
Фильтр 8 (a_1, a_2)	$a_1 = 1.4,$ $a_2 = -0.5 - 4\delta$	$a_1 = 1.5,$ $a_2 = -0.55$	$a_1 = 1.5,$ $a_2 = -0.55 - \delta$	$a_1 = 1.5,$ $a_2 = -0.55 - 2\delta$	$a_1 = 1.5,$ $a_2 = -0.55 - 3\delta$	$a_1 = 1.5,$ $a_2 = -0.55 - 4\delta$		
Фильтр 9 (a_1, a_2)	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 4\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 5\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 6\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 7\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 8\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = -0.7 - 9\delta$		
Фильтр 10 (a_1, a_2)	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 25\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 26\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 27\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 28\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 29\delta$	$a_1 = 0,$ $a_2 = 1 - 30\delta$		

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

**МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ**

Факультет СиСС
Кафедра общей теории связи

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

№ 26-2

по дисциплине «Цифровая обработка сигналов»

на тему:

**«Анализ рекурсивных цифровых фильтров
1-го и 2-го порядка»**

Вариант №2

Выполнил: студ. гр. БСС1401

Матюнина Дарья

Проверил: проф. каф. ОТС

Волчков В. П.

(Осенний семестр)

Москва 2022